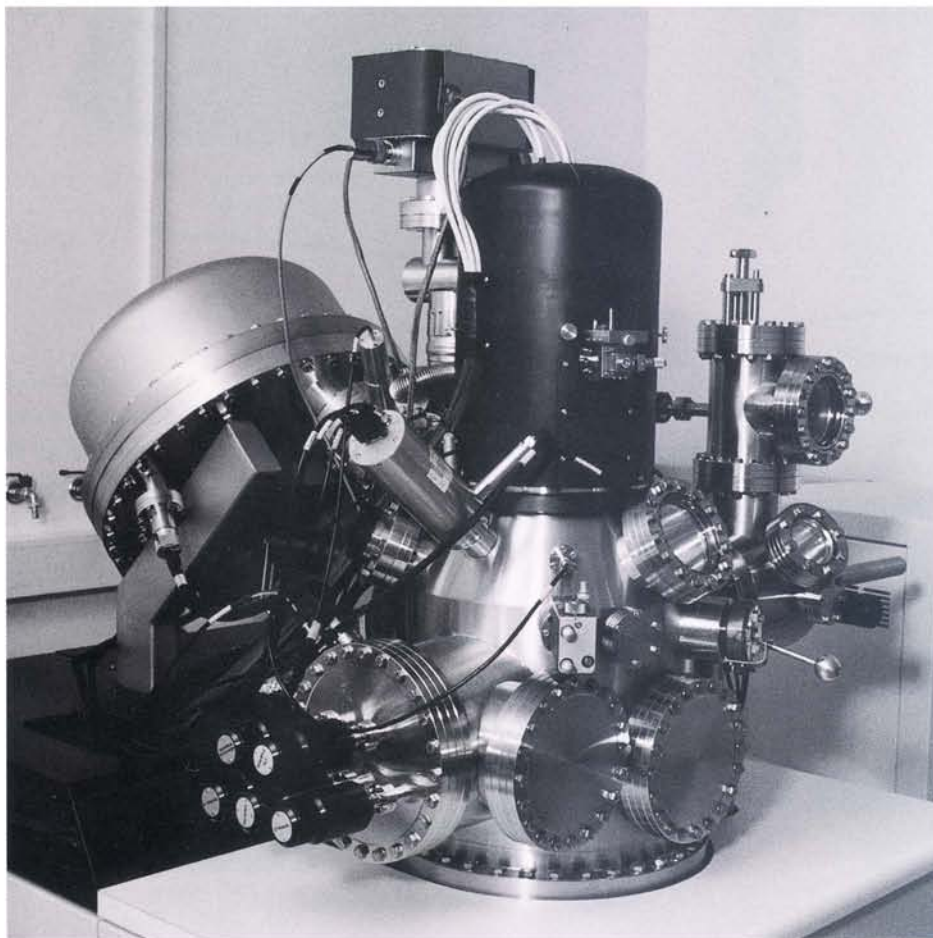


VAKUUMIST

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

LJUBLJANA, JUNIJ 98

LETNIK 18, ŠT. 2, 1998





SCAN d.o.o., zastopniško servisno podjetje
Breg ob Kokri 7, 4205 Preddvor, Slovenija
Tel. +386 64 451 383, Fax +386 64 451 050

balzers
Instruments

Nov standard na področju helijeve detekcije netesnosti



Omogoča enostavno in prijazno delo

- Pogon preko menuejev
- Možnost prikaza na zaslonu v domačem jeziku
- Kompaktna izvedba merilnika
- Hitri in zanesljivi rezultati skupaj s protokolom
- Možnost delovanja v vakuumski ali sledilni (sniffer) izvedbi
- Optimalna zadušitev ozadja
- Hitro odkrivanje netesnosti
- Visok vhodni tlak in velika hitrost črpanja helija omogočata hitre meritve

PFEIFFER  **VACUUM**

Pfeiffer Vacuum Austria GmbH
Diefenbachgasse 35
A-1150 Wien
Tel. +43-1-894-1704
Fax +43-1-894-1707
Internet: <http://www.pfeifer-vacuum.de>

VSEBINA

Rentgenska fotoelektronska spektroskopija z visoko lateralno ločljivostjo - mikro XPS (J. Kovač)

Supertrde zaščitne prevleke (P. Panjan)

Schottkyjeva bariera - moderni pogledi na star problem (I. del) (D. Korošak, B. Cvikl)

Vodenje in diagnosticiranje curka naelektrenih delcev (A. Paulin, A. Pregelj)

Petdesetletnica tranzistorja (II. del) (S. Južnič)

NASVETI (P. Panjan)

DRUŠTVENE NOVICE

Slika na naslovni strani prikazuje nov **vrstični spektrometer Augerjevih elektronov na poljsko emisijo (MICROLAB 310-F)**, ki je bil konec lanskega leta instaliran na **Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije** v Ljubljani. Nova naprava omogoča natančno analizo vključkov velikosti pod 0,1 mm, kot so npr. karbidni in nitridni izločki v jeklih, ter v aluminiju oz. v njegovih zlitinah.

SPONZORJI VAKUUMISTA:

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

Obvestilo

Naročnike Vakuumista prosimo, da čim prej poravnate naročnino za leto 1998.

Cena štirih števil, kolikor jih bo izšlo v letu, je 2000,00 tolarjev.

- VAKUUMIST
- Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije
- Glavni in odgovorni urednik: dr. Peter Panjan
- Uredniški odbor: mag. Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje vakuumске tehnike in sistemov), dr. Bojan Jenko, dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumске metalurgije), dr. Ingrid Milošev, dr. Miran Mozetič, dr. Vinko Nemanič, Marjan Olenik, dr. Boris Orel, mag. Andrej Pregelj, dr. Vasilij Prešern in dr. Anton Zalar
- Lektor: dr. Jože Gasperič
- Korektor: Miha Čekada
- Naslov: Uredništvo Vakuumista, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 1000 Ljubljana, tel. (061)177 66 00
- Elektronska pošta: DVTS.group@guest.arnes.si
- Številka žiro računa: Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, 50101-678-52240
- Grafična obdelava teksta: Jana Strušnik
- Tisk: PLANPRINT, d.o.o. - Littera picta, Rožna dolina, c. IV/32-36, 1000 Ljubljana
- Naklada 400 izvodov

RENTGENSKA FOTOELEKTRONSKA SPEKTROSKOPIJA Z VISOKO LATERALNO LOČLJIVOSTJO - mikro XPS

Janez Kovač, Inštitut za tehnologijo površin in optoelektroniko, Teslova 30, 1000 Ljubljana

X-Ray Photoelectron Spectroscopy with high lateral resolution - micro XPS

ABSTRACT

The phenomena on the microscopic scale have been recognized to play an important role in the field of surface and interface engineering and thin film technologies. The lack of a suitable technique to characterize these phenomena forces the development of different approaches how to obtain high spatial resolution with XPS technique. Some of them are described in this article. In more details the new Scanning Photoemission Microscope (SPEM) installed at ESCA Microscopy beamline at synchrotron Elettra is presented. Some typical results obtained by small spot XPS technique are given at the end.

POVZETEK

Na mnogih tehnoloških področjih, kjer stopajo v ospredje lastnosti površin, tankih plasti in faznih mej, se je pokazalo, da igrajo velikokrat pomembno vlogo procesi in pojavi na mikroskopskem nivoju. Potreba po karakterizaciji teh pojavov je narekovala razvoj lateralno visoko ločljive tehnike XPS. V prispevku so na kratko podane osnovne značilnosti tehnike XPS, potrebna instrumentalna oprema in različne izvedbe, ki omogočajo visoko lateralno ločljivost te tehnike. Nekoliko podrobneje je opisan rastrski fotoemisijski mikroskop na žarkovni liniji ESCA Microscopy na sinhrotronu Elettra. Podano je tudi nekaj rezultatov, dobljenih s tehniko mikro XPS.

1 Uvod

V zadnjem desetletju se je močno razširila uporaba različnih tehnik za preiskavo površin trdnih teles, tako pri temeljnih študijah fizikalnih in kemičnih procesov na površinah, kot pri raziskavah v industrijskem okolju. Spoznanje, da je dogajanje na površinah in notranjih faznih mejah velikokrat povezano z nehomogeno sestavo površine, narekuje uporabo tehnik z visoko lateralno ločljivostjo.

Rentgenska fotoelektronska spektroskopija (X-Ray Photoelectron Spectroscopy - XPS ali Electron Spectroscopy for Chemical Analysis - ESCA) se je pokazala kot ena od najbolj primernih analitičnih tehnik pri preiskavi elementarne sestave, kemičnega stanja elementov ter elektronske strukture na površini trdne snovi [1-4]. Tehniko odlikuje izredna površinska občutljivost, zato je njena uporaba posebno pomembna tam, kjer stopajo v ospredje pojavi na površinah in v tankih plasteh, npr. pri študiju kemičnih reakcij, difuzije, korozije, adhezije, adsorpcije, katalitičnih reakcij. V kombinaciji z nekaterimi drugimi tehnikami zagotavlja XPS zelo široko informacijo o površini preiskovanega vzorca.

Donedavnega je XPS tehniki manjkala lateralna ločljivost. Zato je bila potrebna uporaba drugih komplementarnih mikroskopskih tehnik. Poleg tega pa je bilo v zadnjih letih veliko narejenega v smeri zagotavljanja mikroskopske informacije tudi pri razvoju same tehnike XPS. Izboljšano lateralno visoko ločljivo tehniko XPS lahko poimenujemo *mikro XPS* ali *mikro ESCA*. Tako je sedaj dosegljiva lateralna ločljivost tehnike *mikro XPS* od nekaj desetink do nekaj deset mikrometrov, odvisno od izvedbe. Namen tega članka je opisati nekaj

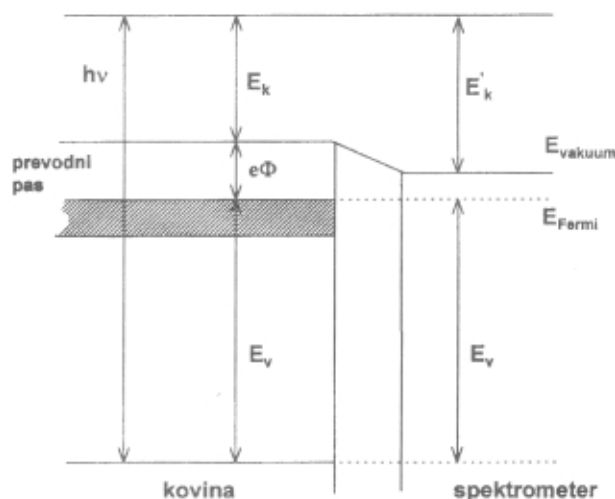
načinov, kako z rentgensko mikroskopijo doseči tako visoko ločljivost. Prvič to lahko dosežemo s fokusiranjem žarka rentgenske svetlobe na mikro področje, in drugič z veliko povečavo mikro področja, tako da razklonimo trajektorije fotoelektronov z električnim ali magnetnim poljem.

2 Osnove rentgenske fotoelektronske spektroskopije - XPS

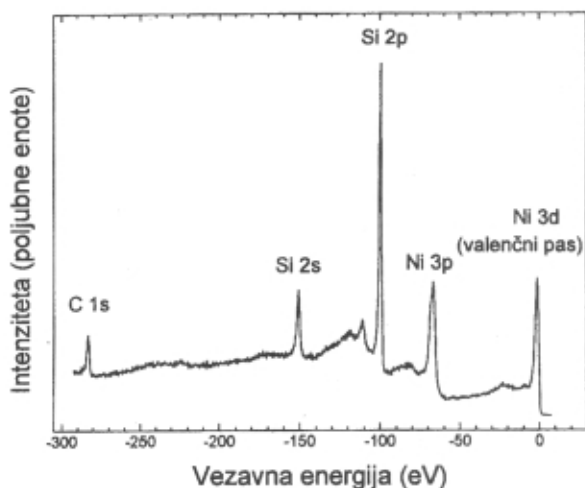
Ekspiriment temelji na pojavu fotoefekta. Foton z energijo $h\nu$ izbije elektron iz enega od notranjih atomskih energijskih nivojev ali pasov, ki ga imenujemo fotoelektron. Izsevani fotoelektron, ki ima dovolj veliko energijo, da zapusti površino, detektiramo pri meritvi v prostoru nad površino z elektronskim energijskim analizatorjem. Shema energijskih nivojev pri fotoefektu je prikazana na sliki 1. Velja naslednja zveza med kinetično energijo fotoelektrona E_K , energijo fotona $h\nu$ in vezavno energijo elektrona v snovi E_V :

$$E_V = h\nu - e\Phi - E_K \quad (1)$$

$e\Phi$ je izstopno delo, potrebno da elektron zapusti vzorec. Po meritvi E_K poznamo vse količine na desni strani enačbe, tako da lahko izračunamo vezavno energijo elektrona E_V v snovi. Pri detekciji ne zaznamo samo enega elektrona, temveč množico izsevanih elektronov. Z elektronskim energijskim analizatorjem posnamemo elektronski spekter, to je porazdelitev izsevanih fotoelektronov po kinetični energiji. V spektru so različni vrhovi, ki so povezani s fotoelektroni, izsevanimi iz različnih elektronskih nivojev v atomu (slika 2). V primeru, ko je na površini več vrst atomov, lahko da analiza spektra kvantitativno informacijo o različnih elementih na površini vzorca. Intenziteta vrhov v spektru, ki pripada atomom nekega elementa, je



Slika 1. Shema energijskih nivojev pri emisiji fotoelektrona



Slika 2. Pregledni spekter XPS površine Ni/Si, vzbujen s sinhrotronsko svetlobo energije 492 eV

sorazmerna s številom atomov na površini. Pri tem je treba upoštevati še sevalni presek za izsevanje fotoelektrona tega elementa in instrumentalni faktor, ki opisuje učinkovitost detekcije.

Poleg tega lahko izluščimo tudi informacijo o kemični vezavi elementov na površini. Položaj vrha v spektru oziroma vezavna energija fotoelektrov sta zelo občutljiva na spremembe kemičnega okolja, od koder so bili izsevani fotoelektroni. Ravno tako lahko iz analize fotoelektronskega spektra v bližini Fermijevega energijskega nivoja sklepamo na porazdelitev elektronskih stanj v valenčnem in prevodnem pasu. Iz tega lahko sklepamo o elektronskih lastnostih površine vzorca (kovinski ali polprevodniški značaj). Omeniti je treba, da tehniko XPS odlikuje tudi izjemna površinska občutljivost, ki je določena s srednjo prosto potjo fotoelektronov v snovi (od 0,3 do 2,0 nm).

3 Sestava rentgenskega fotoelektronskega spektrometra

Instrument za rentgensko fotoelektronsko spektroskopijo je sestavljen iz vakuumskega sistema, izvira rentgenskega sevanja, elektronskega energijskega analizatorja, manipulatorja vzorca in priprav za obdelavo vzorca.

Vakuumski sistem, v katerega je vgrajen spektrometer, mora biti narejen za delo v ultra visokem vakuumu - UVV, kar pomeni za tlake pod 10^{-9} mbar. Za to sta dva razloga. Prvič se nizkoenergijski elektroni, kot so fotoelektroni, sipljejo na molekulah v residualni atmosferi. To sipanje zmanjšuje velikost signala in povečuje nivo šuma. Drugi razlog je v tem, da pri študiju lastnosti površin opazujemo resnično čiste površine. To pomeni, da se med meritvijo na njih ne smejo adsorbirati molekule raznih residualnih plinov.

Za študij pojavov na površinah je primerna predvsem mehka rentgenska in ultravijolična svetloba. Vzrok za to je, da ima takšna svetloba ravno primerno energijo (od nekaj 10 eV do 1,5 keV), da omogoča detekcijo

fotoelektronov samo iz nekaj zadnjih atomskih plasti, kar daje tej tehniki visoko globinsko ločljivost. Poleg tega mora biti ta svetloba še monokromatizirana, kar pomeni, da ima le določeno valovno dolžino oziroma energijo. V laboratorijih se kot izvir rentgenskih žarkov uporablja magnezijeva ali aluminijeva anoda, ki sevata rentgensko svetlobo pri 1253,6 in 1486,6 eV. Energijska širina Al-črte je 0,85 eV, medtem ko je širina Mg-črte 0,71 eV. Ta širina se izraža tudi v ločljivosti celotnega instrumenta. Lahko jo izboljšamo z uporabo monokromatorja rentgenske svetlobe, s čimer dosežemo, da je širina velikosti 0,3 eV - 0,4 eV.

Izvir rentgenske svetlobe je tudi sinhrotronska svetloba. Nasprotno od navadnih izvirov je tej svetlobi možno zvezno spreminjati energijo. Intenziteta sinhrotronskega žarka je navadno nekaj velikostnih redov večja od intenzitete laboratorijskih izvirov. Energijska ločljivost je za značilne energije, uporabljane pri površinskih raziskavah, reda velikosti 0,1 eV.

Eden bistvenih delov rentgenskega fotoelektronskega spektroskopa je elektronski energijski analizator. Z njim izmerimo energijsko porazdelitev fotoelektronov, izsevanih pri fotoemisiji. V uporabi sta dva tipa analizatorjev: cilindrični zrcalni in hemisferični uklonski analizator. Cilindrični zrcalni ima visoko presevnost, vendar je pri njem možna le enokanalna detekcija. Hemisferični analizator ima manjšo presevnost kot cilindrični. V hemisferičnem analizatorju z elektronsko lečo zberemo in fokusiramo elektrone na vstopni zaslonki energijsko disperzivnega dela, kjer jih nato razklonimo in tako razločimo po njihovi energiji. To omogoča večkanalno detekcijo.

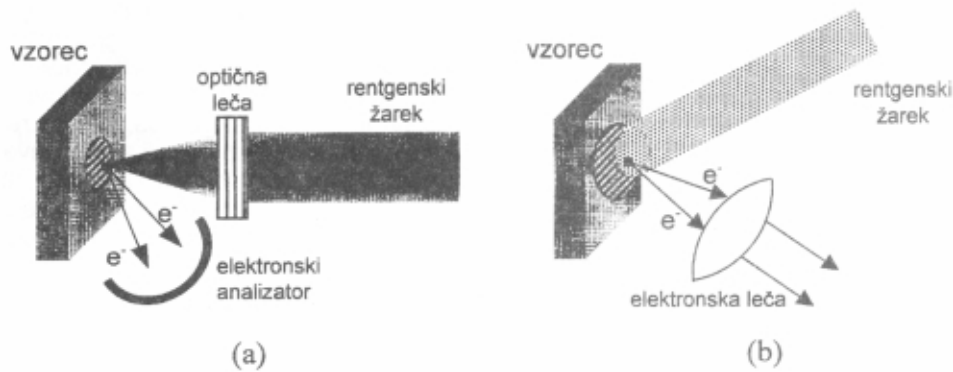
S tehniko XPS preiskujemo vzorce v trdnem stanju. Vzorec, ki ga želimo analizirati, mora biti primeren za vgradnjo v UVV okolje. Mora biti tudi vsaj do neke mere prevoden, da se nadomesti naboj, ki je bil odstranjen z emisijo fotoelektronov, sicer pride do presežka pozitivnega naboja na površini vzorca, kar otežuje ali celo onemogoča meritve.

Vzorec je navadno postavljen na manipulatorju, ki je bolj ali manj zahteven. Z njim opravljamo premike v smeri x, y in z osi in spreminjamo polarni kot θ in azimut ϕ . Včasih je zaželeno tudi spreminjanje temperature vzorca. Ogrevamo ga lahko neposredno z električnim tokom, s stikom z grelcem ali pa posredno z bombardiranjem z elektroni. Hlajenje je navadno izvedeno s pretokom tekočega dušika.

Za pripravo čiste površine vzorca oziroma za pridobivanje informacij po njegovi globini uporabljamo jedkanje z ionsko puško. Pri tem obstreljujemo vzorec z ioni argona, neona ali kakšnega drugega žlahtnega plina kinetične energije do nekaj keV.

4 Izvedbe lateralno visoko ločljive XPS

Po opisu osnov rentgenske fotoelektronske spektroskopije pogledjmo nekaj različnih načinov izvedb lateralno visoko ločljive XPS ali mikro XPS. Na sliki 3 sta prikazana osnovna principa mikroskopske analize. Pri prvem z optičnim elementom fokusiramo žarek rentgenske svetlobe na mikro področje, medtem ko pri drugem povečamo sliko fotoelektronov s preiskovalnega mikro področja /5-7/.



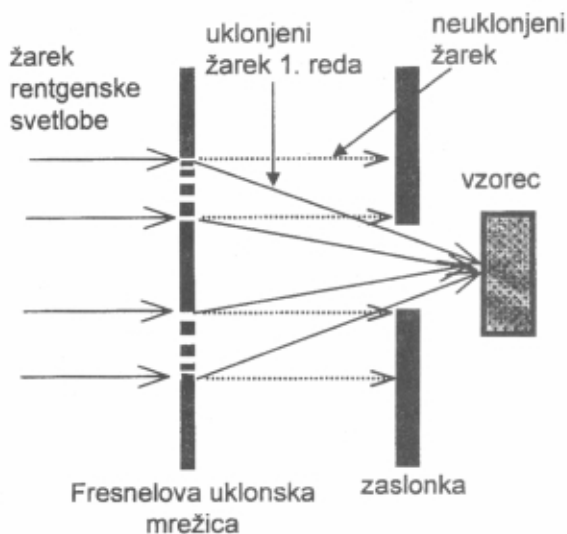
Slika 3. Dva osnovna principa izvedbe tehnike mikro XPS: (a) fokusiranje rentgenskega žarka, (b) povečava mikro področja

4.1 Fokusiranje rentgenskega žarka

Obstaja več načinov, kako fokusirati rentgensko svetlobo, vendar je zaradi njene narave to precej zahtevna naloga. Med seboj se razlikujejo po uporabljenem optičnem pojavu. Lahko je to lom valovanja pri prehodu med optično različnimi sredstvi ali pa uklon na neki pravilni geometrijski strukturi. Optični elementi, ki se uporabljajo za rentgensko svetlobo, se precej razlikujejo od tistih za vidno svetlobo. Razlika temelji na drugačni interakciji rentgenske svetlobe z materialom optičnega elementa. Pri rentgenski svetlobi gre predvsem za zelo močno absorpcijo in majhen lomni količnik. S tem so povezane velike izgube svetlobnega toka žarka in razmeroma velike goriščne razdalje optičnih elementov. Zaradi omenjenih izgub je nujno potrebna uporaba močnih izvirov rentgenske svetlobe.

4.1.1 Fokusiranje rentgenske svetlobe z uklonom

Rentgensko svetlobo lahko fokusiramo z difrakcijskim optičnim elementom, kot je Fresnelova uklonska mrežica (slika 4). Zaradi absorpcije rentgenske svetlobe pri prehodu skozi njen material je ta način fokusiranja omejen le na uporabo sinhrotronske svetlobe z veliko gostoto svetlobnega toka. V rentgenski



Slika 4. Fresnelova uklonska mrežica

mikroskopiji se uporablja mrežica s koncentričnimi kolobarji. Ko pade vzporedni žarek rentgenske svetlobe na pravilno geometrijsko strukturo prepustnih in neprepustnih kolobarjev mrežice, pride do uklona svetlobe. Del žarka se odkloni od geometrijske osi za uklonski kot, ki je odvisen od energije žarka in razdalje med kolobarji. Ta razdalja se proti obodu manjša, kar povečuje uklonski kot za žarke, ki so bolj oddaljeni od optične osi. S pravilno razporeditvijo kolobarjev dosežemo, da se vsi uklonjeni žarki sekajo v eni sami točki, ki je žarišče uklonske mrežice.

4.1.2 Fokusiranje rentgenske svetlobe z odbojem

Za fokusiranje žarka rentgenske svetlobe lahko uporabimo tudi odboj na primerno ukrivljenem zrcalu. Uporaba zrcal pri rentgenski mikroskopiji je povezana s problemom njihove izdelave. Težava je v majhni odbojnosti kovinskih zrcal pri kratkih valovnih dolžinah in v končni hrapavosti površine zrcala, ki pomeni kritično omejitev za doseganje dobrega žarišča. Majhno odbojnost kovinskih zrcal do neke mere izboljšamo z uvedbo večplastnih nanosov. Dosegljiva velikost žarišča je reda od $0,5 \mu\text{m}$ do nekaj deset mm, odvisno od oblike zrcala in valovne dolžine rentgenske svetlobe.

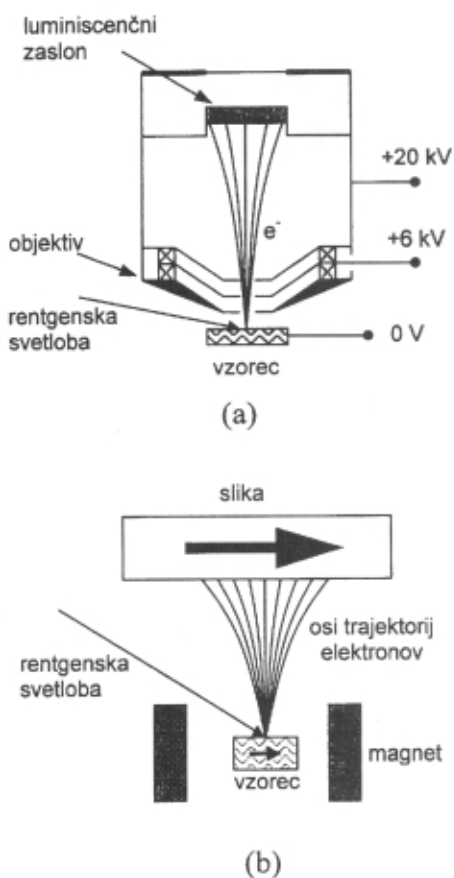
Pri laboratorijskih izvirov rentgenske svetlobe se uporabljajo zrcala tako za fokusiranje kot za monokromatiziranje energije karakteristične črte rentgenske svetlobe, kot sta npr. črta K_{α} magnezijeve ali aluminijeve anode. Učinek odboja svetlobe namreč ni samo v fokusiranju svetlobe, temveč tudi v tem, da dobimo po odboju svetlobo z bolj določeno energijo, kar pri spektroskopiji XPS prispeva k večji energijski ločljivosti. Navadno gre za nekaj kremenovih kristalov, ki zbirajo rentgensko svetlobo, ki prihaja iz anode, obstreljevane z elektronskim curkom, in jo nato usmerijo na preiskovano področje površine vzorca. Če obstreljujemo anodo samo s statičnim elektronskim curkom, dobimo na vzorcu le eno osvetljeno mesto. Takšna je bila izvedba dosedanjih monokromatorjev rentgenske svetlobe, medtem ko novejša izvedba vključuje tudi dodatno rastriranje elektronskega curka po površini anode [8]. Tako se spreminja mesto, kjer nastaja rentgenski žarek. Monokromatorsko zrcalo ga nato preslika na vzorec in tako prenese omenjeno rastriranje curka elektronov v rastriranje rentgenskega žarka po površini vzorca.

4.2 Povečava preiskovanega mikro področja z divergentnim magnetnim in elektrostatičnim poljem

Podobno kot pri fokusiranju rentgenske svetlobe na mikro področje tudi pri povečavi le-tega obstaja več načinov, kako ga povečati. To lahko naredimo z elektrostatičnim lečjem ali pa z divergentnim magnetnim poljem okoli vzorca, tako da močno razklonimo tirnice elektronov, ki izvirajo iz različnih delov opazovanega področja.

Da bi dobili povečavo slike fotoelektronov, namestimo vzorec znotraj divergentnega magnetnega polja, ki ga ustvarimo s tuljavo /9/. Silnice polja divergirajo iz središča tuljave navzven (slika 5(b)). Potrebna gostota magnetnega polja je okoli 7 T, kar dosežemo s tuljavo s supermagnetnim navitjem. Z vzorca emitirani fotoelektroni se gibljejo po spiralah, ki imajo osi vzporedne z divergentnimi silnicami magnetnega polja, dokler ne vstopijo v prostor elektronskega analizatorja. Povečava je podana z razmerjem med jakostjo magnetnega polja na vzorcu in tisto na vhodu v elektronski analizator.

Pri povečavi mikro področja s fotoelektronskim emisijskim mikroskopom (Photoemission Electron Microscope-PEEM) je vzorec postavljen v močno električno pospeševalno polje, ki izvleče izsevane fotoelektrone /10/. Za tem poljem je serija elektronskih elektrostatičnih ali magnetnih leč (slika 5(a)). Na luminiscenčnem zaslonu, ki je na koncu lečja, se projicirajo



Slika 5. (a) Skica fotoelektronskega emisijskega mikroskopa - PEEM. (b) Povečava mikro področja z divergentnim magnetnim poljem

močno razklonjene tirnice elektronov, izvirajoče iz mikro področja. S kamero posnamemo sliko kemične sestave (mikrograf), nastalo na zaslonu. Kontrast na sliki oziroma mikrografu je rezultat večje ali manjše emisije fotoelektronov, ki je lahko zelo občutljiva na lokalne vrednosti izstopnega dela $e\phi$. Ravno te spremembe izstopnega dela so eden najbolj občutljivih pokazateljev dogajanj na površini, kot so različne vrste adsorbiranih atomov, kemične reakcije, površinska difuzija itd. Že ena nepopolna atomska plast adsorbirane plina na površini vzorca prispeva odličen kontrast pri snemanju mikrografa s takšnim mikroskopom. Slabost mikroskopa PEEM je, da ne deluje kot energijski filter. To pomeni, da na zaslonu lahko dobimo prispevek elektronov z vsemi velikostmi kinetične energije, od izstopnega dela $e\phi$ do energije vzbujevalnih fotonov $h\nu$. Njegova prednost pa je, da vse točke slike detektiramo hkrati in je zato snemanje precej hitro.

Na tržišču obstajajo tudi izvedbe hemisferičnih elektronskih energijskih analizatorjev (HSA), ki imajo veliko povečavo /11,12/. Na izhodni ravnini analizatorja tako dobimo prostorsko povečano sliko fotoelektronov samo določene energije s preiskovanega mikro področja. Sliko detektiramo s pozicijsko občutljivim detektorjem, ki je luminiscenčni zaslon z video kamero. Taka izvedba analizatorja daje hkrati energijsko in prostorsko analizo. Prostorska ločljivost omenjenih analizatorjev je nekaj mikrometrov.

4.3 Nekatere značilnosti analize s tehniko mikro XPS

Podobno informacijo o porazdelitvi kemijskih elementov, kot jo daje tehnika mikro XPS, sicer omogočata tudi rastrska Augerjeva mikroskopija (Scanning Auger Microscopy - SAM) in elektronska mikroanaliza (Electron Probe Micro Analysis - EPMA) v povezavi z rastrsko elektronsko mikroskopijo (Scanning Electron Microscopy - SEM). Vendar je prednost tehnike mikro XPS pred drugima dvema, da navadno lahko loči in posname slike različno vezanih kemičnih stanj danega elementa. To je posledica mnogo boljše ločljivosti pri detekciji fotoelektronskih vrhov v primerjavi z ločljivostjo detekcije vrhov rentgenskih žarkov pri elektronski mikroanalizi. Drugi razlog pa je, da so sami vrhovi v fotoelektronskem spektru mnogo bolj občutljivi za različno kemično vezavo, kot pa je to primer za izsevane rentgenske žarke in Augerjeve elektrone pri tehniki SAM.

Pri tehniki mikro XPS se lahko pojavijo težave zaradi visoke gostote energije, zbrane v žarišču, ki lahko povzroči nehomogeno elektrostatično nabijanje površine vzorca. Še posebno se to lahko zgodi pri uporabi rentgenskega žarka sinhrotronskega izvira.

5 Rastrski fotoemisijski mikroskop pri sinhrotronu Elettra

Sinhrotron Elettra, ki deluje od leta 1993 pri vasi Bazovica na Tržaškem Krasu, je zelo močen izvir ultravijolične in mehke rentgenske svetlobe in zato primeren tudi za opravljanje poskusov z rentgensko mikroskopijo /13/. Zaradi zelo velike gostote svetlobnega toka v žarku lahko vanj postavimo optične elemente, kot so zbiralne leče in zrcala. Kljub znatni absorpciji (do 95%)

po prehodu teh elementov ostane za izvedbo poskusov dovolj svetlobe v žarišču.

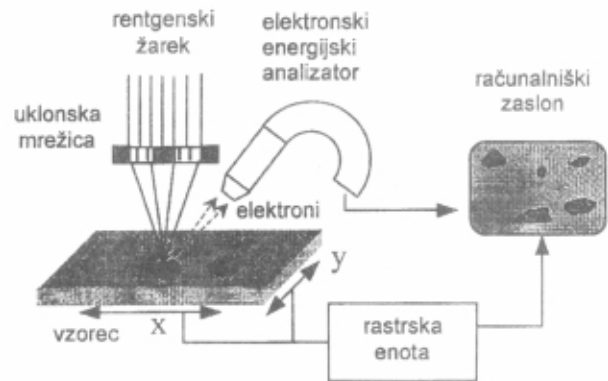
V sinhrotronu Elettra se najprej pospešijo elektroni z linearnim pospeševalnikom do energije 1,5 GeV, nakar se injicirajo v shranjevalni obroč, kjer se nadalje pospešijo do energije 2 GeV, s katero potem krožijo v obroču. Pod vplivom zunanega magnetnega polja v uklonskih magnetih na krivinah shranjevalnega obroča ter v posebnih periodičnih magnetnih strukturah (undulatorjih in viglerjih) nato ti elektroni sevajo sinhrotronsko svetlobo /14/. Ta svetloba je potem speljana iz shranjevalnega obroča v žarkovne linije, kjer se uporablja pri različnih poskusih s področja fizike in kemije trdne snovi, površin, tankih plasti, v znanosti o materialih, molekularni fiziki, mikrobiologiji itd. Na sinhrotronu Elettra uporabljajo rentgensko svetlobo energije od 20 eV do 30 keV. Je zelo monokromatska, polarizirana in lahko ji spreminjamo valovno dolžino oziroma energijo.

Žarkovna linija ESCA Microscopy je bila izgrajena prva od serije linij, namenjenih rentgenski mikroskopiji na Elettri /15/. Namenjena je študiju procesov in reakcij na površinah na submetrskem nivoju. Kot izvir svetlobe uporablja 4,5 m dolg undulator. Pomemben element žarkovne linije je monokromator, sestavljen iz sferične mrežice in dveh zrcal. Na koncu linije je postavljen rastrski fotoemisijski mikroskop (Scanning Photoemission Microscope - SPEM) /16/. Deluje po principu fokusiranja svetlobe z uklonom, tako da gre žarek skozi krožno Fresnelovo uklonsko mrežico, kot je to opisano v razdelku 4.1. Žarišče tega optičnega elementa je podano z naslednjo zvezo:

$$f = \frac{N \cdot D \cdot \delta_r \cdot E}{1,24 \cdot 10^{-7}}, \quad (2)$$

kjer je f goriščna razdalja mrežice, E energija rentgenskega žarka, δ_r razdalja med kolobarji, D premer največjega kolobarja in N red uklonskega maksimuma. Pri uklonu dobimo namreč več redov uklonskih maksimumov, ki se med seboj razlikujejo po gostoti svetlobnega toka in po goriščni razdalji. Ni pripravno delati z več uklonskimi redi hkrati, ker bi imeli več gorišč. Zato je treba za Fresnelovo uklonsko mrežico postaviti zaslonko, ki zadrži vse uklonske maksimume, razen prvega. Sama uklonska mrežica je sistem kovinskih koncentričnih kolobarjev, napršenih na tanki podlagi Si_3N_4 po metodi visoko ločljive elektronske litografije. Goriščna razdalja Fresnelove uklonske mrežice je sicer odvisna od energije vpadnih fotonov v žarku, vendar je premik gorišča majhen in se lahko sorazmerno hitro popravi. Na žarkovni liniji ESCA Microscopy se uporablja rentgenska svetloba v energijskem intervalu od 200 eV do 1000 eV. Premer žarka v žarišču je 150 nm, kar je hkrati lateralna ločljivost tega instrumenta. Pri tem nam v žarišču uspe zbrati okoli 10^9 - 10^{10} fotonov/s.

Drugi del mikroskopa SPEM je rastrski sistem za premikanje vzorca, vrstico za vrstico, ki je podoben sistemu, ki se uporablja pri tunnelskem rastrskem mikroskopu (STM), in hemisferični elektronski energijski analizator za detekcijo izsevanih fotoelektronov (slika 6). Mikroskop je postavljen v UVV-komori in je povezan s predkomorami, kjer so razne druge analitične tehnike, kot npr. LEED, AES, masni spektrometer in orodja za pripravo vzorcev (naparevalniki kovin, puška za ionsko jedkanje).



Slika 6. Skica rastrskega fotoemisijskega mikroskopa - SPEM, postavljenega na žarkovni liniji ESCA Microscopy na sinhrotronu Elettra

5.2 Način zajemanja podatkov pri mikroskopu SPEM

V mikroskopu SPEM s fokusiranim žarkom rentgenske svetlobe osvetlimo mikro področje na površini vzorca. Vzбудitvi znotraj preiskovanega mikro področja sledi detekcija fotoelektronov z elektronskim energijskim analizatorjem. Pri tem lahko opravimo *točkovno analizo* na izbranem mestu, tako da tja fokusiramo žarek in posnamemo celotni energijski spekter izsevanih fotoelektronov. Lahko pa s premikanjem vzorca pod mirujočim žarkom posnamemo prostorsko porazdelitev fotoelektronov z neko energijo. Tako dobljeni posnetek imenujemo *mikrograf* (posnetek kemične sestave površine). Pri tem uglasimo analizator na željeno energijo in detektiramo le elektrone znotraj energijskega okna analizatorja okoli te izbrane energije. Širina okna je določena z energijsko ločljivostjo analizatorja in hkrati določa tudi velikost signala. Navadno si izberemo za srednjo vrednost energije okna energijo enega od fotoelektronskih vrhov v spektru iskanega elementa. Če je neki element na površini v dveh kemičnih stanjih, ki se izražata v dveh vrhovih v spektru, ki ju z analizatorjem še ločimo, potem lahko posnamemo dva mikrografa prostorske porazdelitve obeh kemičnih stanj tega elementa, tako da uglasimo analizator na energiji odgovarajočih vrhov.

6 Primer uporabe tehnike mikro XPS

Fazna meja na stiku polprevodnik/kovina je eden od tehnološko pomembnih, vendar kompleksnih in nehomogenih sistemov, kjer sestava submikrometrskih faz lahko določa vedenje in aplikacijo elektronskih naprav. Med procesom formiranja fazne meje se pojavijo lokalne spremembe v sestavi, ki se kažejo kot različne kemične faze na stiku kovina/polprevodnik in vplivajo na električne lastnosti stika. Ena od takih lastnosti je na primer višina Schottkyjeve bariere stika kovina/polprevodnik. Metoda mikro XPS je zaradi svojih opisanih lastnosti primerna za študij takšnih sistemov. Naslednja primera prikazujeta uporabnost te metode, ki dovoljuje visoko lateralno ločljivo analizo površine in hkrati razlikuje različna kemična stanja površine. V prvem primeru je bila uporabljena sinhrotronska svetloba,

medtem ko je bila v drugem uporabljena svetloba laboratorijske devterijeve svetilke.

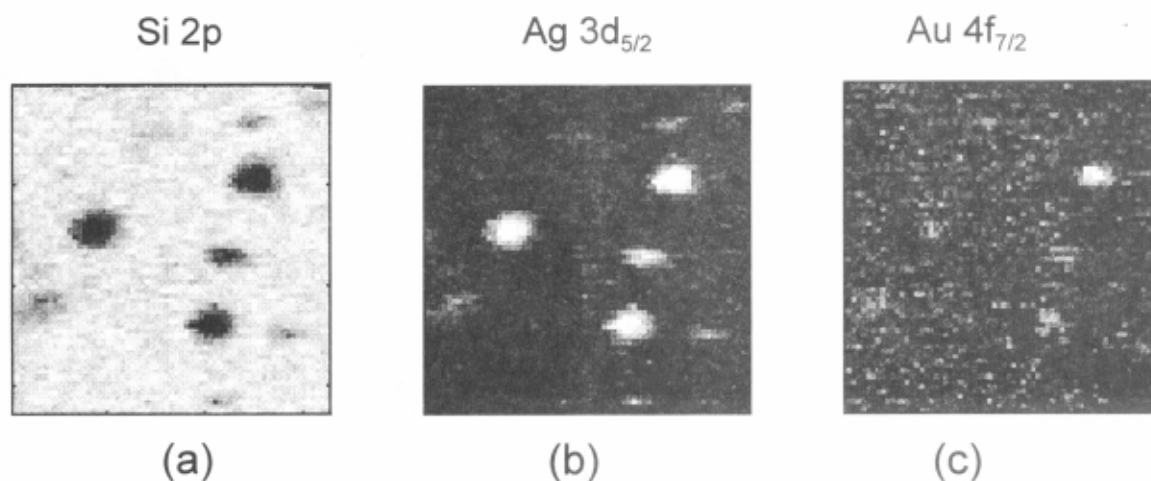
6.1 Primer točkovne analize z mikro XPS in snemanje mikrografa, temperaturni razvoj tanke plasti Ag in Au na Si(111)

Preiskali smo interakcije, ki potekajo na fazni meji med tankim dvokomponentnim kovinskim nanosom in silicijevo polprevodniško podlago. Obravnavali smo sistem Au in Ag na silicijevi površini Si(111) /17,18/. Zanimala nas je reaktivnost in tvorba kovinskih silicidov v navzočnosti dveh kovin na silicijevi podlagi. Za obe kovini je značilen Stransky-Krastanov način rasti v prvih nekaj atomskih plasteh pri zvišani temperaturi.

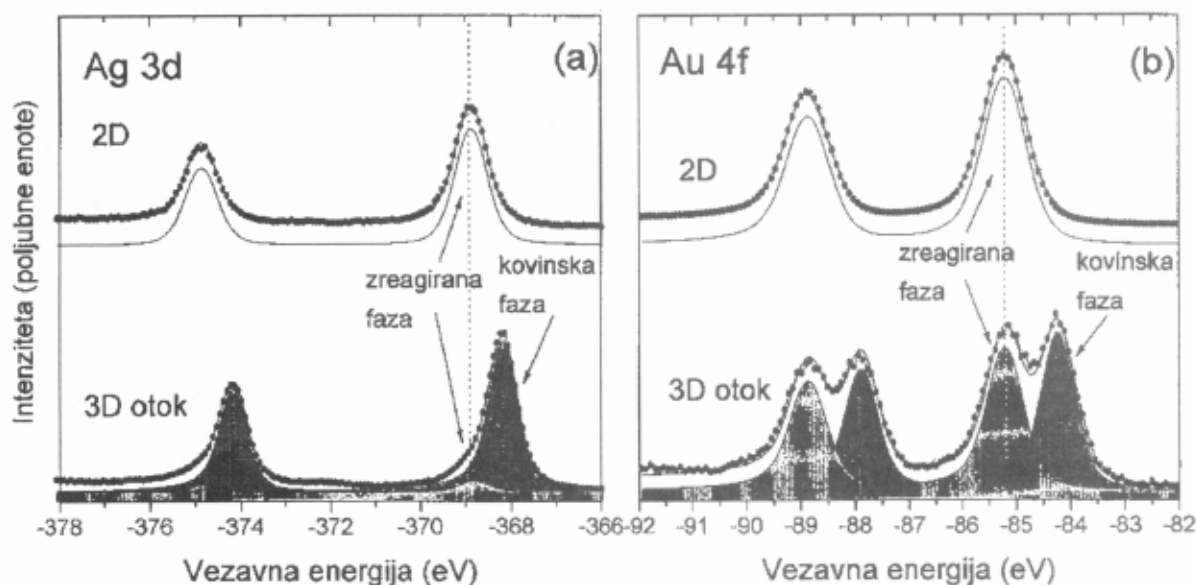
Preiskava je bila narejena s sinhrotronsko svetlobo z energijo 492 eV pospeševalnika Elettra na žarkovni liniji ESCA Microscopy. Uporabili smo način mikroskopije, ki je opisan v poglavju 4.1.1. Žarek rentgenske svetlobe

smo fokusirali na površino vzorca s Fresnelovo uklonsko mrežico. Lateralna ločljivost instrumenta je bila 150 nm.

Na silicijevi podlagi smo najprej pripravili površino Si(111)-(7x7). Nato smo nanjo nanесли 4 atomske plasti (ML) srebra pri sobni temperaturi in segreti nanos na 870 K. Po reakciji smo na površini našli dve fazi, kar je značilno za zgoraj omenjeni način rasti. Prva faza je bila urejena dvodimenzionalna (2D) ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)R30°-Ag/Si faza in je prekrivala večino površine. Drugo so bili tridimenzionalni (3D) otoki srebra z velikostjo približno mikrometer. Po tem koraku smo dodatno nanесли še 2 ML zlata. Po segretju površine s tem novim nanosom na 770 K smo posneli mikrografe s signalom, uglasenim na Au 4f_{7/2}, Ag 3d_{5/2} in Si 2p. Rezultati so prikazani na sliki 7. Kontrast na slikah izraža razliko sestave v 2D- in 3D-fazah zaradi nehomogene razporeditve elementov. 3D-strukture so bogatejše s srebrom kot s silicijem ali zlatom. Na prevladujoči 2D-fazi sta bila oba kovinska elementa in silicij.



Slika 7. Mikrografi razsežnosti 12,8 x 12,8 mm, posneti na površini AuAg/Si po metodi mikro XPS na žarkovni liniji ESCA Microscopy sinhrotrona Elettra po segretju na 770 K. (a) Posnetek, dobljen z nastavitvijo analizatorja na energijo vrha Si 2p, (b) Ag 3d_{5/2} in (c) Au 4f_{7/2}



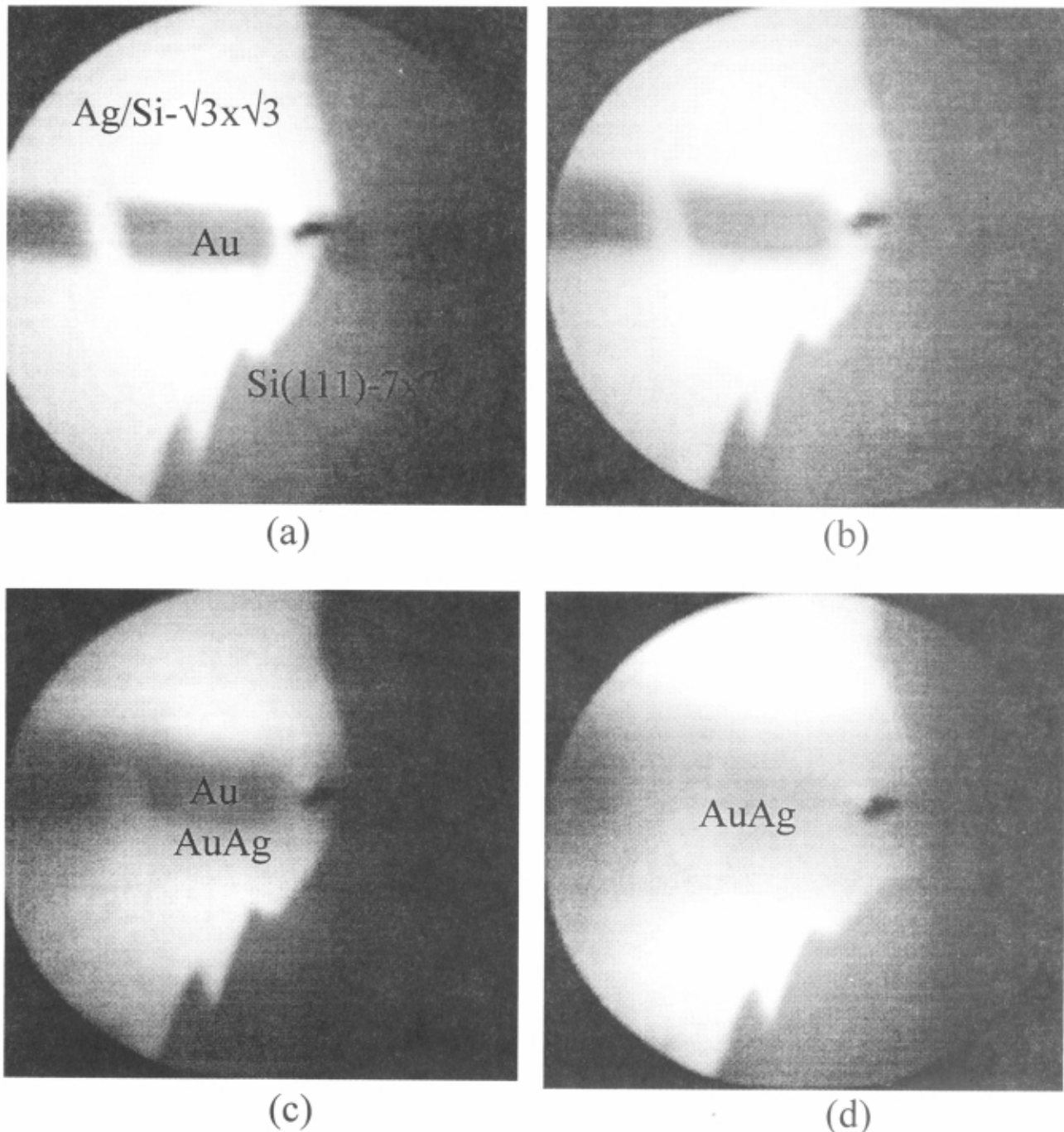
Slika 8. Spektri XPS posneti na 3D- in 2D-fazah na površini AuAg/Si po segretju na 770 K. (a) spektri Ag 3d in (b) Au 4f

Po posnetju mikrografov s slike 7 sta bila s točkovno analizo posneta XPS-spektra srebra Ag 3d in zlata Au 4f enkrat na 3D in drugič na 2D fazi. Spektri so prikazani na sliki 8. Spekter zlata iz 3D-otoka vsebuje dve kemični komponenti (slika 8(b) spodaj). Prva, pri vezavni energiji 84,0 eV, odgovarja kovinski (nezreagirani) fazi zlata, in druga, pri vezavni energiji 85,1 eV, odgovarja silicidni (zreagirani) fazi zlata. To kaže, da je bilo zlato v otokih večinoma nezreagirano, vendar pa so bili otoki prekriti z novo nastalo silicidno plastjo. Spekter Au 4f iz 2D-faze vsebuje samo eno komponento pri 85,1 eV in ima značaj zreagirane faze (slika 8(b) zgoraj). Iz podobnih

spektrov XPS srebra Ag 3d (slika 8(a)) pridemo do sklepa, da atomi obeh kovin tvorijo na 2D-fazi silicidno prevleko ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)R30°-AgAu/Si, medtem ko v 3D otokih ostanejo kot AgAu zlitina.

6.2 Povečava mikro področja z elektrostatičnim lečjem, lateralna difuzija nanosa AuAg na Si(111)

Drugi primer uporabe tehnike mikro XPS je prikazan na sliki 9. Preiskan je bil podoben sistem, kot je opisan v prejšnjem poglavju. Opazovali smo lateralno difuzijo na



Slika 9. Lateralna difuzija nanosa Au na ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Ag/Si v odvisnosti od temperature. Posnetki površinskih faz, dobljeni z instrumentom PEEM so veliki $550 \times 550 \text{ nm}^2$. Na površino Si (111)-(7x7) (temno področje na desni strani slik) je bilo najprej nanoseno srebro (svetlejša področja na levi strani). Po reakciji je bilo na srebro nanoseno še zlato v obliki pravokotnih področij (a) ($65 \times 150 \text{ nm}^2$, temnejši odtonek). Nato je bil vzorec ogrevan na: (b) 630 K, (c) 750 K in (d) 800 K.

fazni meji med dvokomponentnim kovinskim nanosom in silicijevo podlago pri različnih temperaturah /19/. Lateralni temperaturni razvoj fazne meje je bil analiziran s fotoelektronskim emisijskim mikroskopom (PEEM instrumentom). Izvedba tega instrumenta je opisana v poglavju 4.2.

Vzorec je bil pripravljen tako, da smo na površino Si (111)-(7x7) (temno področje na desni strani slik 9) najprej skozi zaslonko omejeno nanесли srebro. Po reakciji med srebrom in silicijem pri temperaturi 650 K se je srebro razlezlo (razmazano svetlejšje področje na levi strani slik 9) in nastala je 2D faza s strukturo površine ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Ag/Si. Nanjo je bilo naneseo še zlato v obliki omejenih pravokotnih področij (65 x 150 nm², temnejši odtенок pravokotne oblike na sliki 9(a)). Nato smo ta vzorec segrevali na 650 K, 750 K in 800 K. Opazovali smo lateralno difuzijo zlata ter reakcije med zlatom, srebrom in silicijem. Prišlo je do tvorbe mešane enoatomske plasti srebra in zlata, ki je reagirala s silicijevo podlago.

Kot je bilo omenjeno v poglavju 4.2 pri različnih izvedbah tehnik mikro XPS, dobimo pri instrumentu PEEM v vsakem trenutku celotni posnetek mikrografa, medtem ko pri točkovni analizi šele sestavimo mikrograf s premikanjem vzorca v žarišču rentgen-skega žarka (slika 7). Uporabili smo instrument PEEM proizvajalca "Steib Instrumente", kjer smo posnetke snemali z video kamero v realnem času. Za vzbuditev fotoelektronske emisije smo uporabili svetlobo devterijeve svetilke z močjo 30 W. Svetilka je bila postavljena zunaj vakuumске analitične komore. Kremenovo okno je prepuščalo svetlobo te svetilke, ki je imela energijo med 3,3 in 6,7 eV. Vzbujanje s svetlobo teh energij je dovoljevalo le emisijo fotoelektronov s prevodnega pasu okoli Fermijeve energije. Vendar pa je to že zadostovalo za posnetek mikrografa. Kontrast med elementi dobimo namreč zaradi različne emisije fotoelektronov iz valenčnega pasu, ki je posledica različnega izstopnega dela različnih elementov.

7 Sklep

Potreba po karakterizaciji mikroskopskih pojavov na površinah, ob faznih mejah in v tankih plasteh je pripeljala do različnih izvedb visoko lateralno ločljive tehnike XPS. Ta se je že v preteklosti izkazala za zelo primerno pri študiju omenjenih pojavov, vendar ni imela primerne lateralne ločljivosti. V prispevku je opisanih nekaj izvedb, kjer fokusiramo žarek rentgenske svet-

lobe oziroma povečamo sliko fotoelektronov iz preiskovanega področja. Oba načina imata nekatere prednosti in slabosti, kot npr. hitrost zbiranja podatkov, zmanjšanje signala zaradi absorpcije, zapletenost instrumenta, kar vse je treba upoštevati pri izvedbi poskusov. Vsekakor je skupna značilnost pri vseh teh izvedbah potreba po čim močnejšem izvira monokromatizirane rentgenske svetlobe. Eden od takšnih izvirov je tudi tržaški sinhrotron Elettra, kjer je postavljen mikroskop SPEM, ki smo ga ravno tako opisali v tem prispevku.

Literatura

- /1/ K. Siegbahn, Prix Nobel, 1981, 114; Science, 217, 1982, 1117
- /2/ D. Briggs, M. P. Seah (urednika), Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy, John Wiley & Sons, Chichester, New York, 1990
- /3/ H. Luth, Surfaces and Interfaces of Solid Materials, 3. izdaja, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1995, 115-121
- /4/ I. Milošev, Vakuunist, 14, 1994, 2, 8
- /5/ B. P. Tonner, D. Dunham, T. Droubay, J. Kikuma, J. Denlinger, E. Rotenberg, A. Warwick, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 75, 1995, 309
- /6/ N. Gurker, M. F. Ebel, H. Hedrich, G. Giefing, Surf. Interface Anal. 14, 1989, 163
- /7/ C. Coluzza, R. Moberg, Surface Review and Letters, 2, 1995, 619
- /8/ Prodajni prospekt firme Physical Electronics, Inc., Quantum 2000, 1995
- /9/ P. Pianetta, P. L. King, A. Borg, C. Kim, I. Lindau, G. Knapp, M. Keenlyside, R. Browning, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 52, 1990, 797
- /10/ W. Engel, Ultramicroscopy 36, 1991, 148
- /11/ P. Coxon, J. Krizek, M. Humpherson, I. R. M. Wardell, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 52, 1990, 821
- /12/ N. Martensson, P. Baltzer, P. A. Bruhwiler, J. O. Forsell, A. Nilsson, A. Stenborg, B. Wannberg, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 70, 1994, 117
- /13/ M. Pleško, Informacije MIDEM, 4, 1995, 280
- /14/ M. Mozetič, Vakuunist, 4, 1993, 9
- /15/ L. Casalis, W. Yark, M. Kiskinova, P. Melpignano, D. Morris, R. Rosei, A. Savoia et al, Rev. Sci. Instr. 66, 1995, 4870
- /16/ M. Marsi, L. Casalis, L. Gregoratti, S. Günther, A. Kolmakov, J. Kovač, D. Lonza and M. Kiskinova, J. Electr. Spectr. and Rel. Phenom. 84, 1996, 73
- /17/ J. Kovač, A. Kolmakov, S. Guenther, L. Casalis, L. Gregoratti, M. Marsi, M. Kiskinova, 16th European Conference on Surface Science, Genova, Italy, 9.-13. 1996
- /18/ S. Gunther, A. Kolmakov, J. Kovač, M. Marsi, M. Kiskinova, Phys. Rev. B, 56, 1997, 5003
- /19/ A. Kolmakov, M. Bertolo, S. Fontana, S. Günther, J. Kovač, M. Marsi and M. Kiskinova, Surf. Sci. 377/379, 1997, 969

SUPERTRDE ZAŠČITNE PREVLEKE

Peter Panjan, Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1001 Ljubljana, Slovenija

Superhard coatings

ABSTRACT

Superhard coatings are those with hardness above 4000 Vickers. Very few candidates do exist, i.e. those which form pure or nearly pure covalent bonds. Only certain compounds that consist of boron, carbon, nitrogen and silicon can form such strong bonds. High hardness of an ideal system (monocrystal without defects) is related to a high value of the bulk modulus. Thus, a high valence charge density (high bond energy) along the tetrahedral bond (sp^3), short bond distance and low polarisation (ionicity) along such a bond are necessary for a high value of the bulk modulus and hardness. However, hardness of real materials is a complex property, which contains both elastic and plastic deformation. Therefore, hardness strongly depends on the microstructure of materials. To improve the hardness of materials we must inhibit the usual mechanisms leading to the fracture of crystalline and amorphous materials.

Ten years ago, only very few candidates for superhard coatings existed, like diamond, cubic boron nitride and boron carbide coatings. Nowadays, the number of superhard coatings is fast increasing and hardness of some of them (coatings in the form of superlattices and nanocrystalline composite) are close to that of diamond.

POVZETEK

Supertrde prevleke so tiste, katerih trdota je višja od 4000 vickersov. Obstaja le nekaj takšnih materialov, za katere je značilno, da imajo čiste ali skoraj čiste kovalentne vezi. Samo spojine določenih elementov, kot so ogljik, bor, dušik in silicij, lahko oblikujejo tako močne kemijske vezi. Velika trdota idealnega sistema (mono-kristala brez napak) je posledica velike vrednosti modula volumnske stisljivosti. Velika gostota valenčnih elektronov vzdolž tetraederskih vezi (velika vezavna energija kristala), kratke vezi in majhna polarizacija vezi, so potreben pogoj za veliko vrednost modula volumnske stisljivosti oz. trdote materiala. Trdota realnih materialov pa je v veliki meri odvisna od mikrostrukture, ki določa elastično in plastično deformacijo le-teh. Če hočemo povečati trdoto materialov, potem se moramo izogniti vsem tistim mehanizmom, ki sodelujejo pri plastični deformaciji materiala in nastajanju razpok v kristaliničnih in amorfni materialih.

Pred desetimi leti smo poznali le nekaj materialov (diamant, kubični borov nitrid in karbid), ki so bili primerni za pripravo supertrdih prevlek. Danes število supertrdih prevlek narašča in trdota nekaterih od njih (prevlek na osnovi superstruktur in nanokristaliničnih kompozitov) je zelo blizu trdoti diamanta.

1 Uvod

Različni postopki utrjevanja površin jekel se v industrijski praksi uporabljajo že več stoletij. Klasični postopki utrjevanja površin jekel so difuzijski (cementiranje, nitriranje), kemijski (fosfatiranje, bruniranje), elektro-kemijski in kemijski (trdo kromanje, eloksiranje) itd. Novejši postopki utrjevanja površin jekel pa so plazemsko nitriranje, vakuumski (fizikalni) postopki (PVD) nanašanja trdih zaščitnih prevlek in modifikacija površin z ioni oz. laserjem.

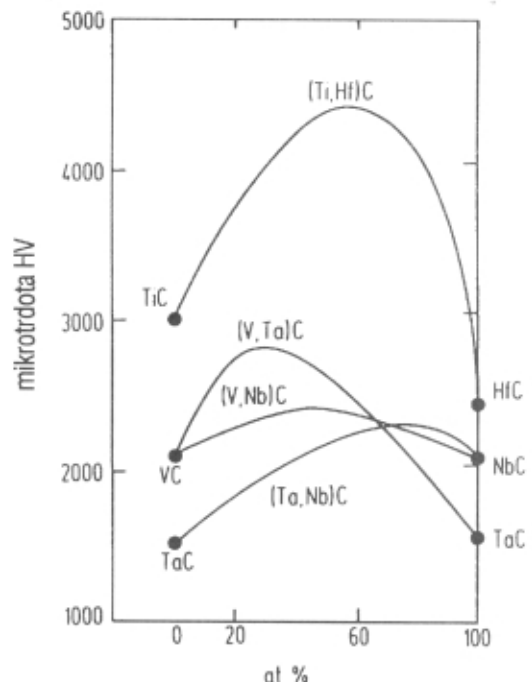
V praksi so se v zadnjih dveh desetletjih najbolj uveljavili postopki zaščite orodij s keramičnimi prevlekami na osnovi **binarnih nitridov prehodnih kovin** (TiN, CrN).

Trdoto prevlek na osnovi nitridov in karbidov prehodnih kovin lahko bistveno izboljšamo z delno substitucijo kovinskih ali nekovinskih atomov. Ker kristalizirajo v podobni kristalni strukturi (fcc) in ker imajo podobne

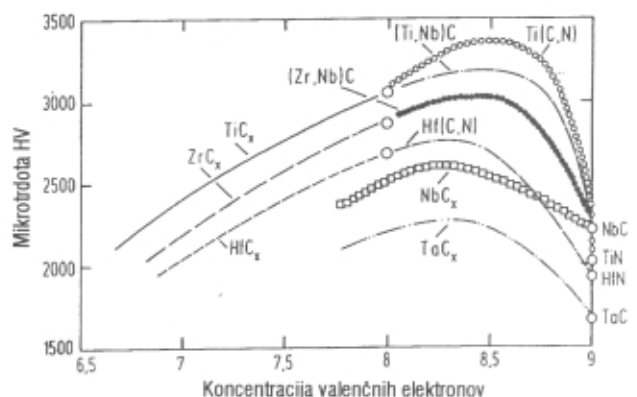
atomske radije, lahko atomi prehodnih kovin oblikujejo najrazličnejše **večkomponentne trde raztopine**. Dodatek atomov z drugačno valenco in različnimi atomskimi radiji v splošnem poveča trdoto prevlek iz binarnih spojin (sl.1,2) /1, 2/. Meritve so pokazale, da je trdota največja, če je gostota valenčnih elektronov med 8 in 8,5 (slika 2).

Od večkomponentnih trdih prevlek se komercialno uporabljajo Ti(C,N), (Ti,Zr)N in (Ti,Al)N. V fazi raziskav pa so še: (Cr,Ti)N, MeAlCrN (Me=Ti, Fe, Co, Ni), (Ti,V)N, (Ti,Hf)N.

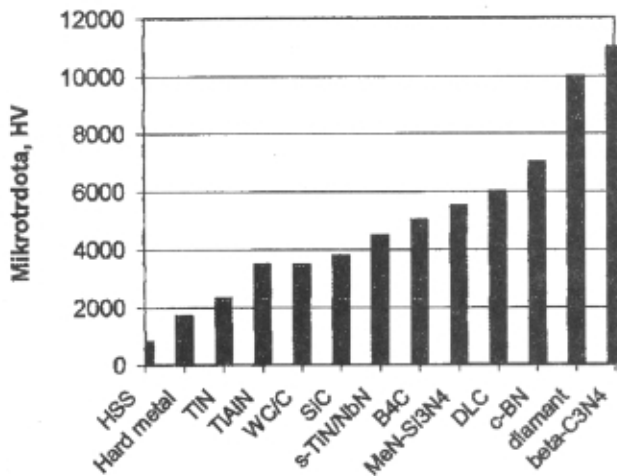
Razvoj trdih zaščitnih prevlek gre v zadnjih letih v smeri priprave supertrdih prevlek /4,5/. Supertrde prevleke so tiste, katerih trdota je višja od 4000 vickersov (slika 3). Najbolj znane takšne prevleke so tiste na osnovi



Slika 1 Mikrotrdota binarnih in mešanih karbidov /1/



Slika 2 Trdota mešanih karbidov v odvisnosti od koncentracije valenčnih elektronov /1/



Slika 3 Mikrotrdota supertrdih prevlek. Za primerjavo so prikazane trdote hitroreznega jekla in prevlek nekaterih binarnih nitridov.

diamanta, ki velja za najtrši material /3,5-9/. Čeprav je Moissanu že konec prejšnjega stoletja uspelo sintetizirati diamant, je do prave proizvodnje prišlo šele po letu 1954, ko je družba General Electric patentirala industrijski postopek pridobivanja diamantov. Danes je obseg proizvodnje tega pomembnega brusilnega materiala več sto ton na leto. Vzporedno je tekel tudi razvoj **diamantnih tankih plasti**. Danes se v praksi uporabljajo diamantne prevleke, ki jih pripravimo s kemijskim nanašanjem iz parne faze (CVD), diamantu podobne prevleke (DLC), ki jih pripravimo z vakuumskimi postopki nanašanja (PVD), diamantne prevleke v kovinski matrici (npr. WC/C) in diamantne prevleke, dopirane z dušikom (C₃N₄) /10/.

Diamantnim prevlekam so podobne tiste na osnovi **kubičnega bor nitrida** (c-BN), ki ima podobno strukturo kot diamant /3,6,8/.

Preučevanje fizikalnih osnov trdote snovi je raziskovalce pripeljalo do ugotovitve, da bi bilo mogoče pripraviti zelo trde prevleke tudi na osnovi kompozitov v obliki nanokristalov nitridov prehodnih kovin z vezivom iz amorfne Si₃N₄ (nc-MeN/a-Si₃N₄). Mehaničnim, ki omogoči utrditev snovi, bomo opisali v naslednjem poglavju /11,12/.

Zelo trde prevleke so tudi tiste na osnovi periodičnih ali neperiodičnih večplastnih struktur in superstruktur (npr. TiN/TiAlN) /13-14/. Če je modulacijska perioda (vsota debelin posameznih plasti) manjša od 10 nm, je vpliv stičnih površin na fizikalne lastnosti snovi odločilen (govorimo o superstrukturah). Periodičnost takšne strukture in kratke razdalje med posameznimi plastmi prinašajo celo vrsto novih fizikalnih lastnosti. Meje med plastmi preprečujejo gibanje dislokacij, elastične napetosti na mejah pa onemogočajo delovanje dislokacijskih izvirov. Oba pojava pa povečata trdoto takšne strukture.

2 Fizikalna razlaga trdote snovi

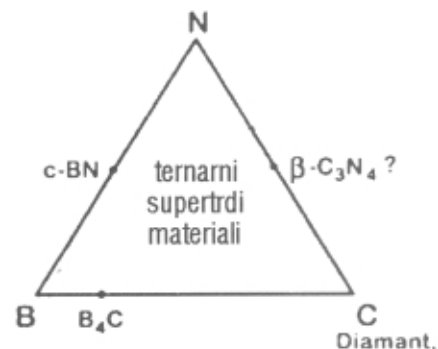
Čeprav se nam zdi pojem trdote materialov nekaj samoumevnega, pa fizikalna definicija le-te ni enostavna. Trdota je namreč kompleksna lastnost trdnih

snovi. Pravimo, da je snov tembolj trda, čimbolj je odporna na elastično in plastično deformacijo. Na tak način trdoto tudi merimo. Z diamantno konico izbrane oblike (piramida s kvadratno osnovno ploskvijo in kotom med stranskima ploskvama 136° v primeru metode po Vickersu) naredimo odtis v material. Iz izmerjene diagonale odtisa in obtežitve izračunamo trdoto, npr. po Vickersu: $HV = 2(F/d^2) \cos 22^\circ$. Tako izmerjena trdota orodnih jekel je približno 800 HV, keramične prevleke TiN 2300 HV, TiAlN 3500 HV, kubičnega bor nitrida 6500 HV diamanta pa 10000 HV (slika 3). O supertrdih materialih oz. prevlekah govorimo, kadar je njihova trdota po Vickersu več kot 4000 HV.

Trdota je v veliki meri določena z naravo kemijskih vezi. Za idealen sistem, t.j. monokristal brez napak, je trdota direktno povezana z modulom volumske stisljivosti B, ki je po definiciji enak drugemu odvodu vezavne energije kristala: $B = Vdp/dV = Vd^2W/dV^2$, $T=0$, kjer je dW sprememba energije kristala, če se spremeni njegova prostornina za dV. Za ionske kristale in kovine lahko modul stisljivosti eksaktno izračunamo, za kristale s kovalentno vezjo pa obstaja le semiempirični model. Modul volumske stisljivosti je tem večji, čim večja je gostota valenčnih elektronov vzdolž tetraederskih vezi (velika vezavna energija kristala), čim krajše so vezi in čim manjša je polarizacija vezi. Velik modul stisljivosti pa pomeni veliko trdoto materiala. Očitno je, da so najtrši tisti materiali, ki imajo kovalentne vezi. Obstaja le nekaj materialov, za katere je značilno, da imajo čiste ali skoraj čiste kovalentne vezi. Takšni materiali so spojine samo določenih elementov, kot so ogljik, bor, dušik in silicij (slika 4).

Najtrši so torej materiali, ki imajo kovalentne vezi. Čim večji je delež ionskih vezi, manjša je trdota. Tako npr. trdota treh titanovih spojin: TiO₂, TiN in TiC, ki vse kristalizirajo v ploskovno centrirani kubični strukturi, narašča v isti smeri kot delež kovalentne vezi med kovinskimi in nekovinskimi atomi.

Na trdoto monokristalov z napakami in polikristalnih materialov pa odločilno vplivajo mikrostrukturne lastnosti. Povedali smo že, da je trdota materiala definirana kot odpornost materiala na elastično in plastično deformacijo. Če hočemo povečati trdoto materialov, potem se moramo izogniti vsem tistim mehanizmom, ki sodelujejo pri plastični deformaciji materiala in nastajanju razpok. To pomeni, da moramo zavreti delovanje dislokacijskih izvirov in zmanjšati gibljivost dislokacij. V nadaljevanju bomo podrobneje opisali postopke, s katerimi lahko to naredimo.



Slika 4 Supertrdi materiali na osnovi bora, ogljika in dušika

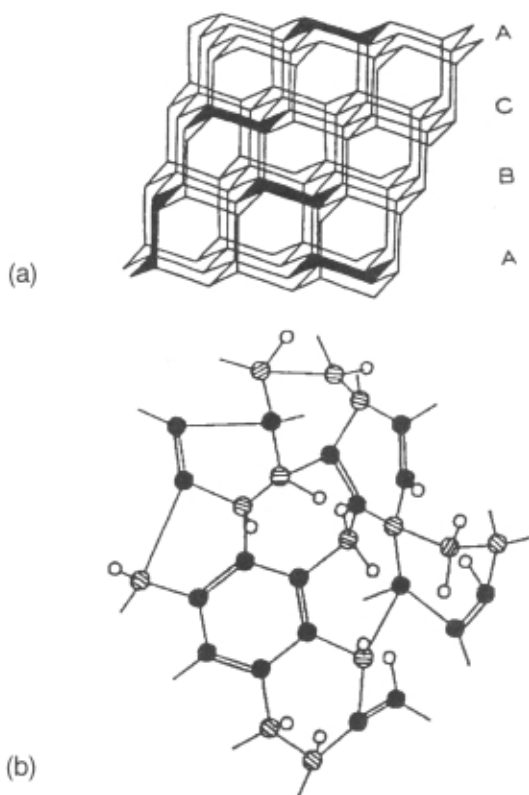
3 Supertrde prevleke

a) Diamantne prevleke, narejene s kemijskim nanašanjem iz parne faze (CVD)

V diamantu, ki je najtrši material, obstajajo čiste kovalentne vezi. Prost ogljikov atom ima $2s^2 2p^2$ konfiguracijo zunanjih orbital, ki v kristalu hibridizirajo v sp^3 . To pomeni, da štirje valenčni elektroni vsakega od atomov oblikujejo z elektroni sosednjih atomov štiri močne in lokalizirane vezi σ . Dolžina teh vezi je 0,154 nm. Tetragonalna konfiguracija kristala zagotavlja veliko gostoto in velik modul elastičnosti. Samo štirje elementi: bor, ogljik, dušik in silicij, lahko oblikujejo takšne močne vezi σ (sp^3). Kakor hitro pa nastanejo π vezi (sp^2 hibridizacija), dobimo mehek material, npr. grafit.

Že več kot 40 let lahko masiven diamant sintetiziramo iz grafita le pri visoki temperaturi ($\sim 2000^\circ\text{C}$) in ekstremno visokem pritisku (5300 MPa). V začetku osemdesetih let pa so bili razviti različni CVD-postopki priprave diamantnih prevlek iz plinske faze pri nizkih tlakih. Razvoj na tem področju je od tedaj izjemno intenziven in raziskovalci objavijo vsako leto več kot tisoč publikacij.

Prve diamantne plasti je leta 1956 pripravil Schellenmaier, ko je opazoval razelektritev v ogljikovodikovi atmosferi. 15 let pozneje pa sta Aisenberg in Chabot pripravila diamantne prevleke med opazovanjem električnega loka med ogljikovima elektrodama. Danes je osnovni princip priprave diamantnih prevlek naslednji.



Slika 5 a) Diamantna struktura, b) dvodimenzionalna predstavitev predlagane strukture za diamantu podobne prevleke (a-C:H) (šrafirani krožci ogljikovi atomi s sp^3 vezmi, polni krožci ogljikovi atomi s sp^2 vezmi, prazni krožci pa vodikovi atomi)

Uporabimo mešanico vodika in približno 1% ogljikovodikov (metan ali acetilen), v nekaterih primerih dodamo tudi kisik. Tlak plinske mešanice je od 1 do 1000 mbara, temperatura podlag pa je med 650 in 1200°C . Zaradi visoke temperature nanašanja lahko za podlage uporabimo le orodja iz karbine trdine in silicij nitrdne keramike. Nanos diamantnih prevlek je možen tudi pri temperaturi pod 650°C , vendar je hitrost nanašanja premajhna ($<0,1 \mu\text{m/h}$), da bi bil nanos ekonomsko sprejemljiv. Ogljikovodiki se razcepijo na reaktivne radikale ali molekule, iz katerih se na vročih podlagah izloča diamant in druge modifikacije ogljika (grafit, amorfni ogljik). Molekule vodika disociiramo bodisi termično z vročo nitko, katodnim lokom, ali pa z mikrovalovno, enosmerno ali RF plazmo. Osnovni pogoj je, da metoda aktivacije plinske mešanice zagotovi zadostno koncentracijo atomarnega vodika (in/ali kisika oz. atomov halogenidov) in ogljikovodikovih radikalov. Disociiran vodik se veže z grafitom in amorfnim ogljikom nazaj v plinaste ogljikovodike. Ker atomski vodik ne reagira z diamantom, mu na ta način omogoči nemoteno rast. Podoben učinek kot ga ima atomarni vodik, ima tudi kisik.

Pri nanosu CVD-diamantnih prevlek na orodja se pojavita dva problema: a) difuzija atomov iz podlage (npr. kobalta v primeru karbidnih trdin) v diamantno plast in difuzija ogljika v podlago, b) napetosti in slaba adhezija. Oba problema lahko v veliki meri rešimo, če površino podlag predhodno obdelamo. To naredimo tako, da npr. podlago iz karbidne trdine prekrijemo s prahom bora ali silicija in jo 24 ur segrevamo na temperaturi 700°C . Kobalt iz karbidne trdine pri tem tvori stabilne kobaltove boride in silicide, ki potem zmanjšajo gibljivost kobaltovih atomov in tako zmanjšajo topnost ogljika. Delež kobalta v karbidni trdini mora biti pod 6 at%.

CVD-diamantne plasti so polikristalinične in hrapavost površine je primerljiva z velikostjo kristalnih zrn, ki imajo v splošnem premer nekaj mikrometrov. Površino prekritih orodij moramo zato spolirati, kar pa je zamudno in zato drago opravilo.

Diamantne prevleke sev manjšem obsegu uporabljajo za zaščito orodij šele zadnjih nekaj let /15-17/. Odlikujejo se z najvišjo znano trdoto, veliko termično prevodnostjo, veliko električno upornostjo, majhnim koeficientom trenja (primerljiv je s teflonom), izjemno kemijsko stabilnostjo do večine snovi razen železa in optično presojnostjo (od 225 nm do daljnega IR področja).

Diamantne prevleke se uporabljajo za zaščito orodij v primerih, ko imamo opraviti z močno abrazijsko obrabo (npr. pri rezanju močno abrazijske zlitine Al-Si). Diamant je tudi odporen proti skoraj vsem kislina. Rezilna orodja, prekrita z diamantno prevleko, so idealna za obdelavo nefiritnih kovinskih materialov (kot so npr. aluminijeve in bakrove zlitine) ter nekovinskih materialov (npr. les, papir, umetne mase, utrjene s steklenimi vlakni, keramika, bakelit). Nanos diamantnih prevlek CVD na rezilna orodja iz karbidne trdine ponujajo v Evropi številna podjetja, med njimi Balzers, CemeCon, Güring, Plansee in Sandvik.

b) Diamantu podobne prevleke (DLC)

Poleg kristaliničnih diamantnih prevlek obstaja tudi veliko število **diamantu podobnih prevlek** (diamond

like carbon - DLC) /7,8,18/. Pripravimo jih pri relativno nizkih temperaturah z različnimi vakuumskimi (PVD) ali kemijskimi postopki v plazmi (PACVD). Nasprotno od diamantnih prevlek CVD imajo prevleke DLC amorfno strukturo (a-C). Ker potekajo postopki nanašanja pri nizki temperaturi, se v prevleko vgradi veliko vodika (od nekaj at% do 50 at%). Količina le-tega je odvisna od postopka priprave. Vodik med drugim preprečuje razpad diamantne strukture v grafitno ter poveča električno upornost. Naravo in lastnosti DLC prevlek lahko spreminjamo z dopanti (npr. silicij, fluor, dušik in različne kovine) /18/.

Najbolj uveljavljeni postopki priprave diamantu podobnih prevlek so: a) polimerizacija plinastih ogljikovodikov v plazmi, b) nanašanje z ionskim curkom in c) nanašanje z dvojnim curkom.

V vseh primerih priprave diamantu podobnih prevlek so navzoči ioni z energijo najmanj 100eV. Nekateri raziskovalci zato takšne prevleke označujejo z »i-C«. Ion, ki prileti v stabilno in amorfno plast diamanta, prodre nekaj atomskih plasti globoko. Njegova energija se po eni strani porabi za zgostitev snovi, kar povzroči nezaželene notranje napetosti, po drugi strani pa se na tak način del vezi sp^2 pretvori v vezi sp^3 , ki omogočajo rast diamantne plasti. Optimalna energija ionov je 100 eV.

Tako kot diamantne prevleke tudi DLC uporabljamo za zaščito orodij pred obrabo. Ker imajo majhen koeficient trenja, so zanimive kot samomazivne prevleke pri številnih strojnih delih (npr. zaščita trdega diska v računalniku).

c) Prevleke WC/C

Velika ovira pri uporabi prevlek DLC je njihova slaba oprijemljivost na različne podlage zaradi velikih notranjih napetosti. Vzrok velikih napetosti je ionsko obstrlejevanje plasti med njeno rastjo. Napetostim se v veliki meri izognemo, če na podlago najprej nanesemo tanko plast kake trde kovine (npr. Cr, Mo, W) ter postopoma dodajamo ogljik in zmanjšujemo odstotek kovine. Tako naredimo zvezen prehod iz kovinske v diamantno plast, kar izboljša oprijemljivost in ublaži razlike v razteznostnih koeficientih. Prevlekam DLC za zaščito orodij pred obrabo najpogostje dodajamo volfram (WC/C), kadar pa jih uporabimo v dekorativne namene jim dodajamo titan. Prevleka WC/C vsebuje do 30% kovine in je praviloma večplastna. Najprej nanesemo tanko plast kroma, ki deluje kot adhezijska plast, nato sledi nanos plasti WC ter plast DLC z volframom.

d) Diamantne plasti, dopirane z dušikom (C₃N₄ - prevleke)

Leta 1990 sta Liu in Cohen objavila rezultate računov modula volumske stisljivosti B za kovalentne trde snovi, ki je bil v naslednji zvezi z dolžino vezi d in parametrom λ , ki meri delež ionskih vezi /10/:

$$B = (19,71 - 2,20\lambda)/d^{3,5}.$$

Izračunala sta strukturne lastnosti in gostoto elektronskih stanj za hipotetično spojino β -C₃N₄, ki naj bi imela podobno kristalno strukturo kot dobro znana spojina β -Si₃N₄. Izračunala sta, da je dolžina vezi C-N

0,147 nm, iz gostote valenčnih elektronov vzdolž vezi C-N pa sta izračunala, da je parameter λ enak 1/2 (to pomeni, da je težišče gostote naboja premaknjeno k dušikovim atomom). Modul volumske stisljivosti, ki sta ga na osnovi teh podatkov izračunala, je bil 4,83 MPa, kar je bistveno večja vrednost od tiste za diamant, ki je 4,35 MPa.

V zadnjih letih so si številni raziskovalci prizadevali pripraviti in identificirati takšno spojino /19-21/. Preizkusili so različne postopke priprave, npr. pirolizo organskih spojin z veliko vsebnostjo dušika pri visokih temperaturah in pritiskih ter PVD-metode, kot npr. RF-razprševanje grafitne tarče v dušikovi atmosferi. Vendar dosedanj rezultati raziskav še ne potrjujejo dovolj zanesljivo obstoja takšne metastabilne faze v amorfni ali kristalinični obliki.

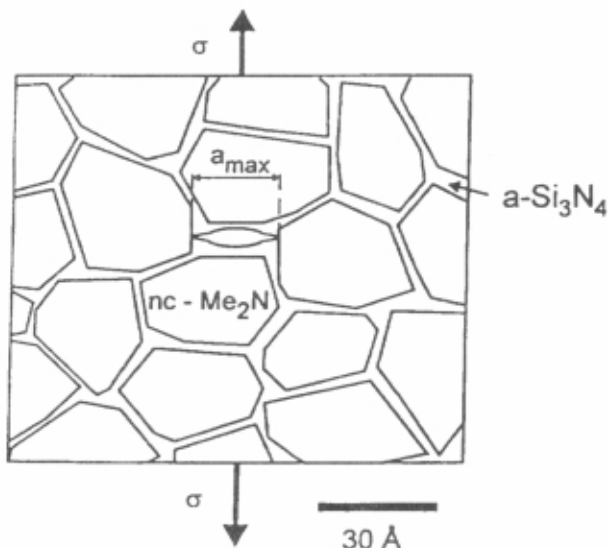
e) Prevleke na osnovi kubičnega bor nitrida (c-BN)

Podobne vezi oz. strukture kot diamant oblikujejo tudi kubični borov nitrid in silicijev karbid. Nanos prevlek c-BN poteka na podoben način kot nanos diamantnih prevlek. Kot izhodne snovi lahko uporabimo eno izmed borovih plinastih spojin (npr. boran, BCl₃) in dušik ali amoniak. Sinteza c-BN je možna le ob učinkoviti aktivaciji molekul v plazmi. Sinteza c-BN je lažja, če za izhodno snov uporabimo katero od kovino-organskih spojin (npr. borazin - B₃N₃H₃Cl₃), kjer je razmerje med borom in dušikom 1:1. Tako kot pri prevlekah DLC se tudi pri njih kažejo podobni pojavi, kot npr. visoke notranje napetosti, ki povzročajo gubanje in luščenje plasti. Prevleke kubičnega bor nitrida so oksidacijsko obstojne do temperature 1400°C (diamantne le do 600°C), in z železom, nasprotno od diamanta, ne tvorijo karbidov. Uporabljajo se za zaščito rezalnih orodij, s katerimi obdelujejo močno abrazivne materiale. Nasprotno od diamantnih prevlek so prevleke c-BN primerne za zaščito orodij za obdelavo feritnih zlitin. Njihova slabost pa je slaba oprijemljivost na podlage zaradi velikih notranjih napetosti.

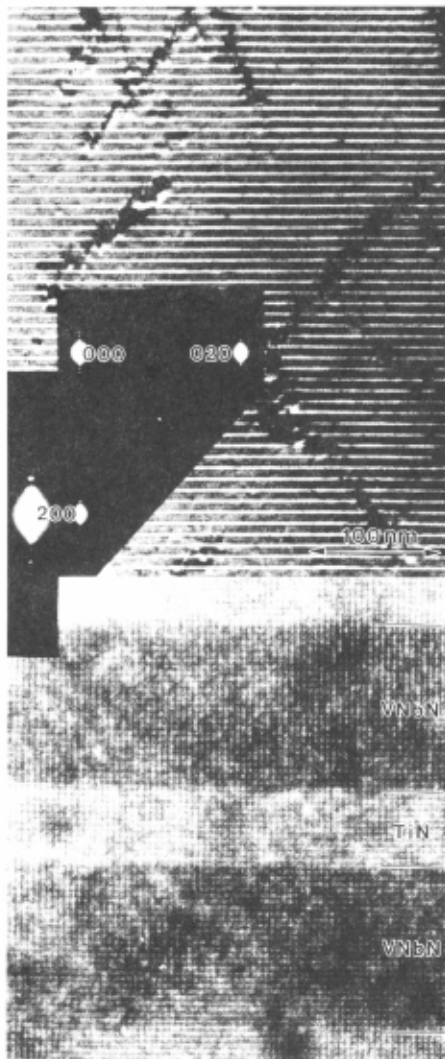
f) Prevleke na osnovi nanokristaliničnih kompozitov

Trdota realnih materialov, monokristalov z defekti oz. polikristalnih snovi pa ni odvisna samo od jakosti kemijskih vezi, ampak tudi od mikrostrukture (velikosti in orientacije kristalnih zrn, vsebnosti točkastih napak, dislokacij in makroskopskih defektov). Znano je, da dislokacije omogočajo drsenje kristalnih ravnin - torej plastično deformacijo. Če hočemo material utrditi, moramo zmanjšati število dislokacij oz. zmanjšati njihovo gibljivost. Eden izmed načinov zmanjšanja gibljivosti dislokacij je priprava nanokristaliničnih kompozitnih materialov, ki so zgrajeni iz nanokristalov v amorfni matrici (slika 6) /11,12/. Pri pripravi takšnih snovi izhajamo iz naslednjih ugotovitev:

- dislokacijski izviri ne delujejo v nanokristalih, katerih velikost je manjša od 10 nm
- v nanokristalih ni dislokacij
- tudi če dislokacije nastanejo pri velikih napetostih, ne morejo potovati skozi mejo v amorfno matrico.



Slika 6 Predlagana mikrostruktura supertrdih nanokristaliničnih kompozitov [12]



Slika 7 Prerez superstrukture TiN/NbVN s periodo modulacije 8,2 nm. Posnetek v svetlem polju je bil narejen z presevnim elektronskim mikroskopom [22].

g) Supertrde prevleke na osnovi superstruktur

Zelo trde prevleke so tudi tiste na osnovi periodičnih ali neperiodičnih večplastnih struktur in superstruktur (npr. TiN/NbVN, slika 7) [13-14]. Če je modulacijska perioda manjša od 10 nm (govorimo o superstrukturah), je vpliv stičnih površin na fizikalne lastnosti snovi odločilen. Periodičnost takšne strukture in kratke razdalje med posameznimi plastmi prinašajo celo vrsto novih fizikalnih lastnosti. Meje med plastmi preprečujejo gibanje dislokacij, elastične napetosti na mejah pa onemogočajo delovanje dislokacijskih izvirov. Oba pojava pa bistveno prispevata k povečanju trdote takšne strukture.

4 Sklepi

Trdota je tehnološko zelo pomembna lastnost materialov. Od nje je odvisna njihova obrabna obstojnost, trenje in mazanje površin, ki so v kontaktu. Visoka trdota pa ni edino merilo pri izbiri primernih materialov za pripravo trdih zaščitnih prevlek. Tako je npr. amorfni bor karbid izjemno trdna snov (≈ 5000 HV), vendar pa je po drugi strani zelo krhek in oksidacijsko neobstoje. Tudi diamantne prevleke, ki so najtrše, pa so zaradi metastabilne narave, velikih notranjih napetosti (slaba adhezija) in oksidacijske neobstoje omejeno uporabne. Razvoj na področju supertrdih prevlek, ki smo jih opisali v tem prispevku, gre v smeri optimizacije njihovih lastnosti in postopkov priprave le-teh. Povsem neraziskane so prevleke na osnovi ternarnih materialov v sistemih B-C-N, raziskave nanostrukturnih prevlek pa so šele na začetku. Zato lahko v naslednjih letih pričakujemo številna nova odkritja.

5 Literatura

- /1/ U. König, Surf. and Coat. Technol., 33 (1987) 91-103
- /2/ H. Holleck, J. Vac. Sci. Technol., A4 (6), Nov/Dec 1986, 2661-
- /3/ F. Richter, Phys. Bl. 52; 4 (1996) 356-358
- /4/ H. Ehrhardt, Galvanotechnik, 87 (1996) 1934-1941
- /5/ H. Ehrhardt, Surf. and Coat. Technol., 74-75 (1995) 29-35
- /6/ F. Miller, Metalloberfläche 48, 6 (1994) 404-405
- /7/ J.C. Angus, Thin Solid Films, 216 (1992) 126-133
- /8/ A. Grill, Surface and Coat. Technol., 94-95 (1997) 507-513
- /9/ B. Zega, Zbornik XI. jug. vak. kongresa, Gozd Martuljek, 1990, 129-143
- /10/ A.Y. Liu, M.L. Cohen, Science, Vol. 245, Aug. 1989, 841-842
- /11/ S. Veprek, S. Reiprich, Thin Solid Films, 268 (1995) 64-71
- /12/ S. Veprek, Surf. and Coat. Technol., 97 (1997) 15-22
- /13/ W.D. Sproul, J. Vac. Sci. Technol. A 12(4), Jul/Aug 1994
- /14/ S.A. Barnett, Physics of Thin Films, Eds. M.H. Francombe, J.L. Vossen, Academic Press, Boston, 1993, 2-73
- /15/ M. Lahres, H. J. Fűßer, Metalloberfläche, 49, 9 (1995) 720-726
- /16/ K. Kanda, S. Takehana, S. Yoshida, R. Watanabe, S. Takano, H. Ando, F. Shimakura, Surf. and Coat. Technol., 73 (1995) 115-120
- /17/ M. Lahres, G. Jorgensen, Surf. and Coat. Technol., 96 (1997) 198-204
- /18/ C. Donnet, Surf. and Coat. Technol., 100-101 (1998) 180-186
- /19/ H. Sjoström, L. Hultman, J.E. Sundgren, S.V. Hainsworth, T.F. Page, G.S.A.M. Theunissen, J. Vac. Sci. Technol. A 14(1), Jan/Feb 1996, 56-62
- /20/ S.P. Withrow, J.M. Williams, S. Prawer, D. Barbara, J. Appl. Phys. 78 (5) Sep. 1995
- /21/ P.V. Kola, D.C. Cameron, B.J. Meenan, K.A. Pischow, C.A. Anderson, N.M. Brown, M.S.J. Hashmi, Surf. and Coat. Technol., 74-75 (1995) 696-703
- /22/ P.B. Mirkarimi, L. Hultman, S.A. Barnett, Appl. Phys. Lett. 57 (1990) 2654

SCHOTTKYJEVA BARIERA - MODERNI POGLEDI NA STAR PROBLEM (I. del)

Dean Korošak, Bruno Cvikl, Fakulteta za gradbeništvo, Univerza v Mariboru, Maribor in Institut Jožef Stefan, Ljubljana

Schottky barrier – modern views on an old problem (Part I)

ABSTRACT

The description of the metal semiconductor contact in the framework of the general model incorporating the interfacial control layer between the metal and the ordered semiconductor is given. Special attention is given to the ICB Schottky structures for nonzero acceleration voltage featuring the disordered interfacial control layer characterized by the metal atoms incorporated into the semiconductor lattice and the DIGS continuum. The expression for the Schottky barrier height variation in ICB structures is given.

POVZETEK

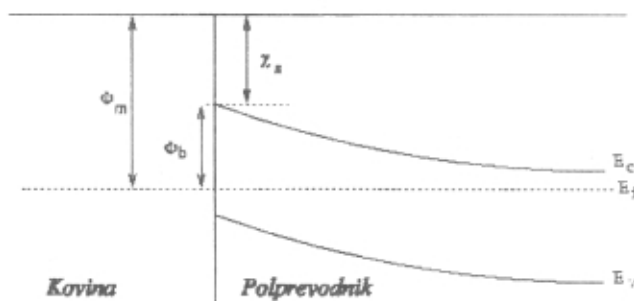
V prispevku je podan opis stika med kovino in polprevodnikom v okviru splošnega modela stika z vmesno kontrolno plastjo. Posebej so poudarjene lastnosti stika, narejenega po metodi CIS, kjer pride do nastanka neurejene kontrolne plasti, karakterizirane s kovinskimi atomi, vgrajenimi v kristalno mrežo polprevodnika in kontinuumom lokaliziranih elektronskih stanj, induciranih z neredom v kontrolni plasti. Podan je izraz za variacijo višine Schottkyjeve bariere v CIS-kontaktih.

1 UVOD

Problem Schottkyjevega stika oziroma nastanka potencialne bariere na stiku med kovino in polprevodnikom ostaja, kljub svoji več kot petdesetletni zgodovini, še danes nerešen in pomeni zelo aktivno področje osnovnih in aplikativnih raziskav v fiziki trdne snovi, površin in novih elektronskih materialov /1, 2/. Čeprav je uporaba stika med kovino in polprevodnikom izjemnega tehnološkega pomena za industrijo integriranih vezij in celotno mikro(nano)elektronsko industrijo, je presenetljivo, da je podrobna mikroskopska slika kontakta še v veliki meri nepojasnjena z mnogo odprtimi vprašanji. Namen tega prispevka je predstaviti nekaj novejših pogledov in načinov reševanja problema nastanka Schottkyjeve bariere, ki jih lahko zaznamo v zadnjem času, ter poudariti možnosti, ki jih za iskanje odgovorov daje raziskovanje lastnosti stika, narejenega po metodi curka ioniziranih skupkov (CIS) /3/. V prvem delu se omejimo na opis kontakta v termičnem ravnovesju, medtem ko opis transportnih lastnosti stika kovine in polprevodnika odložimo do drugega dela.

Najpomembnejša fizikalna količina, ki v največji meri definira stik kovine in polprevodnika, kakor tudi njegove transportne lastnosti, je višina potencialne bariere na meji oziroma Schottkyjeva bariera. Raziskovanje Schottkyjevega stika se navadno začne iz dveh smeri. Začetna stanja formiranja meje med kovino in polprevodnikom pri epitaksnosti rasti monoatomne plasti kovine na podlagi polprevodnika se raziskujejo z mikroskopskimi metodami površinske fizike (fotoelektronska spektroskopija, STM, BEEM), medtem ko se že stabilna plast kovine z debelino nekaj 100 nm raziskuje z analizo makroskopskih merjenj električnega toka skozi mejo in kapaciteto stika. Neujemanje lastnosti stika, dobljenih pri opisanih načinih, kaže na pomemben vpliv mikro-

skopskih mehanizmov pri nastajanju bariere na njeno končno, makroskopsko višino. Prvi fizikalni opisi dogajanja na meji med kovino in polprevodnikom /4, 5/ so bili usmerjeni v razumevanje anizotropnega prevajanja toka skozi stik z ostro mejo in nastanek področja, osiromašenega z nosilci naboja (depletirano področje) v polprevodniku. Višina bariere (Φ_b) je v takšnem idealnem, *Schottky-Mott*-modelu kontakta, enaka razliki izstopnega dela kovine (Φ_m) in elektronske afinitete polprevodnika (χ_s) na meji (slika 1) oziroma energijski razliki med robom energijskega pasu večinskih nosilcev v polprevodniku (E_c) in Fermijevim nivojem kovine (E_f):



Slika 1: Schottky-Mott model idealnega stika med kovino in polprevodnikom

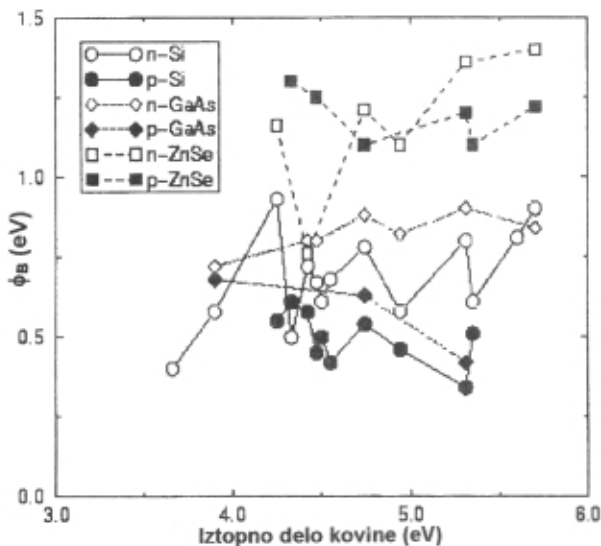
$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (1)$$

Izmerjene vrednosti višine bariere različnih kovin na isti podlagi polprevodnika so se razlikovale od predvidenega linearnega modela za idealni kontakt (1) in nakazovale na primarni vpliv polprevodnika na višino bariere (slika 2). Z drugimi besedami, Fermijev nivo v polprevodniku je stabiliziran ali vpet in določeno stanje v energijski reži polprevodnika, ne glede na vpliv kovine. Stabilizacijo Fermijevega nivoja se je poskušalo pojasniti z vplivom površinskih stanj in dodatnim nabojem na meji /6/.

Pri tem načinu so v primeru z majhno gostoto površinskih stanj na meji reproducirali Schottky-Mott-ovo limito, v primeru z veliko gostoto stanja na meji pa so dobili vpetje Fermijevega nivoja na stanje nevtralnosti naboja (charge neutrality level, E_{cni}) oziroma Bardeenovo limito:

$$\Phi_b = E_g - E_{cni} \quad (2)$$

kjer je E_g širina energijske reže polprevodnika. Opis stika z ostro mejo med kovino in polprevodnikom je



Slika 2: Izbrane izmerjene vrednosti višin Schottkyjeve bariere za različne sisteme kovine in polprevodnikov. Podatki iz [2].

oteževal podrobno analizo razmer, zato je v [7] obravnavan kontakt s tanko izolatorsko plastjo med kovino in polprevodnikom. S tem se naboj na površini kovine loči od naboja v stanjih na stiku in prostorskega naboja v depletiranem področju polprevodnika. Elektrostatska analiza da v tem primeru interpolacijsko zvezo med obema omenjenima limitama:

$$\Phi_b = (1-c)(\Phi_m - \chi_s) + c(E_g - E_{cni}) \quad (3)$$

c je funkcija gostote elektronskih stanj na stiku in debeline izolatorske plasti. Čeprav tovrstni način navidez uspešno rešuje problem vpetja Fermijevega nivoja, je primeren le za opise stika, kjer je plast izolatorja dovolj debela, da kovina in polprevodnik ne interagirata.

Ne glede na nejasne podrobnosti in nepopolnost mikroskopske slike vzroka vpetja Fermijevega nivoja je jasno, da višina bariere v realnih sistemih kovine in polprevodnika pade v določen interval za izbrani polprevodnik, medtem ko je tehnološko zaželeno, da je višina bariere na stiku *kontrolabilna* z eksperimentalnimi parametri.

2 MODEL STIKA KOVINA - POLPREVODNIK

Makroskopsko bi lahko vzrok za neuspešni opis stika kovine in polprevodnika v okviru modela Schottky-Mott lahko pripisali linearni formi izraza (1), ki je približek v prvem redu. Vpetje Fermijevega nivoja bi zato lahko bilo posledica členov višjih redov v razvoju:

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s + a(\Phi_m - \chi_s)^2 + b(\Phi_m - \chi_s)^3 + \dots \quad (4)$$

kjer so a, b, \dots neznane funkcije parametrov stika. Vendar se zaradi nejasne narave in izvora takšnega opisa

predlaga drugačen model (ne)idealnega stika kovine in polprevodnika. V modelu se privzame, da je stik sestavljen iz *treh* različnih in fizikalno dobro definiranih delov: plast kovine na eni strani, polprevodnik (področje s fiksnim prostorskim nabojem) na drugi in mikroskopska plast med njima. Predpostavlja se, da ravno mikroskopska plast med kovino in polprevodnikom, značilno široka nekaj nm, odločujoče vpliva na lastnosti stika in uravnava višino bariere. Fizikalne lastnosti mikroskopske kontrolne plasti in posledično tudi lastnosti celotnega stika so v veliki meri določene z načinom izdelave stika. Če gre za počasen, epitaksn nanos kovine (MBE), potem bodo spremembe strukture polprevodnika na meji minimalne. Meja med kovino in polprevodnikom bo ostra z nekaj desetimi nm široko kontrolno plastjo. Takšno kontrolno plast lahko imenujemo *urejeno*, ker je struktura plasti v bistvu identična strukturi polprevodnika. Spremembe v elektronski strukturi pa zaradi ostre meje kljub temu ostanejo. Če je tehnika nanosa kovine na podlago takšna, da povzroča strukturne spremembe v polprevodniški plasti, debeli nekaj nm (denimo CIS), je vmesna kontrolna plast *neurejena*.

Neurejena kontrolna plast (DIDL - Disordered Interface Control Layer) je v predstavljenem modelu stika kovine in polprevodnika del stika z bistveno drugačnimi strukturnimi in elektronskimi lastnostmi. V makroskopskem opisu kontakta je mogoče vpliv DIDL na višino bariere podati z induciranim dipolom ΔV_i na meji:

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s - \Delta V_i \quad (5)$$

kjer je

$$\Delta V_i = c((\Phi_m - \chi_s) - (E_g - E_{cni})) \quad (6)$$

Z gornjim izrazom sledi iz (5), navedena zveza (3), ki je bila izpeljana s predpostavko o vmesni *izolatorski* plasti med kovino in polprevodnikom.

Bistveno vprašanje problema stika med kovino in polprevodnikom je torej karakterizacija in opis vmesne kontrolne plasti in njenega vpliva na višino bariere ter predvsem razumevanje nastanka novih elektronskih stanj na stiku, ki odločajo o vpetosti Fermijevega nivoja. Izvir dodatnega naboja na mejni plasti stika je podoben naboju zaradi elektronov v površinskih stanjih na prosti površini kristala (torej na meji kristal-vakuum) [npr. 8]. Odsotnost periodičnosti strukture v normalni smeri na stik povzroči nastanek elektronskih stanj v energijski reži polprevodnika (t.j. nove rešitve Schrödingerjeve enačbe zaradi novih robnih pogojev) z lokalno Fermijevo energijo E_{cni} . Ko je površina polprevodnika prekrita s plastjo kovine, govorimo o kontinuumu stanj, induciranih s kovino (MIGS - Metal Induced Gap States) [9], ki eksponentno pojemajo v notranost polprevodnika in se na meji ujema z (Blochovo) valovno funkcijo elektrona v kovini. Po tem se bistveno razlikujejo od površinskih stanj polprevodnika, ki so eksponentno pojemajoča tudi zunaj polprevodnika, čeprav leži v obeh primerih vzrok za stanja v energijski reži v kompleksnih energijskih pasovih polprevodnika. Položaj Fermijevega nivoja na meji, torej višina Schottkyjeve bariere, je samousklajeno določen z nabojem na meji in s prostorskim nabojem v depletiranem področju

polprevodnika. Za običajne vrednosti gostote primesi v polprevodniku ($<10^{18} \text{ cm}^{-3}$) je elektronska gostota v stanjih na meji ($\sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) večja od površinske gostote naboja v depletiranem področju ($\sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$), tako da se lahko prenos naboja med stanji na meji in depletiranim področjem zanemari. S tem se lahko problem Schottkyjeve bariere razdeli na makroskopsko določanje potencialne bariere (band bending) z reševanjem Poissonove enačbe (pri tem je mejna plast robni pogoji) in na mikroskopsko analizo bariere v področju kontrolne plasti.

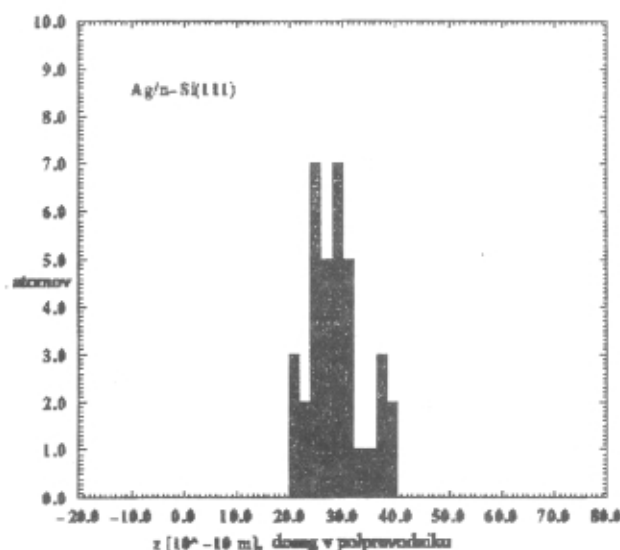
3 LASTNOSTI SCHOTTKYJEVEGA STIKA, IZDELANEGA PO METODI CIS

Metoda nanašanja plasti materiala na podlago s curkom ioniziranih skupkov (CIS) (podrobneje npr. /3/) je nizkotemperaturna vakuumška metoda, kjer se materialu v obliki ioniziranih skupkov in atomov na poti do podlage dovaja dodatna energija s pospeševanjem v statičnem električnem polju. Pospeševalna napetost, ki je glavni eksperimentalni parameter te metode, je navadno v mejah od nekaj sto do nekaj tisoč voltov.

Vrsta analiz električnih lastnosti stikov kovine in polprevodnika (Ag/Si in Pb/Si), narejenih s pilotsko CIS napravo na Odseku za reaktorsko fiziko Instituta J. Stefan pri različnih pospeševalnih napetostih, kaže na modifikacijo Schottkyjeve bariere, ki se s povečevanjem energije vpadlih atomov in skupkov *znižuje* na n-tipu in *zvišuje* na p-tipu polprevodnika /10, 11/ v primerjavi s standardnimi vrednostmi. Pri zelo velikih pospeševalnih napetostih ($\sim 6 \text{ kV}$) pa se opazi prehod električnih lastnosti stika iz usmerniške v linearno (ohmsko), tako da metoda CIS lahko omogoča *zvezno* spreminjanje višine bariere pri *istem* sistemu izbrane kovine in polprevodnika. Tehnološki pomen takšne variabilnosti Schottkyjeve bariere je očiten. Čeprav so glavne smeri sprememb tokovnih karakteristik stika, narejenega po metodi CIS, opazili že zgodaj /3/, ni bil podan niti približen poskus opisa fizikalnih pojavov in njihove interpretacije v okviru konsistentnega modela neidealnega kontakta z neurejeno kontrolno plastjo.

Zaradi zvečevanja njihove energije pri pospeševanju na poti do podlage lahko ionizirani atomi in skupki prodrejo pod površino polprevodnika in tvorijo s kovinskimi ioni obogateno plast polprevodnika v bližini meje. Predpostavlja se, da lahko tako formirana plast obogatene polprevodnika igra vlogo neurejene vmesne plasti DICL v modelu stika kovine in polprevodnika. Doseg kovinskih atomov L (in njihova porazdelitev) v kristalu polprevodnika je funkcija pospeševalne napetosti (slika 3) in pomeni širino neurejene vmesne plasti. Nered (kovinski atomi v kristalni mreži polprevodnika in sprememba medatomske vezi) vpliva na spremembo elektronske strukture v kontrolni plasti, ki povzroča modifikacijo Schottkyjeve bariere glede na idealni stik. Osnovo za razumevanje vpliva nereda daje Andersonov model lokalizacije elektronskih stanj /12/. Lokalizacija bo najmočnejša na meji med neurejenim in urejenim delom polprevodnika, kjer prihaja do največje variacije lokalne strukture. Del lokaliziranih stanj se zaradi razširitve robov energijskih pasov nahaja v energijski reži polprevodnika.

Taka stanja se imenujejo z neredom inducirana stanja (DIGS - Disorder Induced Gap States) /13/ in jih lahko



Slika 3: Porazdelitev atomov srebra v tanki plasti silicija. Simulacija je narejena z molekularno dinamiko za trk 36 atomov srebra z energijo 300 eV z modelom silicijevega kristala z orientacijo površine (111).

opišemo z eksponentno pojemajočo krajevno odvisnostjo:

$$\psi_{DIGS} \propto \exp(-|\bar{r} - \bar{r}_0| / \xi) \quad (7)$$

kjer je ξ lokalizacijska dolžina stanja. Za DIGS z zvezno gostoto stanj v reži še podobno kot za MIGS definira nevtralni nivo E_{HO} . Če Fermijev nivo v polprevodniku lokalno ne sovпада z E_{HO} , potem se v DIGS inducira dodatni naboj, ki lahko vpliva na višino bariere. Vpliv kovinskih atomov, vgrajenih v kristalno mrežo polprevodnika pri nanosu po metodi CIS, je potemtakem dvojen:

- s povzročanjem neurejenosti v strukturi polprevodnika inducirajo lokalizirana stanja DIGS z mogočim dodatnim nabojem na meji med DICL in urejenim delom polprevodnika
- delujejo kot atomi primesi z diskretnimi elektronskimi stanji (donorskimi in akceptorskimi) v energijski reži polprevodnika, ki ionizirani lahko spremenijo gostoto prostorskega naboja v DICL in s tem tudi rob energijskega pasu večinskih nosilcev.

Gostoto inducirane naboja na višino Schottkyjeve bariere lahko v poenostavljenem enodimenzionalnem modelu s konstantno gostoto DIGS /14/ ocenimo z:

$$n(z) = \frac{D_{DIGS} (E_F - E_{HO} - \Delta V_i(z))}{\xi} \exp(-|z - L| / \xi) \quad (8)$$

kjer je D_{DIGS} gostota DIGS na enoto površine, E_F Fermijeva energija. Inducirani potencial ΔV_i je rešitev Poissonove enačbe in je na meji med DICL in urejenim delom polprevodnika:

$$\Delta V_i(z) = (E_F - E_{HO}) [1 - c] \quad (9)$$

kjer je $c = I_0(2\xi/\lambda)$ modificirana Besselova funkcija in

$$\lambda = \sqrt{\epsilon_s \epsilon_0 \xi / e^2 D_{DIGS}}.$$

Višina Schottkyjeve bariere je sedaj:

$$\Phi_b = c(E_c - E_F) + (1 - c)(E_c - E_{HO}) \quad (10)$$

V limiti, ko je nered v kontrolni plasti dovolj majhen, pri nizkih vrednostih pospeševalne napetosti ($D \rightarrow 0$), zgornji izraz reproducira Schottky-Mottovo limito ($c = 1$) $\Phi_b = E_c - E_F$. Pri večjih vrednostih pospeševalne napetosti in pri nastanku kontinuuma DIGS z gostoto $\sim 10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ je (z lokalizacijsko dolžino 0,2 nm) $c = 2$ in za višino Schottkyjeve bariere z neurejeno kontrolno plastjo:

$$\Phi_b = (E_c - E_F) - (E_F - E_{HO}) = \Phi_{b0} - \Delta\Phi_b \quad (11)$$

Torej je variacija potencialne bariere na neidealnem stiku kovine in polprevodnika v predstavljenem modelu podana z lokalnim odstopanjem Fermijevega nivoja od nevtralnega nivoja v DIGS kontinuumu. V primeru vpetja Fermijevega nivoja na meji med DCL in urejenim delom polprevodnika $E_F = E_{HO}$ izhaja iz zgornjega izraza Bardeenova limita za primer neidealnega stika kovina-polprevodnik, izdelanega po metodi CIS: $\Phi_b = E_c - E_{HO}$. Ker nevtralni nivo E_{HO} označuje mejo v kontinuumu DIGS med stanji akceptorskega in donorskega značaja, se predpostavlja, da je pri polprevodnikih s tetraedersko koordinacijo vezi enak energiji hibridiziranih sp^3 orbital in leži blizu sredine energijske reže /13/. Pri CIS-Schottkyjevih strukturah je mogoče pričakovati, da bo položaj E_{HO} blizu sredine energijske reže le pri nizkih vrednostih pospeševalne napetosti (nekaj 100 V), ko gre za zmerne spremembe strukture polprevodnika. Za silicij je takrat $\Phi_b = E_c - E_g/2 = 0,58 \text{ eV}$, medtem ko je izmerjena vrednost za sistem Ag/n-Si(111) pri 300 V pospeševalne napetosti 0,59 eV /11/. Za visoke vrednosti pospeševalne napetosti (nekaj kV) in pri močno neurejeni kontrolni plasti pa se pričakuje, da se bo položaj E_{HO} premaknil iz sredine energijske reže in v limiti dosege Fermijevo energijo kovine v stiku. Za podrobno razumevanje razmer v neidealnem Schottkyjevem stiku je treba izhajati iz mikroskopske slike okolice posameznega atoma v kontrolni plasti in vpliva nereda v plasti na položaj nevtralnega nivoja in na vpetje Fermijevega nivoja. Raziskave v tej smeri so v teku.

4 SKLEP

Opisan je stik med kovino in polprevodnikom s stališča splošnega modela kontakta s tremi dobro definiranimi in fizikalno različnimi področji: kovinsko plastjo na eni strani, urejenim polprevodnikom na drugi in kontrolno vmesno plastjo. Posebej je poudarjen način raziskovanja variacije višine Schottkyjeve bariere pri kontaktih med kovino in polprevodnikom, narejenih po metodi CIS. Pri do sedaj znanih načinih modifikacije Schottkyjeve bariere so uporabljene ultratanke plasti, narejene z molekularno epitaksijo, ki povzročajo nastanek urejene vmesne plasti /15/. Pri tem je material urejene kontrolne plasti drugačen od polprevodniške podlage (npr. Al/Si/GaAs sistemi). Nanos kovine v Schottkyjevih strukturah, izdelanih po metodi CIS, rezultira v kvalitativno drugačnih fizikalnih procesih kontrole višine bariere in za sedaj predstavlja edinstven način študija celotnega problema nastanka Schottkyjeve bariere. Pomembna razlika med tehnikama MBE in CIS je, da pri uporabi tehnike CIS prihaja do modifikacij v kristalni mreži polprevodnika, tako da se kontrolna plast formira v samem polprevodniku, ki je karakterizirana s kontinuumom lokaliziranih elektronskih stanj (DIGS) na meji med kontrolno plastjo in urejenim delom polprevodnika. Nadaljnje raziskave so usmerjene v študij mikroskopske slike okolice posameznega atoma v neurejeni kontrolni plasti in vpliva spremenjene elektronske strukture polprevodnika na transportne lastnosti stika kovine in polprevodnika.

5 LITERATURA

- /1/ E. H. Rhoderick, R. H. Williams, Metal-Semiconductor Contacts 2nd ed., Clarendon Press (1988)
- /2/ S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices 2nd ed., John Wiley and Sons (1981)
- /3/ T. Takagi, Ionized Cluster Beam Deposition and Epitaxy, Noyes Publications (1988), glej tudi B. Cviki, Vakuumist, 13, 1993, 18
- /4/ N. F. Mott, Proc. Camb. Philos. Soc. 34, 1938, 568
- /5/ W. Schottky, Z. Phys. 41, 1940, 570
- /6/ J. Bardeen, Phys. Rev. 71, 1947, 717
- /7/ A. M. Cowley, S. M. Sze, J. Appl. Phys. 36, 1965, 3212
- /8/ M. C. Desjonqueres, D. Spaanjard, Concepts in Surface Physics 2nd ed., Springer (1996)
- /9/ V. Heine, Phys. Rev. 138, 1965, 1689
- /10/ B. Cviki, T. Mrden, Fizika A4, 1995, 203
- /11/ B. Cviki, D. Korošak, Zs. J. Horvath, v tisku Vacuum (1998)
- /12/ P. W. Anderson, Phys. Rev. 109, 1958, 1492
- /13/ K. Koyanagi, S. Kasai, H. Hasegawa, Jpn. J. Appl. Phys. 32, 1993, 502
- /14/ D. Korošak, B. Cviki, T. Mrden, 24th International Conference on Microelectronics, MIEL '96, Proceedings, 1996, 303
- /15/ L. Sorba, G. Bratina, A. Antonini, A. Franciosi, L. Tapfer, A. Miglioni and P. Merli, Phys. Rev. B46, 1992, 6834

VODENJE IN DIAGNOSTICIRANJE CURKA NAELEKTRENIH DELCEV

Alojz Paulin, Andrej Pregelj*, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 2000 Maribor, *Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 1000 Ljubljana

Travelling and diagnostics of particle beams

ABSTRACT

Particle accelerators operating depends first of all on particle beam generation and on high vacuum establishing but the supervisor system has to assure also the geometrical control of beam shape and travelling along the central trajectory in working tube. This is usually made by slits and slots or for charged particles by appointable magnetic fields (diquadro- and sextu- pols). For automatic mistake removal, an information is needed on beam data in different locations, respectively on deviation from requested beam parameters. To collect mentioned data several sensors are built in accelerator tube walls. The contribution represents some principles for detection of beam position and intensity which can be studied, realized and tested with our facilities.

POVZETEK

Za kvalitetno delovanje pospeševalnikov delcev je treba poleg ustvarjanja curka delcev in zadostnega vakuuma zagotavljati tudi njegovo geometrijsko oblikovanje in vodenje po predvideni trajektoriji v sredini delovne cevi. To opravljamo z režami in zaslonkami, ter pri naelektrenih delcih predvsem z nastavljivimi magnetnimi polji (dvo-, štiri- in večpolni elektromagneti). Za avtomatsko odpravljanje napake mora upravljalni računalnik dobiti informacijo o velikosti odstopanja od zelenih parametrov curka na določenem mestu. Taki, pomembni podatki so: porazdelitev delcev v preseku snopa, njihova energija, centričnost v cevi in velikost pretoka delcev. Zato imajo pospeševalniki v delovni cevi vgrajene posebne senzore. Prispevek opisuje osnovne prijeme za detektiranje lege in jakosti snopa delcev.

1 Uvod

Predpostavljamo, da imamo curek naelektrenih delcev, ionov ali elektronov, pospešen z neko energijo. Lahko je časovno, in s tem tudi krajevno, vzdolž smeri gibanja zvezen ali pulzirajoč. Vzdolžno os navadno označimo s koordinato z, na katero sta pravokotni koordinati x in y. Lega delcev je z ozirom na vzdolžno os odvisna od električnih polj pospeševalnih elementov. Pri elektrostatskih elementih so to statične elektrode, pri visokofrekvenčnih (VF) pa resonančni VF- sistemi ali indukcijski (princip transformatorja) elementi.

Odstopanje od vzdolžne osi določa elektrostatično ali magnetostatično lečje. Vodenje celotnega curka prevzamejo dipoli, to so v elektrostatici odklonske plošče, v magnetostatici pa odklonski magneti. Obliko curka formirajo lečja, ki so v elektrostatici navadno osno simetrična, v magnetostatici pa uporabljamo kvadrupole, za popraviljanje napak pa še sekstupole oz. sploh multipole. Pri nizkih energijah delcev prednjači elektrostatska elektronska optika, pri visokih pa je možna predvsem magnetostatska. Zaradi popolnosti omenimo še VF kvadrupole, ki so ruska iznajdba in omogočajo pospeševanje in fokusiranje obenem.

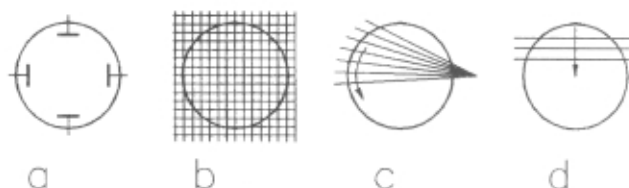
Če hočemo curek voditi in oblikovati, moramo stalno preverjati (diagnosticirati) njegovo lego in obliko, potem pa nastaviti posamezne, curek oblikujoče in spreminjajoče elemente. Ta povratna zveza je bil včasih človek, danes pa že prevladuje računalnik.

Diagnostična sredstva so dveh vrst: taka, ki curek motijo (interrupting), in taka, ki ga ne motijo (noninter-

rupting). Bolj zaželeno je druga metoda, uporabljamo pa tudi prvo.

2 Metode z motenjem curka

Če curek delcev z nizko energijo prileti na kovinsko ploščico, jo naelektri, in če to ploščico preko ampermetra zvežemo na zemljo, teče preko merilnika tok, enak toku curka, ki ga ploščica prestreže. Če pa ploščica prestreza visokoenergijski curek, le-ta delcev ne zadrži in zato letijo komaj zavrti skozi ploščico, obenem pa izbijajo predvsem elektrone, ki se vsedajo na okoliške dele. Navadno namestimo v okolici merilne ploščice pozitivno naelektrene elektrode, tako da le-te pritegnejo iz motilne ploščice izbite elektrone, in ker je ta ozemljena preko ampermetra, teče tok elektronov v ploščico. Očitno je tok preko A-metra pri naletu elektronov nizkih energij obratno usmerjen kot pri naletu visokoenergijskih elektronov. Ta način meritev toka ni absoluten, ampak le relativen. Če postavimo ploščico simetrično na obe strani predpisane osi curka, bo enak tok na obeh ploščicah tekkel le v primeru, če os curka sovpada s predpisano osjo. Treba bo seveda nastaviti dva, pravokotno stoječa para prestrezajočih elektrod, da diagnosticiramo odstopanje curka v vodoravni in navpični smeri. Lahko pa se žica tudi pomika skozi curek, ali pa je nameščena cela mreža pravokotno stoječih žic, od katere vsaka pelje na svoj instrument (sl.1). Seveda gredo danes vsi podatki na računalnik, in že je narisana krivulja žarka v odvisnosti od x ali y osi. Za to aparaturo je 1992 Georges Charpak dobil Nobelovo nagrado, kot je bilo navedeno: ".... za njegov izum in razvoj detektorjev delcev, posebno večžične proporcionalne komore."



Slika 1. Presek cevi pospeševalnika (krog) s shematskim prikazom različnih tipov curka delcev: a-statični senzori, b-mreža, c-kotno premikajoča se žica, d-vzporedno premikajoča se žica

V področje prestrezajočih merilnikov spada še Faradayeva kletka, ki meri precej točno ves tok, ki vanjo pade, ne glede na energijo, saj mora biti zaviralna plast zadosti debela, sekundarni delci pa ostanejo v kletki. Dalje spadajo sem še z luminoforjem premazane elektrode, ki dajo le optično sliko, ne pa meritve.

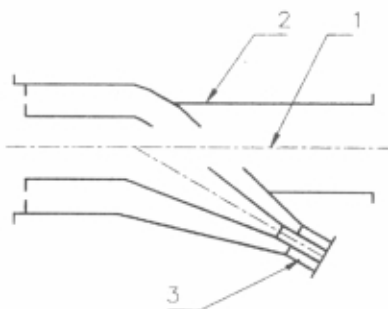
3 Metode brez motenja curka

Neprestrezajoči merilniki so možni le v primeru, kadar curek vsebuje VF komponente. Le na tak način je možna indukcija tokovne časovne spremembe v merilnik.

Sklop je lahko kapacitiven, induktiven ali kombiniran, kar je primer pri VF resonatorjih ali pri koaksialnih komponentah. Po potrebi in želji namestimo sklopne kondenzatorje ali tuljave na obodu krožnice okrog zelene osi curka, navadno na štirih mestih, en par na x drugi na y osi. Če curek ne poteka po predvideni z osi, je v obeh nasproti ležečih tuljavah (kondenzatorjih) inducirana napetost različna, njuna razlika ni več nič in s to napetostjo lahko krmilimo ustrezni dipol (odklonski magnet) tako, da se premakne curek proti sredini.

Za tako meritev toka se lahko uporablja votli VF resonator, skozi katerega os brzi curek delcev in ki je uglašen predvsem na prvo, lahko pa tudi na kako višjo harmonično komponento curkovega paketa (bunch). Ker in če je merjena komponenta proporcionalna toku, smo tako dobili merilnik toka. Seveda moramo tak merilnik umeriti s Faradayevo kletko, ki (precej) točno meri celotni (integrirani) enosmerni tok curka.

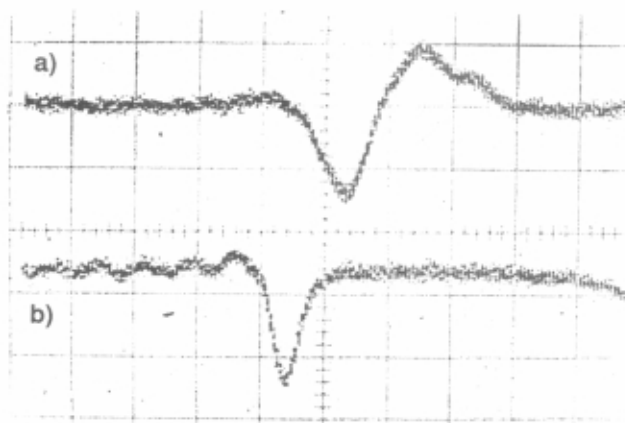
Omenimo še eno zvrst sond. Obliko paketa (bunch) lahko merimo tako, da obdamo curek z visokofrekvenčno in precej širokopasovno anteno ter dobljeni signal koaksialno vodimo na osciloskop. Taka koaksialna antena (sl. 2) meri obliko paketa, kot jo prikazuje diagram na sliki 3a; slika 3b podaja za primerjavo obliko enakega curka, če je le-ta zaustavljen v Faradayevi kletki.



Slika 2. Primer sonde za diagnosticiranje brez motenja curka. Številke pomenijo: 1-trajektorija curka, 2-element pospeševalne cevi, 3-priključek antene na koaksialni kabel

4 Sklep

Glede na bližino tržaškega sinhrotrona in na možnosti, da bomo Slovenci tam gradili svojo žarkovno linijo, smo



Slika 3. Oblika signala v paketu curka, dobljenega brez motenja curka s koaksialno anteno (a), oz. s Faradayevo kletko (b)

poznavalci vakuumske znanosti in potencialni proizvajalci tovrstne opreme veliko študirali in preverjali - tako posamezno, kot tudi medsebojno in združeno - kako bi lahko sodelovali. Poleg številnih možnosti osnovnih raziskav bi lahko mnogi svoja znanja in izkušnje uporabili pri konstrukciji in izdelavi posameznih elementov in sklopov linije oz. tudi delov pospeševalne cevi. Sodelavci IEVT, Ljubljana in FERI, Maribor, smo v tem smislu naredili več korakov. Razvili smo: ionsko getersko črpalko, UVV ploščni ventil, merilnik na hladno katodo za VV in UVV področje itd. Lotili smo se tudi študija, kako preverjati stanje curka delcev. V prispevku prikazujemo osnovne principe detektiranja curka naelektrinih delcev v ceveh pospeševalnikov. Obstajajo metode, ki curek motijo, in take, ki ga ne motijo. Nekatere od njih je možno v naših laboratorijih izdelati, preveriti in optimizirati.

5 Literatura

- /1/ S.Adam, M.Humbel, L.Rezzonico, Improving the beam diagnostic in the PSI 590 MeV ring cyclotron
- /2/ Darko Jamnik, Novi pospeševalniki za visoke energije, Obzornik mat. fiz. 32, 4/5, 1985
- /3/ Alojz Paulin, Coaxial beam-diagnostic probe, Nuclear instruments and methods, 116 (1974) 197
- /4/ Iztok Arčon, Slovenska večnamenska rentgenska žarkovna linija - idejni načrt, Vakuumist, 17, 1, 1997, 4-16

DVTS na INTERNETU

Zaradi vse večjega prodora interneta v svet informacij smo se tudi v društvu odločili za postavitev naše domače strani na njem. Predstavila naj bi naše dejavnosti, novice in obvestila.

Trenutno si lahko ogledate naše strani na naslovu: <http://www2.arnes.si/guest/ljdvts/index.htm>.

Za čimboljšo predstavitev DVTS na WWW straneh bomo skušali upoštevati vse vaše pripombe in predloge, ki jih pošljete na E-mail: DVTS.group@guest.arnes.si. Poleg naštetega bomo v DVTS skušali obveščati člane o zanimivih dogodkih, novostih in ostalo preko elektronske pošte. Zaradi tega prosimo vse zainteresirane člane, da pošljejo svoje E-mail naslove na naslov DVTS.group@guest.arnes.si.

Za uredništvo WWW-DVTS, Marjan Drab

Petdesetletnica tranzistorja (II. del)

Stanislav Južnič*

50th anniversary of the transistor (Part II)

ABSTRACT

Second part of the article describes the discovery of the field effect transistor (FET). Special concern is put on the work of Shockley and on circumstances, that enabled the "Silicon valley". We make a short view on the development of transistor in Europe and in our country and try to describe some visions of the future of the transistors.

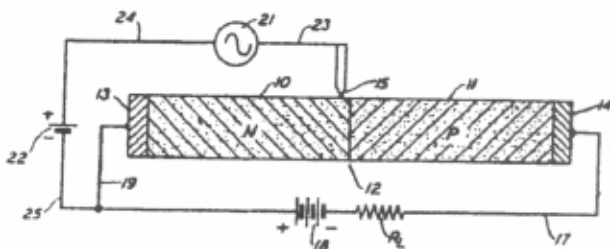
POVZETEK

Drugi del razprave opisuje odkritje tranzistorja na poljski efekt. Posebno pozornost posvečamo Shockleyevemu delu in okoliščinam, ki so botrovale nastanku "Silicijeve doline". Na kratko se ozremo po začetkih uporabe tranzistorjev v Evropi in pri nas ter skušamo podati nekaj vizij prihodnosti tranzistorja.

1 UVOD

Shockley je bil vodja raziskovalne skupine, v kateri sta Bardeen in Brattain po vrsti poskusov odkrila tranzistor s točkastima stikoma. Odkritje je sicer temeljilo na Shockleyevi ideji, vendar pri poskusih ni bil neposredno udeležen. To ga je gotovo jezilo, zato je v naslednjih mesecih pozorneje spremljal raziskovanja svojih sodelavcev, bolj kot je v navadi v skupinah ustvarjalnih znanstvenikov. Z vsemi močmi se je vrgel v raziskovanje tranzistorja na poljski efekt, katerega inačico JFET je razvil do 23.1.1948, 38 dni za odkritjem Bardeena in Brattaina. Izum je patentiral 26.6.1948 in 24.9.1948 /1/.

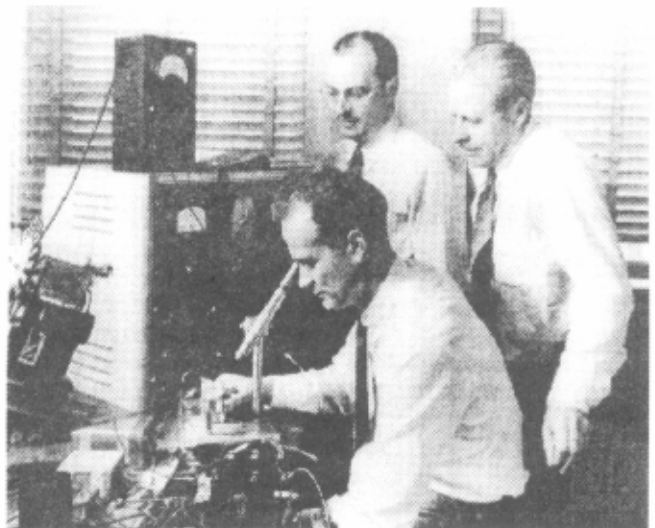
Delovanju nove Shockleyeve inačice tranzistorja je bilo lažje slediti s teorijo, njegov šum je bil manjši in je lahko uporabljal večje moči. Zato je izrinil tranzistor s točkastima stikoma, ki ga je sicer kmalu po Bell Labs v podobni obliki, vendar z različnimi mehanskimi podrobnostmi, izdelal raziskovalni laboratorij General Electrics (GE), za njim pa leta 1949 še podjetja RCA, Raytheon in Sylvania.



Slika 1: Shockleyeva skica tranzistorja iz patenta, vloženega 34.9.1948 (Proc. IEEE, 86/1 (jan. 1998) str. 34)

* Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral pa leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani.

William Bradford Shockley (1910-1989) je bil rojen v Londonu v družini premožnega ameriškega rudarskega inženirja. Diplomiral je na California Institute of Technology leta 1932 in doktoriral na MIT leta 1936 pri Johnu Slaterju (1900-1976), ki je sredi dvajsetih let z Nielsom Bohrom sodeloval pri utemeljevanju kvantne mehanike. Leta 1936 je Shockley prišel v Bell Labs. Tam si je obetal sodelovanje s Clintonom Josephom Davidssonom (1881-1958), ki je naslednje leto dobil Nobelovo nagrado za fiziko za raziskovanje interferenčnega odboja elektronov na kristalu. Shockley se je med vojno ukvarjal z uporabnimi raziskavami, po vojni pa je postal predstojnik novega oddelka za raziskovanje trdne snovi. Vanjo je vključil tudi Bardeena, ki ga je spoznal že sredi tridesetih let v Cambridgeu. Leta 1955 je Shockley postal direktor skupine za razvoj orožij pri obrambnem ministrstvu ZDA in ustanovil lastno podjetje za komercializacijo tranzistorjev. Leta 1963 je postal profesor inženirstva na univerzi v Stanfordsu /2/.



Slika 2: Shockley, Brattain in Bardeen pri Bell Labs leta 1947 (Proc. IEEE, 86/1)

2 FET TRANZISTORJI

Teorija tranzistorja je prinesla nov izziv fiziki. Delovanje vakuumske elektronke je bilo sredi petdesetih let že del standardnega znanja elektro inženirja, medtem ko je bilo gibanje delcev v trdnini precejšnja novost. Tudi sicer so procesi v trdnini bolj zapleteni. Lastnosti katodne elektronke so odvisne le od geometrije in zunanjih robnih pogojev, pri tranzistorju pa vplivajo tudi lastnosti trdnine. V katodni elektronki obravnavamo le gibanje elektronov v električnem polju, v polprevodniku pa imamo poleg elektronov tudi vrzeli. Zato je razumljivo, da so zgodnji raziskovalci tranzistorja sprva različno pojasnjevali dogajanje v njem.

Bardeen je uspeh poskusov z elektrolitom pripisal navzočnosti modificirane plasti polprevodnika na površini,

ki je omejevala tok elektronov. Vendar je takšna razlaga postala dvomljiva, ko so začeli izdelovati dobre tranzistorje s površino, izdelano z izravnavanjem visoke nasprotne napetosti, pod pogojem, da je bil kolektorski kontakt narejen električno.

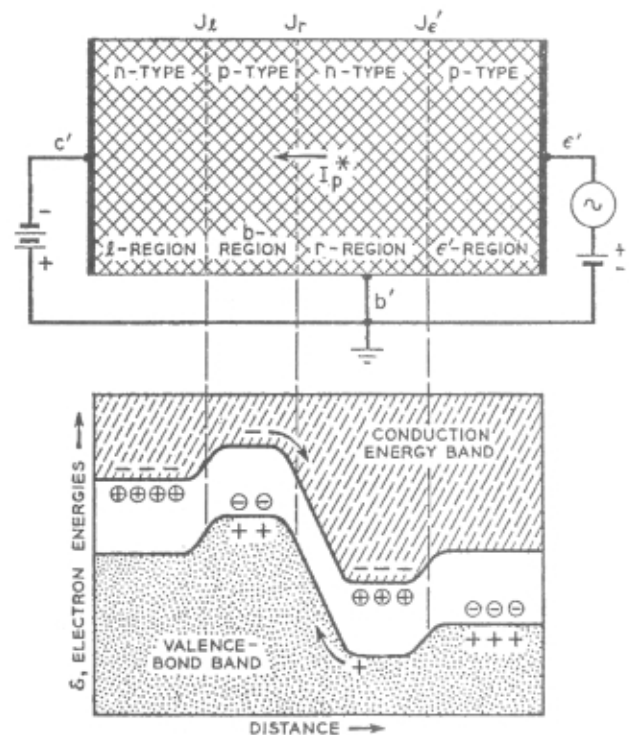
V nasprotju z Bardeenom sta Shockley (23.1.1948) in neodvisno od njega Shive /3/ domnevala, da spremenjeni površinski sloj nima važne vloge. Ojačenje tranzistorja sta imela predvsem za prostorninski in ne površinski pojav. Shive je februarja 1948 njuno domnevo dokazal s poskusom. Točki emitorja in kolektorja sta se stikali na nasprotnih straneh 0,01 mm tanke plasti Ge in na ta način povzročali tranzistorjski efekt, primerljiv z delovanjem tranzistorja Bardeena in Brattaina.

Spremenjena teorija je izražala drugačne razmere, v katerih je deloval Shockleyev tranzistor. Nasprotno od Bardeen-Brattainovega, kjer je do ojačitve prišlo v stiku med kovinskim vodnikom in Ge, je v Shockleyevem p-n-p tranzistorju ojačitev nastala v notranjosti kristala Ge. Tok je tekel predvsem zaradi difuzije, bolj kot zaradi električnega polja. Shockley je v poenostavljenem modelu predpostavil:

- (1) da so donorji in akceptorji povsem ionizirani, kar dobro velja za Ge pri sobni temperaturi
- (2) da je gostota manjšinskih nosilcev naboja veliko manjša od gostote večinskih v vsakem področju
- (3) da je skupno razmerje rekombinacije v vsakem področju linearno odvisno od nepravilnosti gostote manjšinskih nosilcev glede na njeno vrednost v termičnem ravnovesju
- (4) da prostorski naboj ni pomemben, razen v samih p-n stikih.

Obnašanje polprevodniške naprave se je Shockleyu, tako kot pol stoletja prej Braunu, zdelo podobno vakuumski elektronki. Področje emitorja naj bi ustrezalo katodi elektronke, baza področju okoli vodnikov mrežice, kolektorsko področje pa plošči. Tranzistor z ozemljenim emitorskim področjem in s signalom, obrnjenem proti bazi, je deloval kot trioda z ozemljeno katodo. Tako tranzistor kot katodno elektronko uravnavamo z interakcijo med dvema oblikama toka elektronov. V katodni elektronki napetost na mrežici določa tok elektronov od katode k anodi. V tranzistorju tok vrzeli v bazi spreminja napetost med bazo in emitorjem in uravnava tok elektronov skozi plast baze. V nasprotju z opisanim modelom pa Bardeen od vsega začetka ni priznaval analogije z vakuumsko elektronko in je prav zato vpeljal še danes uporabljane nazive emitorski, kolektorski in bazni tok /4/.

Shockleyeva raziskovalna skupina je uporabila monokristal Ge, na katerem je bila plast p-tipa vrinjena med dve področji n-tipa. Naprava je enakomerno delovala na površinah p-n stikov. Velikost njene aktivne površine se je lahko zelo spreminjala, kar ni bilo mogoče pri Bardeen-Brattainovem tranzistorju s točkastim stikom. Tako je Shockley lahko povečal izhodno moč brez povečevanja toka. Eden večjih n-p-n tranzistorjev, ki ga je predstavil na konferencah junija in julija 1950, je imel stik na površini 0,3 cm², bazo debeline okoli 0,07 cm in je dajal 2,0 W nedeformirane moči na izhodu. Tudi pri manjših napravah s stično površino okoli 0,01 cm² so bile vse karakteristike Bardeen-Brattainovega tranzistorja s točkastima stikoma izboljšane za nekaj redov velikosti /5/.



Slika 3: p-n-p-n tranzistor iz razprave: Shockley, M. Sparks in G.K. Teal, p-n Junction Transistors, Phys. Rev. 83 (1.7.1951) str. 157

G.K. Teal in J.B. Little sta leta 1948 pri Bell Labs izdelala tehnologijo rasti velikih monokristalov Ge, v katerega notranjosti so lahko odkrivali in prepoznavali nosilce naboja, vstavljene po stiku s kovino. Aprila 1950 so Shockley, Sparks in Teal vzgojili kristal, ki je imel tanko plast p-tipa na materialu n-tipa. Šele tedaj so lahko začeli proizvodnjo tranzistorjev tipa n-p-n in p-n-p, ki so danes nepogrešljivi deli vsakega mikročipa.

3 PROBLEM PRIORITETE

Izum tranzistorja je bil rezultat kolektivnega dela ameriških raziskovalcev v Bell Labs. Ameriška mornarica se je sprva potegovala za prioriteto svojega raziskovalca, vendar je prizadevanja kmalu opustila. Problem prioritete je še dodatno omilila Bardeenova lastnost, da je rad priznaval še tako majhne zasluge svojih predhodnikov. Tako se je 25.6.1948 zahvaljeval Shockleyu za "...pobudo in vodenje raziskovalnega programa, ki je pripeljal do odkritja..." Decembra 1950 je "Bill" Shockley zapisal posvetilo v svoji novi knjigi: "Johnu Bardeenu, ki je naredil takšno knjigo potrebno". V predgovoru je navedel Bardeena in Brattaina kot izumitelja tranzistorja /6/.

Med Bardeenovimi in Shockleyevimi občudovalci je vendarle prišlo do razprav o prioriteti, ki še danes niso končane. Nekateri raziskovalci menijo, da je Bardeen že 17.12.1947 poznal koncept vcepljanja manjšinskih nosilcev v tranzistorju, po drugih pa naj bi ga iznašel šele Shockley več kot mesec dni pozneje /7/. Skupna raziskovalna pot Bardeena in Shockleya se je ločila, ko sta v prvi polovici petdesetih let drug za drugim zapustila Bell Labs in nadaljevala poklicno pot v tako različnih smereh kot sta raziskovanje superprevod-

nikov na univerzi in komercializacija tranzistorjev na področju zaliva San Francisco. Raziskovalca po skupni Nobelovi nagradi leta 1956 nista več sodelovala, tako da se je Bardeen avgusta 1989 celo izognil pisanju nekrologa za svojim nekdanjim predstojnikom Shockleyem /8/.

4 "SILICIJEVA DOLINA" IN RAZISKOVANJE ZNANSTVENIKOV V INDUSTRIJSKIH LABORATORIJIH

Septembra 1955 je Shockley zapustil Bell Labs in se osebno lotil komercializacije svojih izumov tranzistorja. S tem je sledil Edisonovemu tri četrt stoletja starejšemu primeru proizvodnje žarnic v Menlo Parku.

Shockley je ustanovil tranzistorske laboratorije v svojem rojstnem kraju Palo Alto v Kaliforniji in jih vodil do avgusta 1963. Tako je neposredno omogočil nastanek silicijeve tranzistorske industrije na področju zaliva San Francisco, pozneje posrečeno krščene za "Silicijevo dolino". Središče razvoja je prešlo od vzhodne na zahodno obalo ZDA, od koder je bila doma tudi večina ključnih raziskovalcev tranzistorja.

Industrija, ki je rasla iz iznajdbe tranzistorja, je veliko obetala. Kot naročena je prišla računalnikom, saj so tranzistorski elementi v veliki meri rešili problem pregrevanja, počasnosti in predvsem velikosti prvih računalnikov z elektronkami, ki so jih začeli sestavljati tik pred izumom tranzistorja.

Raytheon, eno izmed 35 podjetij, ki so se seznanila s tehnologijo FET tranzistorjev na simpoziju Bell Labs aprila 1952, je marca 1953 proizvajalo že po 1000 germanijevih tranzistorjev na mesec po ceni 9 dolarjev za kos. Do leta 1957 je Raytheon kontroliral tržišče, vendar je nato zaostal v razvoju tehnologije. Sredi petdesetih let, ko so tranzistor po Shockleyevi ideji večinoma še imeli za "izboljšano elektronko", je proizvodnja tranzistorjev še vedno dajala dvajsetkrat manj dohodka od proizvodnje elektronk. Dobički obeh industrij so postali primerljivi šele v začetku šestdesetih let, ko je vlada ZDA, po uspehu ruskega Sputnika 4.9.1957, v strahu pred tehnološkim zaostajanjem začela radodarno pospeševati miniaturizacijo tranzistorjev.

Nove možnosti je sredi septembra 1957 izkoristilo tudi osem raziskovalcev različnih strok, ki so po poldrugem letu sodelovanja zapustili Shockleyevo podjetje in ustanovili Fairchild s sedežem le eno miljo proč v Palo Altu. Fizik R.Noyce, edini med njimi, ki je imel izkušnje s tranzistorji že pred raziskovanjem v Shockleyevem podjetju, je januarja 1959 pri Fairchildu samostojno izumil prvo integrirano vezje, ki ga je bilo mogoče komercialno proizvajati. S tem je kronal izum integrirane vezja, ki se je konec avgusta 1958 posrečil J.Kilbyu pri Texas Instruments.

Poseg znanstvenika Shockleya v proizvodnjo tranzistorjev je bil sad polstoletnega sožitja med akademsko šolanimi znanstveniki in industrijo v visoko razvitih zahodnih družbah. Uspešno delovanje znanstvenikov v industriji se je začelo s kemikom Charlesom Dudleyem, ki je med letoma 1875-1905 pri Pennsylvania Railroad organiziral laboratorij za testiranje materialov s tridesetimi kemiki. Posebno uspešni so bili znanstveniki pri razvoju žarnice, saj sta imela fizika Edward Nichols in

Francis R. Upton mnogo zaslug za Edisonov uspeh. Podobne naloge sta imela John Stone in George Campbell v Bell Telephone Systems, kjer je v začetku osemdesetih let v oddelku za elektriko in patente raziskoval tudi fizik Jacques, med letoma 1885-1911 Hayes, od aprila 1911 dalje pa je posebno raziskovalno vejo pri Bellu vodil Edwin Colpitts.

Tako je imel Bell ob Shockleyjevem prihodu za sabo že bogato znanstveno tradicijo. Znanstvenikov niso več najemali za posamezno raziskavo v industriji, temveč so akademsko podkovani raziskovalci postali stalni nosilci razvoja v posebnih laboratorijih. Novost se je najprej uveljavila pri kemijskem podjetju Bayer, kjer je že od leta 1884 raziskoval kemik Karl Duisberg (1861-1934). Leta 1889 so se odločili, da ga bodo vključili v nov glavni znanstveni laboratorij, ki so ga odprli avgusta 1891. Leta 1897 so pri Bayerju ustanovili tudi biro za patente. Z novostmi pri Bayerju so se začela razvijati sodobna razmerja med znanostjo in industrijo, ki so jih kmalu sprejela tudi britanska kemijska podjetja in električna industrija.

Na ameriška podjetja je posebno vplival eksperimentalni elektrokemični laboratorij, ki so ga spomladi leta 1900 ustanovili pri GE po večletnih prizadevanjih Charlesa Proteusa Steinmetza (1865-1923), ki je že od leta 1890 raziskoval v računskem oddelku GE /9/. Kljub Steinmetzovi želji pa laboratorij ni bil povsem ločen od tovarne, saj ji je moral zagotavljati prostor na tržišču.

Sprva so se v laboratoriju GE ukvarjali z razvojem živosrebrne svetilke. Pozneje je direktor laboratorija GE Willis Whitney v talilni peči izboljšal lastnosti vlaken iz oglja in tako podjetju zagotovil tržišče za nekaj let. Kljub temu je v naslednjih letih konkurenca prisilila GE, da je kupal patente pri Siemensu. Zato so od leta 1906 brez uspeha preizkušali porabo kovinskih vlaken v žarnici, dokler ni William Coolidge prekosil konkurente z uporabo volframa. GE je ponovno osvojil tržišče; leta 1913 pa je Irving Langmuir preučil temeljne značilnosti žarnic. Tako je konec devetdesetih let GE obvladoval že 96% tržišča žarnic v ZDA /10/.

5 PRODOR TRANZISTORJEV V EVROPO

Anton Philips (1874-1951), mlajši sin ustanovitelja Philipsa Frederika (1830-1900), se je med obiskom v ZDA navdušil nad Langmuirjevo uspešno uporabo znanstvenih dosežkov za utrjevanje položaja podjetja na tržišču. Sklenil je slediti primeru GE. Zato so ustanovili oddelek za znanstvene raziskave Naturkundig Laboratorium (Nat. Lab.) s posebnim statusom znotraj podjetja Philips. Vodenje oddelka je v začetku leta 1914 prevzel Gilles Holst (1886-1968). Holst je končeval doktorat pri Heiku Kamerlingh-Onnesu (1853-1926) v Leydenu, ki je prav tedaj prejel Nobelovo nagrado za kondenzacijo helija. Pod Holstovim vodstvom so Philipsovi raziskovalci med obema vojnoma uspešno raziskovali uporabo polprevodnikov.

Med drugo svetovno vojno Philips ni opravljal raziskovanj, ki so v Bell Labs omogočila obvladovanje tehnologije čiščenja in dopiranja Ge in Si za uporabo v radarju. Nemška okupacija je postavila Philips tudi v izolacijo, tako da so se z ameriško tehnologijo Ge seznanili šele po vojni, ko je ob prvem obisku v ZDA van Verwey prinesel nekaj gramov Ge. Leta 1949 pa sta Ploos van Amstel in Wieringen že proizvajala polikristalinske Ge

diode z novo metodo, pri čemer sta veliko pozornosti posvečala čistosti materiala in stopnji dopiranja. Aprila 1955 so raziskave prerasle v novo tovarno, ki so jo postavili v Nijmegenu.

Koncentracija ameriških podjetij je ovirala evropski dostop do tržišča tranzistorjev. Leta 1948 je bil F.H. Stietjes pri Philipsu odgovoren za začetek raziskovanja tranzistorjev. Leta 1952 je že vodil skupino desetih raziskovalcev, ki so razvili tranzistor s točkastima stikoma in ga prenesli v razvojni laboratorij po Bellovem simpoziju aprila 1952. Med Philipsovimi evropskimi konkurenti sta se simpozija udeležila tudi nemški podjetji Telefunken in Siemens & Halske. Sodelovanje je omogočil Main Agreement iz leta 1947, ki so ga razširili 31.3.1952. Philipsov Nat.Lab. še ni obvladal tranzistor-ske tehnologije in je zato potreboval pomoč Bella in RCA, ki jih je obiskal J.C.van Vessem.

Na simpoziju so demonstrirali različne metode proizvodnje Ge kristalov, vendar so v Nijmegenu raje uporabili metodo zlitin podjetja RCA. Philipsu se je namreč mudilo, da bi pobude ne prevzela podjetja, ki pred tem niso sodelovala v proizvodnji elektronk. Med takšnimi sta bila, denimo, ameriški IBM in Geophysical Services, pozneje preimenovani v Texas Instruments, katerega vodstvo je prevzel Teal iz Bell Labs. Do konca leta 1954 je Philips obvladal novo tehnologijo, ki je vplivala na celotno podjetje. Najprej so sledili ameriškim odkritjem, nato pa so v Nat.Lab. z lastno metodo izdelali tranzistor z difuzijo v trdnini POB (Pushed Out Base), ki se je zelo dobro prodajal. Leta 1957 je že 35 raziskovalcev v Nat.Lab. in še 20 Philipsovih raziskovalcev v tujini raziskovalo polprevodnike. Philips je postal vodilno evropsko podjetje za raziskovanje polprevodnikov, vendar ga je ogrožala močna konkurenca. Ameriška podjetja so namreč ustanavljala svoje veje v Evropi, konkurenti pa so dobivali tudi mnogo vojaških naročil, ki so omogočala hiter razvoj.

Nizozemske univerze se kljub pogostemu sodelovanju s Philipsom sprva niso posebno zanimale za polprevodnike. Zato je bil Philips v zelo neugodnem položaju v primerjavi z Bell Labs. Čeprav je veliko Philipsovih strokovnjakov skupaj s samim Holstom občasno predavalo tudi na univerzi, je Philips svoje strokovnjake za polprevodnike moral usposabljal kar znotraj podjetja. Položaj se je izboljšal šele v začetku petdesetih let, posebno ko je leta 1952 G.W.Rathenau zapustil Philips in na univerzi v Amsterdamu postal prvi profesor fizike trdne snovi na Nizozemskem /11/.

Sredi devetdesetih let je Philips med evropskimi podjetji prodajal največ polprevodniških naprav, v svetovnem merilu pa je zaostajal za devetimi ameriški in japonskimi konkurenti.

6 PRVI TRANZISTORJI PRI NAS

Polprevodniki niso hitro prodrli v manj razvite dežele, kot je bila naša. Tako A. Wedam v svoji knjigi iz leta 1955 še ni obravnaval polprevodnikov in tranzistorjev, v tri leta starejši knjigi pa jim je Adlešič že obetal lepo prihodnost /12/.

Leta 1958 je Josip Lončar (1891-1971), redni profesor Elektrotehnične fakultete v Zagrebu, objavil razpravo o polprevodnikih, v kateri je obravnaval tudi lastne poskuse /13/. S tem je odprl vrata drugim raziskoval-

cem, tako da je dipl.ing.Zdravko Bendeković iz RIZ-Tvornice polprevodnika izdelal prvi domači Si tranzistor, ko jih je v Evropi izdeloval le SGS v Milanu /14/. Kljub temu so imeli domači raziskovalci še v poznih šestdesetih letih manj izkušenj s tranzistorji kot z elektronkami. Tranzistorizirane naprave so bile dražje, tako da je integriranih vezij pri nas še primanjkovalo /15/.

7 PRIHODNOST TRANZISTORJEV

Raziskovanje polprevodnikov je vseskozi prepletalo različne veje naravoslovja. V obdobju prevlade katodnih elektronk so polprevodnike raziskovali predvsem metalurgi in fiziki. Po odkritju tranzistorja so postale zanimive predvsem fizikalno-kemične lastnosti uporabljanih snovi. Tedaj je cena postala prevladujoč dejavnik, tako da so fiziki in tehniki določali razvojne usmeritve z opredelitvami potrebnih lastnosti izdelka. Končno so v proizvodnji integriranih vezij prevzeli vodilno vlogo konstruktorji vezij (circuit designers). Spremembe v industriji tranzistorjev so potekale tako hitro, da jim tudi marsikateri strokovnjak ni mogel slediti.

Gordon E. Moore je bil rojen v San Franciscu leta 1929. Študiral je na Berkeleyu in doktoriral na California Institute of Technology leta 1954. Kmalu po ustanovitvi se je leta 1956 pridružil Shockleyevim tranzistorjskim laboratorijem. Leta 1957 je soustanovil Fairchild, kjer je leta 1959 postal direktor razvoja. Leta 1968 je soustanovil družbo Intel za razvoj in proizvodnjo LSI (Large Scale Integrated Products). Intel je začel s polprevodniškimi spomini, že sredi devetdesetih let pa je med vsemi podjetji na svetu prodajal največ polprevodniških naprav.



Slika 4: Fotografija Gordona E. Moora v Proc. IEEE 86/1 (jan. 1998) str.204

Leta 1965 je direktor raziskovanja in razvoja pri Fairchild Semiconductors, fizikalni kemik Gordon E. Moore objavil, da izdelovalci tranzistorjev podvojijo število integriranih komponent v konstantnih časovnih intervalih. Trditev velja še danes. Če bi se sedanji čas podvojitve 18 mesecev obdržal tudi v bodoče, bi leta 2020 imeli tranzistorje reda velikosti 10 nm /16/.

Po Mooru naj bi prav v sedanjem času proizvodnja tranzistorjev v čipih preseгла število tiskanih črk v knjigah. S tem naj bi nov način komunikacije začel resno nadomeščati pol tisočletja starejši Gutenbergov izum.

LITERATURA

- /1/ Junction Field Effect Transistor (Kramer, n.d., str. 1205; Herring, n.d., str. 32).
- /2/ Herring, n.d., str. 29; Kramer, n.d., str. 1204; Trigg, n.d., str. 178; Vakuumist, 14/4 (1994) str. 23)
- /3/ John Northrup Shive (1913-1984) je opisal fototranzistor v Phys. Rev. 76 (1949) str. 575 (Shockley, M. Sparks in G.K. Teal, p-n Junction Transistors, Phys. Rev. 83 (1.7.1951) str. 152)

- /4/ Shockley et al., n.d., 1951, str. 152; Holonyak, n.d., str. 40
- /5/ Shockley et al., n.d., 1951, str. 153
- /6/ Bardeen, Brattain, n.d., 1948, str. 231; Shockley, Electrons and Holes in Semiconductors, D.van Nostrand Company Inc., New York, 1950
- /7/ Holonyak, n.d., 1992, str. 39; Bondyopadhyay, n.d., 1998, str. 196
- /8/ Holonyak, n.d., str. 39. Nasprotno mnenje je objavil Bondyopadhyay, W-Shockley, the Transistor Pioneer-Portrait of an Inventive Genius, Proc. IEEE 86/1 (jan. 1998) str. 207
- /9/ Rojen v nemški družini židovskega porekla v Breslau, današnjem Wrocławu. Po preselitvi v Švico in nato ZDA je spremenil svoje prvotno ime Karl
- /10/ Schopman, n.d., str. 141-146
- /11/ Schopman, n.d., str. 162 in 168-170
- /12/ Albin Wedam (1921-1997), Radiotehnika, 2. izdaja, DZS, 1955; Adlešič, n.d., str. 454-455 in 468-469
- /13/ Električna št. 1-2 in 3 (1958) 17 strani
- /14/ Biljanović, n.d., str. 183-184
- /15/ Aleš Strojnik, Peter Šuhel, Tranzistorizacija jugoslovanskega rutinskega elektronskega mikroskopa, EV, 35 (1968) str. 107
- /16/ Kramer, n.d., str. 1206

Nova knjižica DVTS

Vse več je izdelkov in tehnologij, kjer hermetičnost posod in cevni sistemov igra pomembno vlogo. Njihova večja ali manjša tesnost namreč zagotavlja primerno dobro vzdrževanje nadtlaka oz. podtlaka. Nevarna mesta, kjer netesnost (leak) lahko z veliko verjetnostjo pričakujemo, so najpogostejše: spojke, tesnila, varjeni in spajkani spoji, napake v materialu itd. Zaradi naraščajočih zahtev po kakovosti proizvodov (ISO 9000), se v tehniški praksi vedno pogosteje srečujemo s predpisi o preverjanju tesnosti. Ker je omenjena problematika v širši tehniški javnosti razmeroma slabo poznana, se je Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije odločilo organizirati Posvetovanje o netesnosti sistemov in naprav. Konferenca je potekala oktobra 1997 na IEVT-ju ob

lepem številu udeležencev (41) iz različnih slovenskih podjetij in ustanov. Predstavljenih je bilo 12 referatov, ki jih je organizacijski odbor pod skrbnim nadzorom urednice dr. Lidije Irmančnik Belič, recenzenta oz. lektorja dr. Jožeta Gasperiča in dr. Vinka Nemaniča, izdal v lični knjižici z 79 stranmi (format A4).

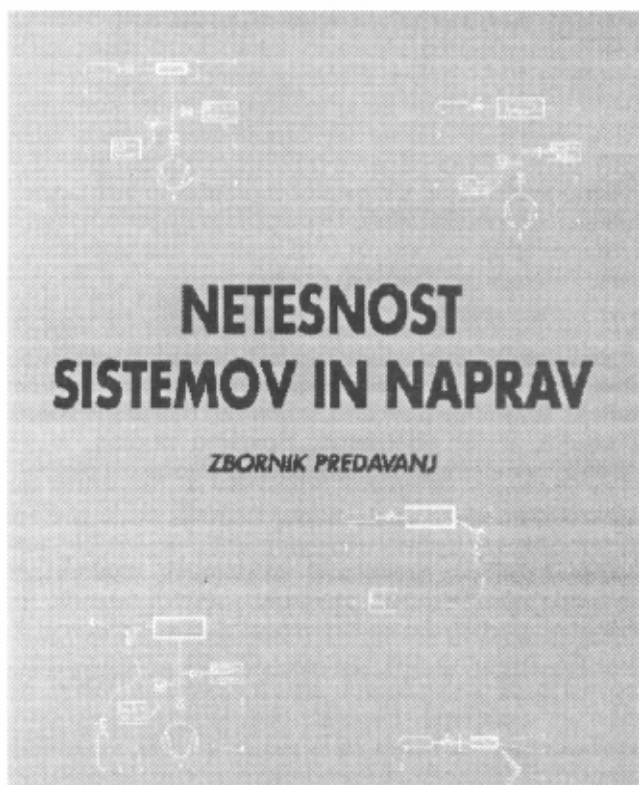
Zbornik z naslovom "NETESNOST SISTEMOV IN NAPRAV", ki dokaj dobro pokriva omenjeno tematiko, ima naslednjo vsebino:

- osnove vakuumске tehnike
- teorija črpanja posode oz. sistema in opredelitev velikosti puščanja
- vakuumski spoji
- metode odkrivanja netesnosti
- naprave za odkrivanje netesnosti
- helijev detektor netesnosti
- kalibracije vakuumskih merilnikov in detektorjev netesnosti
- preventiva in odpravljanje netesnih mest
- primeri odkrivanja netesnosti v praksi
- kontrola tesnosti, osnova za kvaliteto proizvodov
- odkrivanje netesnosti pri absorpcijskih hladilnikih
- tesnostni preizkusi v laboratoriju za plinsko tehniko.

V dodatku najdemo še slovarček pogosto uporabljenih izrazov, tabele o sposobnosti in lastnostih testnih metod, o pretvorbni faktorjih med enotami, o stopnjah netesnosti, o permeaciji He skozi plastične mase ter opis področij uporabe vakuumskih tehnologij in spisek standardov, ki se nanašajo na tesnost oz. netesnost. Tako zaokrožen zbornik nudi pregled postopkov, znanj in opreme za preskušanje tesnosti oz. za iskanje netesnih mest ter vso potrebno razlago. Menimo, da bo ta prva tovrstna slovenska knjiga, lahko dobro služila vsem, ki imajo opravka z netesnostjo sistemov in naprav.

Izšla je v nakladi 250 izvodov: prejemale jo bodo slušateljci na izobraževalnih tečajih s tega področja, možno jo je pa tudi kupiti v DVTS, Teslova 30, Ljubljana (tel. 177 66 00, cena je 4200 SIT).

mag. Andrej Pregelj



NASVETI

Priprava površine podlag pred nanosom tankih plasti - čiščenje

Priprava podlag pred nanosom tankih plasti vključuje čiščenje in modifikacijo njihove površine. Medtem ko s čiščenjem zmanjšamo koncentracijo nečistoč na sprejemljivo raven, pa z modifikacijo spremenimo nekatere lastnosti površin z namenom, da naredimo površino bolj kemijsko reaktivno, da spremenimo njeno morfološko ali mehanske lastnosti.

Čiste površine kovinskih podlag so osnova za ponovljivo pripravo tankih plasti. Meja med podlago in plastjo je tisto kritično mesto, kjer najpogosteje prihaja do poškodb. Ker absolutno čistih površin ne moremo pripraviti, se zadovoljimo s tehnološko čistimi. To so površine, na katerih je koncentracija nečistoč največ nekaj odstotkov enojne plasti. O čiščenju kovinskih površin smo v Vakuumistu že pisali /1-2/. V tem prispevku se bomo omejili na opis čiščenja podlag, na katere nameravamo nanesti tanke plasti.

Funkcionalne površine kovin so prekrte z več plastmi nečistoč, ki so rezultat proizvodnega postopka in reaktivnosti kovin oz. zlitin. Tako najdemo na površini poleg kovinskih oksidov (npr. rje) še različne organske nečistoče (olja, maščobe). Vezavna energija nečistoč se v splošnem zmanjšuje z oddaljenostjo od površine. Prekrivajo lahko vso površino (npr. oksidi ali adsorbirani ogljikovodiki) ali pa del le-te (npr. prstni odtisi). Čiščenje je postopek, s katerim zmanjšamo količino nečistoč na sprejemljivo vrednost. Pri tem ne sme priti do nezaželenih sprememb površine, kot je npr. preferenčno jedkanje ali mikrorazpoke. Prekomerno čiščenje pa je po drugi strani nepotrebno zapravljjanje časa in denarja.

Maziva, ki se uporabljajo v industrijski proizvodnji so netopna v vodi, dobro pa se topijo v organskih topilih, kot so ogljikovodiki, halogenidni ogljikovodiki, alkoholi, estri itd. Še zlasti dobro se topijo maziva na osnovi mineralnih olj, ki vsebujejo parafinske, izoparafinske in podobne ogljikovodike. Večina teh topil je netopnih v vodi, nekatera pa se v vodi delno ali v celoti topijo (npr. estri in alkoholni derivati). Ena skupina v vodi netopnih topil so halogenidni ogljikovodiki, ki vključujejo klorirane ogljikovodike in freone. Uporaba slednjih je zakonsko prepovedana, medtem ko smemo klorirane ogljikovodike iz zdravstvenih in ekoloških razlogov uporabljati le v posebej prirejenih prostorih in v zaprtih sistemih. Prednosti kloriranih ogljikovodikov so nizka temperatura vrelišča in viskoznost. Ker imajo majhno površinsko napetost, brez težav prodrejo tudi v majhne luknjice, kapilare in ozke reže. Nizka temperatura vrelišča kloriranih ogljikovodikov omogoča čiščenje v njihovih parah, kar pogosto zelo poenostavi ta postopek. Negorljiva sta le tetrakloreten in trikloreten. Temperatura, pri kateri se slednji vžge, je 410°C. Kovinski deli, ki jih čistimo s kloriranimi ogljikovodiki, morajo biti suhi, ker le-ti v kontaktu z vodo, kisikom ali svetlobo, tvorijo solno kislino, ki povzroča korozijo kovinskih podlag. Če čistimo material, ki je posebno občutljiv na

kislino, kot npr. aluminij, potem moramo dodati posebne inhibitorje. Čeprav je delo s kloriranimi ogljikovodiki drago in zahteva posebne varnostne ukrepe, se v praksi še vedno pogosto uporabljajo, ker je čiščenje z njimi zelo učinkovito.

Podlage najprej očistimo zunaj vakuumske posode (poliranje, peskanje, kemijsko čiščenje), medtem ko zadnja faza čiščenja poteka v vakuumskem sistemu za nanos plasti (pregrevanje podlag, plazemsko oz. ionsko čiščenje). Kemijsko vezane reakcijske plasti (npr. okside) odstranimo z abrazijskimi postopki (fino brušenje, poliranje, fino peskanje) ali z reaktivnim ionskim jedkanjem. Polarna topila, kot so voda ter mešanice alkoholov in vode, se uporabljajo za odstranjevanje polarnih kontaminantov, kot so npr. ionske soli. Napolarna topila, kot so klorirana topila, pa se uporabljajo za odstranjevanje nečistoč na osnovi ogljikovodikov (masti, olja). Topila na osnovi klor-fluor-ogljikovodikov so manj učinkovita kot klorirana topila, zato pa so manj toksična. Njihova slaba stran je tudi, da uničujejo plast ozona, zato jih poskušamo nadomestiti z drugimi. V svetu poteka v zadnjih letih intenziven razvoj novih postopkov čiščenja površin. Alternativa obojim so vodne raztopine ogljikovodikov brez klora in površinsko aktivna čistila.

Površine lahko očistimo tudi tako, da ogljikovodike na površini oksidiramo. Postopek čiščenja z oksidacijo je sprejemljiv le, če pri tem ne poškodujemo podlag. Tako je npr. žarjenje na zraku najboljši način čiščenja oksidne keramike. S 30% vodikovim peroksidom pa lahko učinkovito čistimo stekla in keramiko. Proces oksidacije je tudi osnova čiščenja oksidnih podlag s t.i. raztopino »piranha« (to je mešanica vroče, koncentrirane žveplene kisline in amonijevega persulfata). Učinkovito je tudi čiščenje površin z ozonom in ultravijolično svetlobo. Z UV svetlobo razbijemo vezi organskih spojin v nečistočah. Te pa potem z ozonom tvorijo hlapljive spojine. Prostor UV/O₃ lahko tudi uporabimo za shranjevanje očiščenih podlag.

Učinkovito čiščenje podlag je plazemsko čiščenje. V prostoru med elektrodama prižgemo kisikovo plazmo. Atomarni kisik, kisikovi ioni in ozon, ki pri tem nastanejo, oksidirajo površino, pri čemer nastanejo hlapni produkti, ki jih odčrpamo. Površine podlag, ki so občutljive na oksidacijo, pa čistimo v vodikovi plazmi.

Mokro jedkanje je sestavni del čiščenja podlag. Podlage bodisi omakamo v topilo, mehansko krtačimo ali brišemo, pršimo topilo pod majhnim ali visokim pritiskom, čistimo s kavitacijo v ultrazvočnih kopelih. Pri čiščenju podlag iz krhkih materialov v ultrazvočnih kopelih moramo biti pazljivi, da ne poškodujemo površine podlag. Zaradi efekta kavitacije lahko na površini nastanejo mikrorazpoke, ki poslabšajo oprijemljivost plasti. Temu se lahko izognemo, če zmanjšamo moč ultrazvočnih generatorjev in skrajšamo čas

čiščenja. Pri čiščenju v ultrazvočnih kopelih je zelo pomembna geometrija, zato moramo podlage pravilno in ponovljivo pritrditi.

Po kemijskem čiščenju moramo podlage najprej izprati v destilirani vodi (12 do 18 M Ω), nato pa takoj posušiti. Posušimo jih lahko tako, da jih omočimo v tekočini z visokim parnim tlakom (npr. izopropilalkohol), z vročim dušikom, ali kako drugače. Po čiščenju, izpiranju in sušenju podlage iz nekaterih materialov »pečemo« v vakuumu z namenom, da odstranimo adsorbirano vodo in topila. Izplinjanje podlag med nanosom plasti povzroči poslabšanje oprijemljivosti le-te na podlago. Čas in temperaturo, ki je potrebna za izplinjanje, lahko določimo iz meritev zmanjšanja teže vzorca med pregrevanjem (ASTM E-595 standard).

Očiščene podlage moramo shraniti v čistem prostoru. Očiščene podlage naj ne pridejo v stik z drugimi površinami, še zlasti ne, če so le-te polimeri. Za pasivno shranjevanje so najpriročnejše steklene posode, ki jih po polnitvi izčrpamo (eksikatorji). Za aktivno shranjevanje očiščenih podlag pa so najprimernejši prostori UV/O₃.

Potem ko podlage vgradimo v vakuumsko napravo za nanos plasti, je na njih še vedno adsorbirana plast ogljikovodikov ali pa plast naravnega oksida. Odstranimo jih z ionskim jedkanjem tik pred nanosom plasti, s čimer zagotovimo dobro oprijemljivost le-te na podlago.

Postopki čiščenja so že dolgo časa integralni del tankoplastnih tehnologij. Pri tem ni pomembno samo, katere nečistoče moramo odstraniti, ampak tudi v kolikšni meri jih odstranimo. Neizodostno čiščenje odločilno vpliva na oprijemljivost plasti in njene lastnosti. Pri izbiri postopka čiščenja podlag pa so pomembne še tri zahteve: a) postopek čiščenja ne sme biti predrag, b) biti mora zdravju neškodljiv in c) sprejemljiv z ekološkega vidika. Zlasti slednji dve zahtevi sta postali v zadnjih letih zelo pomembni.

Postopki čiščenja, ki so se doslej uporabljali v industrijski proizvodnji, so imeli globalne posledice za okolje: ozonske luknje, efekt tople grede in onesnaževanje okolja. Montrealski protokol je na tem področju prinesel pomembne spremembe. Klor-fluorove ogljikovodike in ogljikove kloride so raziskovalci nadomestili s številnimi manj nevarnimi kemikalijami.

Literatura

- /1/ M. Mozetič, M.Kveder, Vakuumist 29, N°4 (1992) 7-9
- /2/ J. Gasperič, Vakuumist 13, N°3 (1993) 27
- /3/ D.M.Mattox, Plating and Surface Finishing, Feb. 1993, 52-53
- /4/ B. Haase, J. Dong, Surface Engineering, Vol.14, N°1 (1998) 43-48
- /5/ S.S.Seelig, Metal Finishing, Mar. 1996, 2023

Dr. Peter Panjan,
Institut Jožef Stefan,
Jamova 39, 1001 Ljubljana

NOVICE

Strokovna ekskurzija članov Društva za vakuumsko tehniko Slovenije v sinhrotron ELETTRA v Bazovici pri Trstu

V torek 16. junija 1998 je sedemintrideset članov Društva za vakuumsko tehniko Slovenije obiskalo raziskovalni center ob sinhrotronskem pospeševalniku Elettra v Bazovici nad Trstom, ob slovensko-italijanski meji. Skupino je vodil Janez Kovač, dipl. ing. fizike z Inštituta za tehnologijo površin in optoelektroniko v Ljubljani, ki je že vabilo na ekskurzijo opremil z zanimivim zapisom o sinhrotronu Elettra. Tudi na potovanju je rad odgovarjal tako na laična kot tudi na strokovna vprašanja. To mu seveda ni bilo težko, saj je v svoji karieri preživel več kot tri leta v tem raziskovalnem okolju.

Organizatorji ekskurzije so za termin obiska namenoma izbrali čas, ko sinhrotron ni deloval. Nekako so upali, da si bomo zaradi tega lahko ogledali tudi prostore, kjer je linearni pospeševalnik in shranjevalni obroč. Videli smo del naprav linearnega pospeševalnika, medtem ko je bil prostor, kjer je shranjevalni obroč, iz nam neznanega razloga, nedostopen.

Na začetku obiska v Elettri so nam z video filmom v grobem predstavili sinhrotron in njegovo delovanje, sledil je obisk linearnega pospeševalnika, posameznih žarkovnih linij in nadzornega centra. Vodil nas je naš

rojak dr. Sandi Grulija, ki je v Elettri zadolžen za zaščito pred radioaktivnim sevanjem in varnostni nadzor.

Čeprav je bilo v Vakuumistu objavljenih že nekaj strokovnih člankov, ki so opisovali sinhrotron Elettra, ne bo odveč, če na kratko povzamem bistvene značilnosti te moderne raziskovalne naprave na pragu naše domovine.

Sinhrotron Elettra je zgradila Italija pretežno iz svojih sredstev pod vodstvom Nobelovega nagrajenca Carla Rubbia. Poizkusno je pričel obratovati leta 1993 z eno žarkovno linijo. Od leta 1994 normalno obratuje. Elettra je sinhrotron tretje generacije, ki ima glede na svetlost izsevane sinhrotronske svetlobe najboljše doslej poznane karakteristike. Podobna naprava v svetu je v tem času le ALS v Kaliforniji v ZDA. Je pa res, da gradijo Japonci in Američani novi napravi te vrste, kjer bodo uporabili tudi izkušnje, pridobljene pri gradnji in obratovanju Elettre. Elettra je pospeševalnik, ki pospešuje elektrone do energije 2 GeV. Elektroni s tolikšno energijo dosegajo skoraj svetlobno hitrost, kar pomeni, da za njih ne veljajo več Newtonovi fizikalni zakoni, ampak zakoni relativnostne teorije. Elektrone pospešijo v linearnem pospeševalniku dolžine 66 m, nakar jih z



Slika 1 Udeleženci ekskurzije pred sinhrotronom Elettra v Bazovici (Foto: A. Keber)

magneti utirijo v shranjevalni obroč s premerom 80 m, kjer elektroni krožijo v paketih. Z magneti, ter posebnimi napravami, imenovanimi vigleri in undolatorji, elektrone prisilijo, da sevajo elektromagnetno valovanje. To valovanje ima zelo veliko gostoto svetlobnega toka, je usmerjeno v majhen prostorski kot, hkrati pa je polarizirano in mu lahko poljubno spreminjamo energijo oz. valovno dolžino. Sinhrotron Elettra je specializiran za sinhrotronsko svetlobo v ultravijoličnem področju, mehko in srednje trdo rentgensko svetlobo z energijami od 10 eV do 20 eV, ki ji ustrezajo valovne dolžine svetlobe od nekaj desetink do nekaj nanometrov, kar omogoča vpogled v dimenzije atomske strukture materialov. V sinhrotronu Elettra, ki je doslej dokaj uporabniško naravnana raziskovalna naprava, potekajo raziskave na naslednjih področjih:

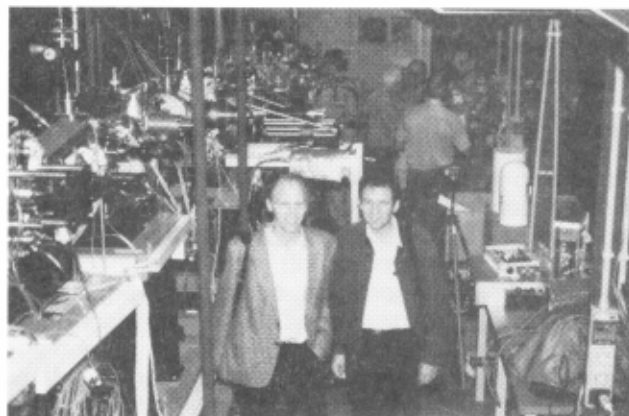
- fizika in kemija površin trdnih snovi in tankih plasti (ESCA)
- kristalografija makromolekul in amorfnih materialov, kot je študij strukture proteinov, DNA, virusov, tekočih kristalov, gelov itd. (SAXS)
- atomska fizika molekul v plinih
- raziskave rakastih novotvorb.

V pripravi je žarkovna linija za proizvodnjo integriranih in mehanskih elementov submikronskih dimenzij z metodo rentgenske litografije.

Vodja ekskurzije, gospod Kovač, nam je nekoliko bolj podrobno predstavil žarkovno linijo ESCA-Microscopy, na kateri še vedno sodeluje pri opravljanju poizkusov z visoko prostorsko ločljivostjo na površini in pri raziskavah faznih mej kovina-polprevodnik. Pri raziskavah na posameznih žarkovnih linijah sodeluje tudi nekaj drugih raziskovalcev iz Slovenije.

Obiskovalci smo z zanimanjem sprejeli informacijo, da je IEVT, v povezavi z Inštitutom za tehnologijo površin in optoelektroniko, razvil za Elettra nekatere vakuumске komponente (ionsko črpalko, vakuumski merilnik in ploščni ventil), ki bodo porabljene na eni od bodočih žarkovnih linij.

Elettra ima možnost prigraditve tiriindvajsetih žarkovnih linij oz. z razširitvijo do maksimalno dvaintrideset linij. Trenutno dela le deset linij. Na njih raziskujejo raziskovalci z vsega sveta. Raziskovalni projekt mora najprej



Slika 2 Udeleženci ekskurzije si ogledujejo eno od žarkovnih linij (Foto: A. Keber)

odobriti posebna komisija. Za sprejem projekta veljajo stroga merila. Na en sprejet projekt sta več kot dva odklonjena. Raziskave, ki jih je treba plačati, lahko naroči tudi industrija. Na tem področju menda ni čutiti pretirane gneče.

Omenjena je bila tudi žarkovna linija BOSS (Beam Line of Slovenian Scientists), ki bi jo naj gradila Slovenija. Vprašanje je le, če bo zmogla zbrati sredstva v višini več kot milijon dolarjev, kolikor znaša postavitev takšne linije.

V sinhrotronu Elettra je stalno zaposlenih 170 strokovnjakov različnih poklicnih profilov. Letni stroški vzdrževanja raziskovalnega centra so ocenjeni na trideset milijard lir, za kar prispevata sredstva Italija in Evropska skupnost.

Po obisku sinhrotrona smo odpotovali mimo raziskovalno znanstvenega centra AREA DI RICERCA v kraju Padriče, kjer so med drugim načrtovali sinhrotron Elettra, danes pa je ta center tudi valilnica novih podjetij visokih tehnologij, v Sežano in naprej v Šepulje. Na domačiji Bezek smo pod okriljem kmečkega turizma združili koristno s prijetnim. V sproščenem pomenku ob dobrih domačih specialitetah in žlahtni kapljici smo dostojno zaključili strokovno ekskurzijo, ki bo ostala vsem v lepem spominu. Organizatorjem gre vsa pohvala. S tovrstno dejavnostjo bogatijo horizont znanja in utrjujejo medčloveške vezi svojih članov, kar je danes, ko navadno nimamo več časa, da bi prisluhnili drug drugemu, še kako pomembno.

Alojzij Keber



BENO TOURS
Avtobusni prevozi in
organiziranje izletov

Beno Jesenko

Jezero 87

SI-61352 Preserje

tel: 061 632-066

tel/fax: 061 632-513

Mobilni telefon:
Bus 1: 0609 623-663
Bus 2: 0609 625-737

STROKOVNO SREČANJE MED DVTS IN DVTH

20. maja 98 smo se že peto leto zapored srečali hrvaški in slovenski raziskovalci in strokovnjaki, ki smo pri svojem delu vezani na vakuumsko tehniko. Konferenca je potekala v prijetnem vzdušju na Institutu Rudjer Bošković (IRB). Poleg dveh vabljenih predavanj, je bilo predstavljenih še 26 krajših (10 minutnih) predavanj. Vabljeni predavatelja sta bila prof. Stjepan Lugomer in doc.dr. Monika Jenko. Prof. Lugomer je imel predavnanj z naslovom: "Površinska samoorganizacija inducirana z laserskimi interakcijami na kratkočasovni skali". Doc. dr. Monika Jenko pa je predstavila delovanje in možnosti uporabe vrstičnega spektrometra Augerjevih elektronov na poljsko emisijo, ki je nova pridobitev na Institutu za kovinske materiale in tehnologije. Ostala predavanja so bila razvrščena po področjih in sicer takole: vakuumska znanost in tehnika (7), elektronski materiali (5), fizika plazme (2), fizika

površin (5) in fizika tankih plasti (9). V dvorani je bilo ves dan okrog 40 poslušalcev. V avli inštituta so razstavljali (predvsem prospektivni material) proizvajalci vakuumske opreme: K. Lesker, Pfeiffer, Leybold in Edwards. Tu smo v opoldanskem odmoru ob kavi in piškotih, nekateri pa tudi kar med predavanji imeli možnost malo pokramljati s hrvaškimi kolegi. Skupno smo še ugotovili, da je bilo naše 5. srečanje uspešno in koristno, in da moramo nadaljevati s to našo že tradicionalno aktivnostjo. Naslednje leto, ko smo na vrsti Slovenci, bomo srečanje verjetno priključili vakuumskemu dnevu Konferenca o tehnologijah in materialih, ki bo jeseni v Portorožu.

mag. Andrej Pregelj

LETOS ŽE DVA IZOBRAŽEVALNA TEČAJA

Po dveh "sušnih" letih (96 in 97), ko se je na razpise vakuumskih tečajev prijavilo po manj kot 9 kandidatov (kar je minimum rentabilnosti za izvedbo), se je letos situacija obrnila na bolje.

Zavedajoč se potrebe po izobraževanju kadrov, nas je vodstvo tovarne Danfoss-Trata d.d., ki proizvaja različne toplotne regulatorje in ventile, povabilo, da bi jim pripravili primerno usposabljanje s predavanji in demonstracijo. Ker morajo njihovi izdelki, mnogi polnjeni s specialnimi plini, zanesljivo biti tesni, hkrati pa jim prav tesnost predstavlja pomembno postavko v ceni izdelkov, smo urnik sestavili iz predavanj tečajev "Osnove vakuumske tehnike" in "Netesnost sistemov in naprav" ter dodali poglavje o plinih in plinski tehniki. Tečaj je potekal v njihovi tovarni (Stegne pri Lj.) 26. in 27. marca 98 vsak dan po 5 ur. Udeležilo se ga je 14 tehnologov in vodij

delovnih enot, s katerimi je na koncu stekel pogovor tudi o nekaterih njihovih konkretnih tehničnih težavah. Menili so, da bi bilo koristno v bližnji bodočnosti na podobna, morda malo skrajšana, predavanja povabiti še delavce in mojstre iz proizvodnje.

Letošnjega spomladanskega tečaja "Osnove vakuumske tehnike", ki je bil od 2 do 4. junija, se je prijavilo 9 slušateljev. Bili so iz naslednjih delovnih organizacij: Saturnus Lj. (2), Iskra-kondenzatorji Semič, Istragas Koper (1), IMT Ljubljana (1), Industrija usnja Vrhnika (1), Iskra-Varistor Lj. (1) in Fotona Ljubljana (1).

mag. Andrej Pregelj

Štipendija za leto 2000 iz Welcheve fundacije

Štipendija bo podeljena obetajočemu študentu, ki želi prispevati k študiju vakuumskih tehnologij ali njih aplikacij na kateremkoli področju. Štipendija se podeljuje z namenom, da bi podprla mednarodno sodelovanje z nudenjem možnosti, da bi izbrani-a kandidat preživel leto dni v raziskovalnem laboratoriju v drugi državi. Prednost bodo imeli kandidati, ki bodo pripravljene delati v drugi državi napram tistim, ki bi želeli ostati v matični državi.

Pogoji za pridobitev štipendije

Štipendija se podeljuje za eno leto z začetkom 1. septembra 1999. Če zaradi kakršnega koli razloga kandidat ne more priti s 1. septembrom, lahko prične v treh mesecih po tem datumu. V primeru zakasnitve več kot 3 mesece, se izbere drugega kandidata. Laboratorij, v katerem bi kandidat želel delati, mora zakasnitev glede nastopa dela predhodno odobriti. Štipendistu svetujemo, da si poišče še kak drug dohodek kot dodatek k štipendiji, vendar mora glede tega pridobiti odobritev od predsednika Welchevega odbora pri IUVSTA preden sprejme kakršnekoli dodatne dohodke. Običajno so te vloge vedno odobrene. Vrednost štipendije znaša okrog 12,500 USD. Štipendija bo plačana v treh obrokih. Prvi obrok \$6,000 USD na začetku, drugi 6,000 USD po šestih mesecih od pričetka dela in tretji 500 USD po izročitvi končnega poročila. Kratko poročilo se zahteva tudi pred izplačilom drugega obroka. Kandidat mora za željeno raziskovalno smer skleniti dogovor z izbranim laboratorijem. Zaradi mednarodnega značaja štipendije bodo imeli prednost tisti kandidati, ki bodo raziskovali v laboratoriju, v katerem še niso delali.

Obrazec, na katerem bo razviden raziskovalni program in bo podpisan s strani vodje laboratorija, v katerem bo potekalo delo, mora biti poslan vključno s pogodbo med laboratorijem in mentorjem. Kandidat za štipendijo mora imeti vsaj visoko šolsko izobrazbo, prednost bodo imeli kandidati z doktoratom.

Sprejemna procedura.

Kandidati dobijo vse potrebne formularje za štipendijo v fundacijski pisarni IUVSTA-WELCH na naslovu: **Dr W D Westwood, 7 Mohawk Crescent, Nepean, Ont K2H7G7, Canada**, Tel: 613-829-5790, Fax: 613-829-3061, e-mail: **westwood@istar.ca**. Kandidati za Welchevo štipendijo morajo oddati svoje prošnje pred 15. aprilom 1999. Vsak kandidat mora priložiti sledeče dokumente: (a) Curriculum vitae, (b) fotokopije vseh diplom, (c) ime in naslov izbranega laboratorija, (d) abstrakt (200 besed), v katerem bo opisano področje raziskav ki jih želi kandidat opravljati in pismo, iz katerega bo razvidno, da bo oprema v izbranem laboratoriju na voljo za raziskave. (e) izjavo, da ne bo kandidat v času štipendiranja kršil nobenega zakona države, iz katere prihaja, (f) izjavo, da ne bo kandidat v času štipendiranja kršil nobenega zakona v državi, v kateri bo bival, in da se ne bo vključeval v kakršnakoli politična gibanja, (g) dva priporočila od dosedanjih profesorjev ali direktorjev inštitutov.

Kandidati bodo obveščeni o odločitvi v najkrajšem možnem času, vendar najverjetneje pred začetkom avgusta 1999. Izbrani kandidat mora predložiti dokazilo o znanju tujega jezika in to jezika države, v kateri bo delal, ali o znanju angleščine.



NOVO! SERIJA **AGIL**

**DEWAR POSODE
IZ NERJAVNE KOVINE
S ŠIROKIM VRATOM
IN POKROVOM**



NUDIMO VAM CELOTEN PROGRAM DEWAR POSOD IN OPREME PROIZVAJALCA AIR LIQUIDE CRYOGENIE:

- POSODE ZA SHRANJEVANJE TEKOČEGA DUŠIKA 0,5 - 1000 L
- POSODE ZA SHRANJEVANJE VZORCEV V TEKOČEM DUŠIKU
- DEWAR POSODE ZA SUH TRANSPORT (ATEST ZA PREVOZ Z LETALOM)
- KRIODERMATOLOŠKI PROGRAM
- PODNOŽJA, VOZIČKI, PRETOČNE ČRPALKE, ZAŠČITNA OPREMA, ... ZA DELO S TEKOČIMI PLINI
- POKLIČITE NAS IN ZAHTEVAJTE KATALOG!

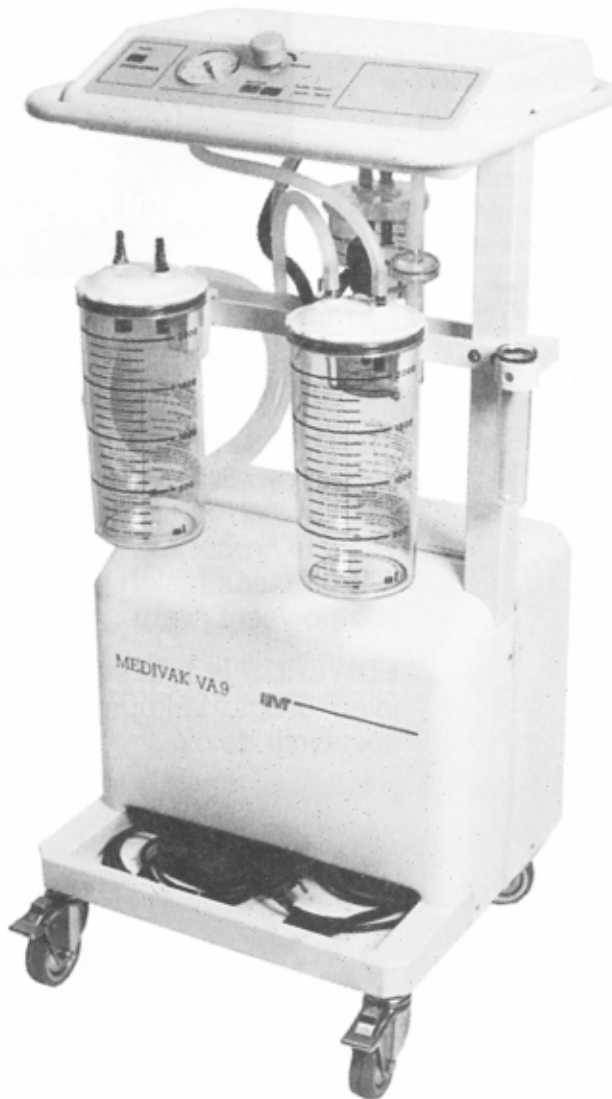


Scan, d.o.o.
Breg ob Kokri 7, 4205 PREDDVOR
Tel.: 064-458-020, Fax: 064-458-0240,
E-mail: scan@siol.net



INŠTITUT ZA ELEKTRONIKO IN VAKUUMSKO TEHNIKO

• MEDICINSKI PROGRAM



Proizvodni program na področju medicine združuje dejavnosti vakuumske tehnike in elektronike. Izdelki po skupinah so:

- aspiratorji - različni tipi glede na namen uporabe
- inhalatorji - različni tipi z različnimi razpršilci
- električni uničevalci rabljenih injekcijskih igel
- odvzemniki materinega mleka
- posebne žarnice: UV (baktericidne) in za fototerapijo

UPORABNIKI IZDELKOV:

- bolnišnice, zdravstveni domovi, privatne ordinacije in druge zdravstvene ustanove
- pacienti doma (predvsem inhalatorji in odvzemniki materinega mleka)

Odslej tudi na Internetu
<http://www2.arnes.si/guest/ljievv>



INŠTITUT
 ZA ELEKTRONIKO
 IN VAKUUMSKO
 TEHNIKO, d. d.

Teslova ulica 30, POB 59, 1001 Ljubljana Slovenija
 Tel.: (+386 61) 177 66 00, Faks: (+386 61)126 45 78
 Internet: <http://www2.arnes.si/guest/ljievv>
 e-mail: IEVT.group@guest.arnes.si

Vakuum

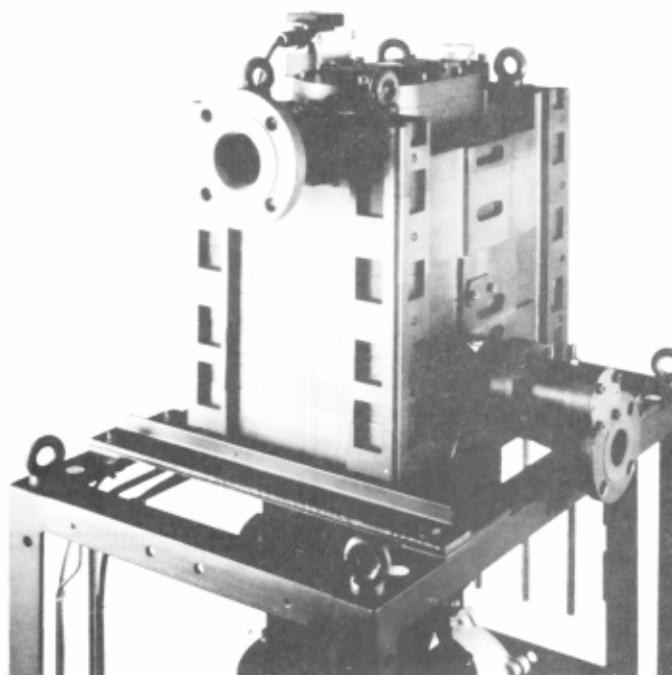
čiste, suhe črpalke



EKOLOŠKE
VAKUUMSKE
TEHNOLOGIJE
V
KEMIČNI
INDUSTRIJI

EDWARDS High Vacuum International je vodilni svetovni proizvajalec vakuumskih suhih rotacijskih črpalk. Te vrste črpalk so vgrajene v več kot 40.000 vakuumskih naprav, ki delujejo po vsem svetu.

EDWARDS je tudi svetovni proizvajalec drugih vakuumskih črpalk in sestavnih delov.



 **EDWARDS**

Zastopnik: **TERVAK**
Slavko Sulčić

R. Manna 20, 34134 Trst, Italija
Tel: 0039 336 442 780
e-mail: slavko.sulcic@siol.net

Dutovlje 37/B
6221 Dutovlje, Slovenija
fax: 386 (0)67 645 12

MEDIVAK

MEDIVAK, d.o.o.
Šolska ulica 21
SLO - 1230 Domžale

tel. fax : 00386 61 720450
GSM : 041 615 455
žiro račun : 50120-601-114647

Poslovalnica:
Dolsko 11
1262 Dol pri Ljubljani

tel. : 00386 61 372 659
GSM : 041 615 455
fax : 00386 61 372 382

ZASTOPSTVO SERVIS SVETOVANJE

LEYBOLD

- Vakuumske komponente in naprave
- Vakuumske tehnologije, trde in tanke plasti, analitika
- Kontrola vakuumskih naprav in sistemov
- Odkrivanje netesnosti
- Izposoja vakuumskih komponent
- 24 urni servis

PRODAJNI PROGRAM "LEYBOLD"

Vakuumske črpalke

- Rotacijske vakuumske črpalke s priborom
- Eno in dvostopenjske (1 do 1200 m³/h)
- Roots vakuumske črpalke - RUVAC (150 do 13000 m³/h)
- Membranske in ejektorske vakuumske črpalke - DIVAC 2,4 L
- Difuzijske črpalke (40 do 50.000 l/s)
- Turbomolekularne črpalke (50 do 4500 l/s)
- Sorpcijske črpalke, kriočrpalke, ionsko-getske in sublimacijske titanske črpalke

Vakuumski črpalni sistemi

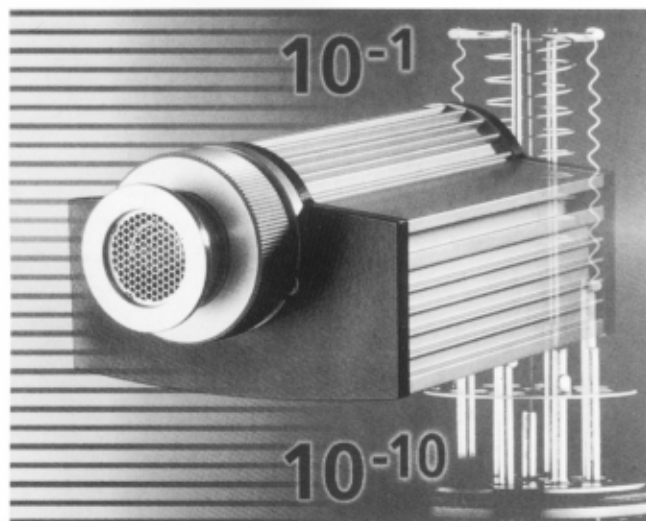
- za kemijsko in drugo industrijo

Vakuumski ventili

- Varnostni, dozimi
- Kroglični, loputni in UVV
- Prehodni in kotni KF, ISO-K, ISO-F

Vakuumski elementi in prirobnice

- Serije KF, ISO-K, ISO-F in UHF



Mehanske in električne prevodnice Merilniki vakuuma in kontrolni instr.

- Absolutni medtlaki in merilec delnih tlakov (od 1.10⁻¹² do 2000 mbar)

Procesni regulatorji

Detektorji netesnosti (puščanja)

- Helijski in freonski detektorji

Masni spektrometri s priborom

Vakuumska olja, masti, rezervni deli



Vsestranska linija mikrovalovnih naprav za raziskave in kontrolo kvalitete

MIKROVALOVNI RAZKLOP / EKSTRAKCIJA

MEGA

Mikrovalovna laboratorijska enota za vsestransko pripravo vzorcev za AA, ICP, ICP-MC

- vakuumsko sušenje
- kislinski razklop
- vakuumsko odparevanje kislin po končanem razklopu



MIKROVALOVNI SEŽIG

PYRO

Čas sežiga se skrajša iz ur na minute

PYRO SA

Hiter sežig organskih in anorganskih snovi z žveplovo (VI) kislino

PYRO FLOW

Hiter sežig raznih polimernih materialov



MIKROVALOVNO DOLOČANJE VODE/SUHE SNOVI

micro FAST

Mikrovalovni vakuumski sistem za določanje vode/suhe snovi

3-6 vzorcev v 6 minutah



MIKROVALOVI V ORGANSKI KEMIJI

ETHOS MR 2.5

Mikrovalovni reaktor

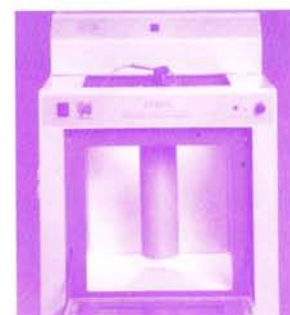
Delovni volumen: 420 ml
Tlak: 2,5 bar (35 psig)
Temperatura: 250°C



ETHOS MR 30

Mikrovalovni reaktor za reakcije pri visokih tlakih

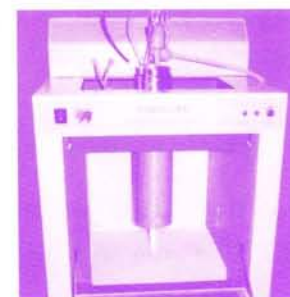
Delovni volumen: 375 ml
Tlak: 30,0 bar (427 psig)
Temperatura: 240°C



ETHOS CFR

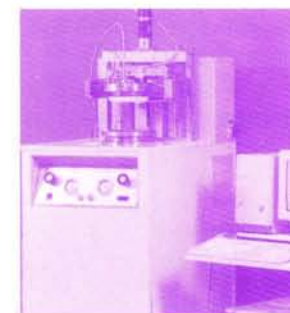
Mikrovalovni reaktor s kontinuirnim pretokom

Pretok: 10-50 ml
Tlak: 40 bar (570 psig)
Temperatura: 220°C



ultra CLAVE

Mikrovalovni avtoklav za reakcije pri visokih tlakih do 200 bar (2900 psig) in temperaturi 30°C



... PRIHAJAJO ŠE NOVE INOVACIJE



PODROBNEJŠE INFORMACIJE BOSTE DOBILI V PODJETJU

DR. NEMO, d.o.o.

proizvodnja, zastopstvo, tehnična podpora in svetovanje
Štrekljeva 3, Ljubljana
tel.: 061/125-11-05, fax: 061/125-11-10
elektronska pošta: dr-nemo@dr-nemo.si