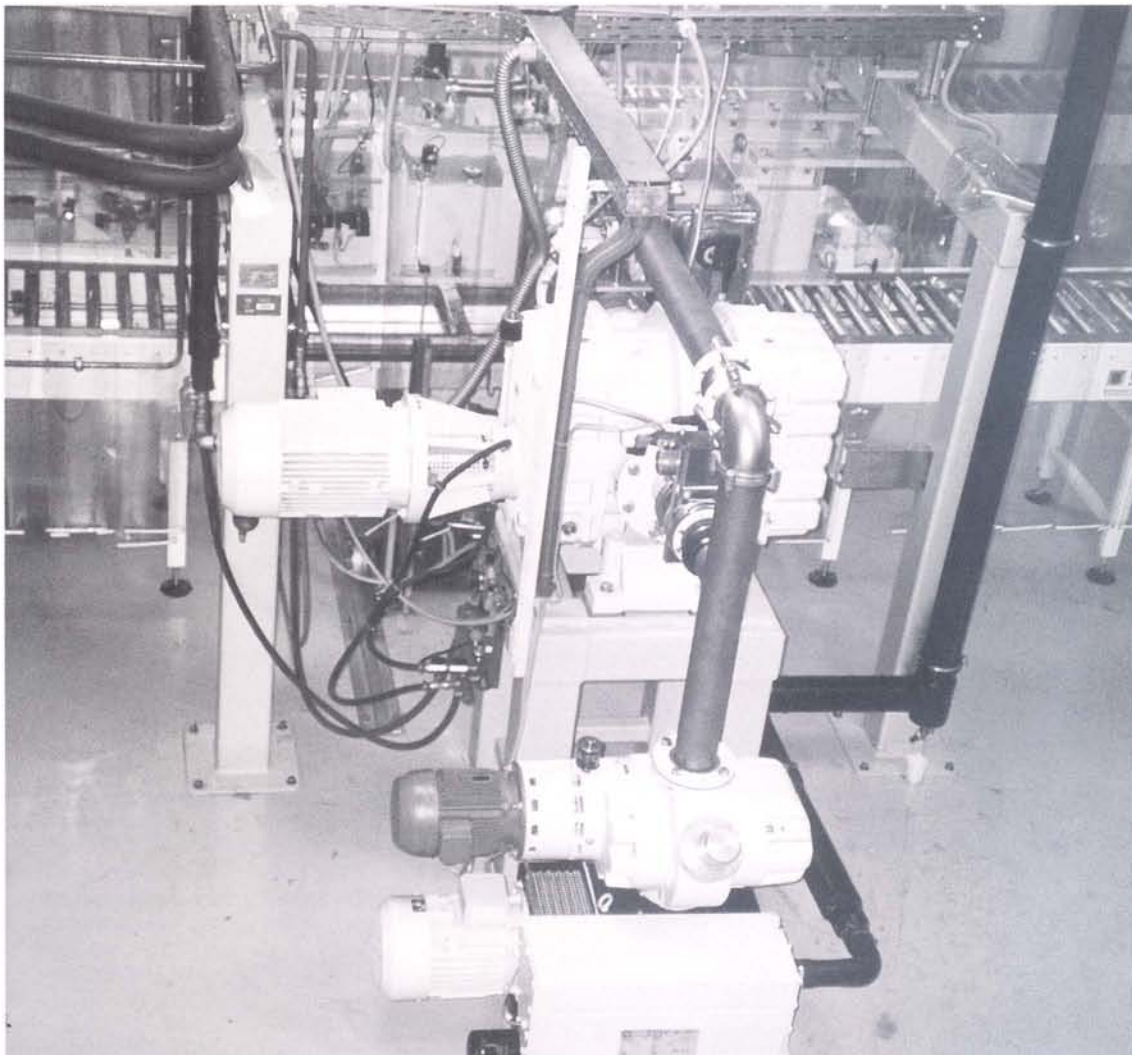


VAKUUMIST

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

LJUBLJANA, SEPTEMBER 98

LETNIK 18, ŠT. 3, 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 menujev
- 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

Industrijska uporaba plazemskih površinskih tehnologij (P. Panjan, T. Kralj, M. Mozetič, M. Maček)

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

Zgodovina raziskovanja plazme (I. del) (S. Južnič)

NASVETI (P. Panjan)

DRUŠTVENE NOVICE

Slika na naslovni strani prikazuje napravo za **plazemsko čiščenje in aktivacijo** reflektorjev iz duroplasta BMC pred lakiranjem. Omenjeni tehniki sta del tehnološkega postopka izdelave reflektorjev za avtomobilске žaromete v tovarni **Saturnus Avtooprema d.d.** v Ljubljani.

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), Janez Kovač, dipl. ing., 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, dipl. ing.
- 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

INDUSTRIJSKA UPORABA PLAZEMSKIH POVRŠINSKIH TEHNOLOGIJ

Peter Panjan, Teodor Krajč*, Miran Mozetič**, Marijan Maček***,

Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1001 Ljubljana, *Saturnus Avtooprema, d.d., Letališka 17, 1000 Ljubljana, **Inštitut za tehnologijo površin in optoelektroniko, Teslova 30, 1000 Ljubljana, ***Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

Industrial Applications of Plasma Surface Engineering

ABSTRACT

Application of low-temperature plasma processes in various industrial branches is rapidly increasing. They have been used for a long time in the production of microelectronics. Plasma makes possible or enhances PVD and CVD processes as well as surface modifications procedures. A well known industrial application of plasma is the pretreatment of plastic materials for painting and adhesive bonding. Restrictions in the use of halogenated hydrocarbons have promoted the use of plasma cleaning processes. Future applications are expected in the production of flat panel displays, 1 Gbit DRAMs, micromachining, biomedical devices etc. This paper gives an overview of the different methods of plasma treatment and their bandwidth of industrial application as well as the state of the art of plasma techniques in Slovenia.

POVZETEK

Uporaba nizekotemperaturne plazme v različnih vejah industrije naglo narašča. Že dolgo časa se plazemski postopki uporabljajo v proizvodnji mikroelektronskih vezij. Plazma je osnova PVD in CVD postopkov nanašanja tankih plasti in postopkov modifikacije površin. Znana je uporaba plazme za aktivacijo plastičnih materialov pred barvanjem za izboljšanje adhezije. Omejitve pri uporabi halogenidnih ogljikovodikov so odprle pot uporabi plazemskih postopkov čiščenja. Bodočo uporabo plazme lahko pričakujemo pri izdelavi ravnih zaslonov, 1 Gbit-nih spominskih elementov DRAM, pri mikroobdelavi, izdelavi biomedicinskih naprav itd. V članku podajamo pregled različnih plazemskih tehnik in njihovo industrijsko uporabo. Opisanih je tudi nekaj primerov uporabe plazemskih tehnologij v Sloveniji.

1 Uvod

Plazma je delno ioniziran plin. V zadnjih desetletjih je postala osnova številnih sodobnih tehnologij /1-6/. **Termično plazmo** (t.j. plazma, kjer so vsi delci plina v termodinamičnem ravnotežju - zgled: električni lok) uporabljamo za plazemsko rezanje in varjenje, za sintezo keramike, za razgradnjo nevarnih kemijskih odpadkov, za plazemsko pršenje debelih zaščitnih prevlek na orodja in strojne dele, v fuzijskih reaktorjih, itd. Bolj pogosto kot termična plazma se uporablja **termodinamsko neravnovesna**. Primeri uporabe so: vakuumski postopki nanašanja tankih plasti, industrija svetil, laserjev, mikroelektronika, makroelektronika (npr. plazemski prikazalniki), mikroobdelava silicija (npr. proizvodnja silicijevih senzorjev tlaka), proizvodnja spominskih elementov itd. Številni primeri uporabe so še v avtomobilski, optični in vojaški industriji ter v biomedicini. Na naštetih področjih uporabljamo nizkoenergijsko plazmo za eno od naslednjih treh plazemskih procesov: a) plazemsko jedkanje, b) nanašanje organskih (polimerov, amorfnega in diamantu podobnega ogljika) in anorganskih tankih plasti (kovine, polprevodniki, izolatorji), c) modifikacijo lastnosti površin (npr. omočljivost, biokompatibilnost, adhezivnost barv in črnila).



Slika 1 Plazemske tehnologije so osnova sodobne industrije

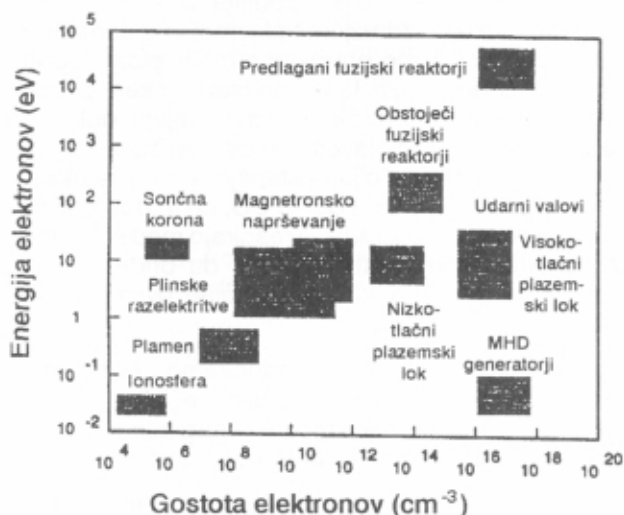
Plazemske tehnologije zagotavljajo visoko kvaliteto in ponovljivost tehnoloških procesov. To dosežemo z natančno kontrolo parametrov plazme, kot so tlak in pretok reaktivnega plina ali plinske mešanice, gostoto razelektrivne moči, temperaturo površine podlag in električnega potenciala na podlagah.

2 Kaj je plazma?

Prehod plina v stanje plazme dosežemo tako, da elektrone pospešimo v električnem polju (enosmernem, radiofrekvenčnem ali mikrovalovnem) do energije, ki jo potrebujejo, da ionizirajo atome oz. molekule plina /1-3/. Plazma lahko nastane v širokem območju tlakov. Razlikujemo **visokotlačno** (~1 bar) in **nizkotlačno** (10^{-3} - 1 mbar) **plazmo**. Glede na stopnjo ionizacije pa jo delimo na šibko in močno ionizirano. Pri nizkih tlakih, t.j. do nekaj milibarov, je povprečna prosta pot elektronov, ki se pospešeno gibljejo v električnem polju, velika. Število trkov z atomi plina pa je relativno majhno. Temperatura elektronov je v takih razmerah med deset in sto tisoč K, temperatura ionov oz. nevtralnih delcev pa je približno stokrat manjša. Takšna plazma je torej nizkotlačna (<1 mbar), nizkotemperaturna (glede na temperaturo ionov oz. nevtralnih delcev) in neravnotežna ($T_e \gg T_i = T_n$). Težji delci v plazmi (plinske molekule in ioni) imajo približno temperaturo stene razelektrivne posode (0,025 eV), medtem ko je energija elektronov precej večja (nekaj eV), zato lahko elektroni razbijejo kovalentne vezi in ionizirajo atome in molekule plina. Nastanek reaktivnih delcev (radikalov, ionov, molekul v vzbujenem stanju) v plazmi je torej posledica neelastičnih trkov med "vročimi" elektroni in atomi oz. molekulami. Verjetnost za ionizacijo je največja, če je energija elektronov 50 do 100 eV. Z magnetnim poljem

lahko stopnjo ionizacije bistveno povečamo. Nizkotlačna plazma se v naravi nahaja v medzvezdnem prostoru in ionosferi.

Pri visokih tlakih se zaradi pogostih trkov elektronov in atomov plina temperaturi obeh vrst delcev izenačita: $T_e = T_i = T_n$. Za takšno plazmo pravimo, da je visokotemperaturna in da je ravnovesna. Nastane npr. pri obločnem varjenju in pri jedrski fuziji. V naravi je visokotemperaturna plazma npr. na Soncu oz. na zvezdah in v strelah.



Slika 2 Razdelitev plazme glede na gostoto elektronov in njihovo energijo

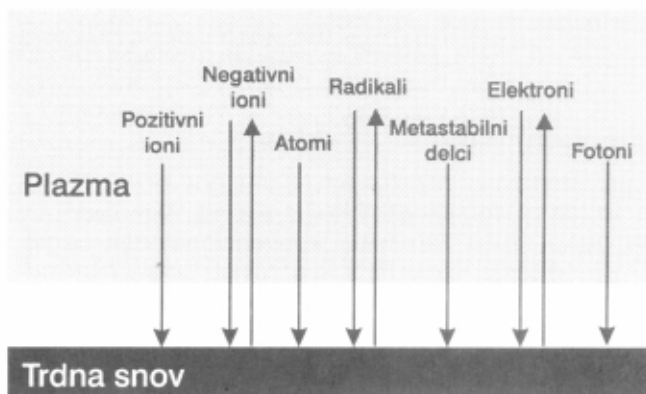
Plazma vsebuje nevtralne atome oz. molekule plina, vzbujene atome v nestabilnem oz. metastabilnem stanju, radikale, pozitivne in negativne ione in nove kemijske delce, ki nastanejo v plazmi, kot je npr. ozon, ki je kemijsko zelo aktiven. Plazmo označujemo z gostoto elektronov, ionov, radikalov in nevtralnih delcev, energijo elektronov in ionov (temperatura plazme) ter električnim potencialom plazme glede na površino podlag, ki so potopljene v plazmo. Pri prehodnih nestabilnih vzbujenih delcev plazme nastane v širokem frekvenčnem območju UV, vidna in infrardeča svetloba.

Delci in UV svetloba, ki nastanejo v plazmi, učinkujejo na površino obdelovanca. Radikali npr. lahko na površinah rekombinirajo, pri čemer se sprošča vezavna energija nekaj eV. Radikali ogljikovodikov lahko s površino podlage tudi kemijsko reagirajo, tako da se rekombinirajo z radikali ogljikovodikov na površini. Ta mehanizem je posebno pomemben pri razmaščevanju, aktivaciji in polimerizaciji. Tudi metastabilni vzbujeni delci lahko na površini podlage sprostijo vzbujevalno energijo (pri argonu je 11 eV). Ta se lahko porabi za desorpcijo atomov oz. molekul s površine, ali pa za kemijske reakcije. Elektroni iz plazme povzročajo desorpcijo adsorbiranih molekul in disociacijo molekul na površini podlag. Ker so giblivejši od ionov, jih prispe na površino podlag več kot ionov, zato se plazma naelektri pozitivno. Negativni naboj na površini povzroči nastanek potencialne razlike med predmetom in plazmo - t.i. plavajoči potencial. Ta potencial je od nekaj voltov za nizkoenergijske elektrone do več deset

eV za površine, ki jih obstreljujemo z visokoenergijskimi elektroni. Velikost potenciala med podlago in plazmo je določena s parametri plazme, kot so gostota in temperatura elektronov ter masa ionov. Potencialna razlika med podlago in plazmo pospeši ione, ki potem razpršujejo podlago in iz nje izbijajo sekundarne elektrone. Ob trku s površino se sprosti tudi ionizacijska energija ionov. Tudi UV žarki, ki nastanejo v plazmi, so energijsko zelo bogati. V spektru argonske plazme najdemo dve izraziti črti pri valovni dolžini 105 nm. Energija UV žarkov se porabi npr. za tvorbo radikalov na površini polimerov. Ker prodrejo globlje v podlago kot elektroni in ioni, povzročijo zamreženje polimerov po globini. Plasti, ki jih pripravimo s plazemsko polimerizacijo, se zato odlikujejo z izjemno visoko adhezijo na podlago.



Slika 3 Shematski prikaz reakcij, ki potekajo v plazemskih reaktorjih



Slika 4 Interakcija delcev plazme s površino trdne snovi

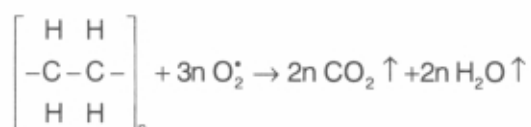
Vsi naštetih procesi v nizkotlačni plazmi omogočajo kemijske reakcije pri temperaturi pod 100°C, medtem ko pri atmosferskem tlaku iste reakcije potekajo pri temperaturi več sto stopinj Celzija. Nosilci energije so predvsem elektroni, ki v električnem polju med elektrodama zaradi velike proste poti in gibljivosti pridobijo veliko energijo (elektronska temperatura je med 20000 in 50000°C). Zato lahko v nizkotlačni plazmi obdelujemo materiale kot je npr. plastika, ki ne prenesejo velikih termičnih obremenitev.

3 Plazemsko čiščenje /1,7,8/

Potem ko je v zadnjih letih prišlo do omejitev pri uporabi halogenidnih ogljikovodikov, so v ospredje zanimanja prišli postopki plazemskega čiščenja. Plazemske postopke uporabimo predvsem, kadar je treba:

- popolnoma odstraniti organske nečistoče
- očistiti komponente, ki so sestavljene iz različnih materialov
- očistiti obdelovance s poljubno obliko in ko je
- mokro čiščenje nezaželeno.

Ioni, ki jih pospeši plazemski potencial proti podlagam, skupaj z elektroni, UV svetlobo in segrevanjem površine (ki je posledica rekombinacijskih procesov v plazmi), odstranijo adsorbirane delce na površini - govorimo o plazemskem čiščenju. Če je nosilni plin v plazmi reaktiven, potem segrevanje površine in obstrlejanje z energijskimi ioni pospeši kemijske reakcije na površini. Če so reakcijski plini hlapni, potem se površina očisti in proces imenujemo reaktivno plazemsko čiščenje. Zrak (20% O₂) in kisik sta reaktivna plina, ki se najpogosteje uporabljata za odstranjevanje nečistoč, kot so ogljikovodiki. Zgled kemijske reakcije ogljikovodikov s kisikom je:



Vodikova plazma pa se uporablja za čiščenje oksidiranih površin.

Obdelovanec izpostavimo za nekaj sekund oz. minut "hladni" plazmi, ki jo je enostavno vzdrževati in kontrolirati. S plazmo lahko obdelujemo predmete zelo kompliciranih oblik. Ker poteka proces v vakuumu, je poraba kemikalij neznatna, izhodni produkti pa so praviloma okolju neškodljivi plini oz. pare (npr. CO₂, H₂O). Zahtevam uporabnika se lahko prilagodimo z izbiro plina in parametrov plazme.

Kljub intenzivnim raziskavam na tem področju pričakujemo, da plazemski postopki iz ekonomskih razlogov ne bodo mogli zamenjati konvencionalnega kemijskega čiščenja, kadar imamo opraviti z zelo kontaminiranimi ceneni izdelki. Za mnoge zelo precizne strojne dele, prekrte s tanko plastjo organskega kontaminanta, pa je plazemsko čiščenje že zdaj ekonomsko sprejemljivo, hkrati pa okolju prijazno.

Odstranitev organskih nečistoč je posledica kemijske reakcije s kisikom iz plazme (govorimo o hladnem

gorenju). Ogljikovodikove verige pri tem razpadejo na končne produkte (CO₂, H₂O), ki jih odstranimo z vakuumsko črpalko. Z dodatkom ogljikovega fluorida (CF₄) ali žvepovega fluorida (SF₆) močno povečamo hitrost odstranjevanja organskih nečistoč. Tako zlahka odstranimo naravna olja in estre, težje pa npr. mineralna olja (ker nimajo esterske skupine, ki se najlažje cepi v plazmi). Eksperimentalno je bilo ugotovljeno, da pri višjih temperaturah poteka odstranjevanje organskih nečistoč počasneje in da tudi vrsta podlage vpliva na hitrost odstranjevanja organskih nečistoč. Tako je npr. najtežje odstraniti olje s podlage iz aluminija. Tudi energija, s katero vzdružimo plazmo, igra pomembno vlogo. Če uporabimo premajhne moči, plast nečistoč (npr. olja) pa je debela, lahko po plazemskem čiščenju ostanejo na površini strdki. To so neurejene polimerne plasti, ki nastanejo s plazemsko polimerizacijo olja. Pri delovanju plazme na olja nastanejo različni radikali, iz katerih nastanejo CO₂, H₂O in CO, če je dovolj kisika. Če pa kisika ni dovolj, radikali reagirajo med seboj tako, da nastane polimerizat. Pravimo, da pride do "zasmoljevanja" olj. Tudi grobe površine ovirajo proces plazemskega čiščenja.

S plazemsko tehniko lahko reduciramo okside kovin, oksikloride in sulfide, če je plast nečistoč relativno tanka. Neorganske nečistoče ne reagirajo s kisikom, zato jih na tak način ne moremo odstraniti.

Pomembnejša področja uporabe plazemskega čiščenja so:

- razmaščevanje električnih kontaktov
- čiščenje izvrtin v večplastnih tiskanih vezjih
- odstranjevanje fotorezista po suhem jedkanju
- sterilizacija v medicini in biologiji
- pasivizacija površine silicija
- nizkotemperaturna redukcija tankih plasti kovinskih oksidov
- čiščenje in pasivizacija površin arheoloških predmetov.

Glavne prednosti plazemskega čiščenja pred konvencionalnim so:

- kisik, ki se uporablja kot čistilno sredstvo, je poceni
- postopek poteka v zaprti komori in ne zahteva posebnih varnostnih ukrepov
- poraba kemikalij in energije je neznatna
- edini odpadni produkt so majhne količine okolju neškodljivih plinov, kot sta CO₂ in H₂O
- operaterji niso izpostavljeni nevarnim kemikalijam
- avtomatiziranje postopka plazemskega čiščenja je enostavno
- postopek je cenovno konkurenčen
- bistveno lahko izboljšamo omočljivost nepolarnih polimerov
- masti, olja, voske in druge organske nečistoče lahko odstranimo brez ostankov.

Slabi strani plazemskega čiščenja sta:

- relativno dolg čas obdelave (od nekaj sekund do več ur + čas, potreben za črpanje)
- anorganskih delcev ni mogoče odstraniti.

4 Plazemska obdelava površin polimerov /4,9,10/

Zaradi številnih prednosti (npr. masa, odpornost proti koroziji, nizka cena) so polimeri na številnih področjih zamenjali tradicionalne materiale, kot so kovine. Slaba stran polimerov pa je njihova majhna površinska energija (18,5 mN/m za politetrafluoretilen (teflon), 29 mN/m za polipropilen, 31 mN/m za polietilen, 40 mN/m za polivinilklorid, 46 mN/m za poliamid), ki je posledica nepolarnosti njihove površine. Majhna vrednost površinske energije polimerov je vzrok za slabo adhezijo barv, lepil, lakov in tankih plasti. Pred barvanjem, tiskanjem ali lakiranjem moramo zato takšne materiale dodatno obdelati s kemijskimi postopki v kombinaciji z UV svetlobo. Kemijski postopek aktivacije površine je zahteven, drag in škodljiv za okolje. Veliko bolj uspešen je postopek aktivacije površine plastike s plazmo. V plazmi pride do različnih interakcij le-te s površino polimera:

- vpadli ioni povzročijo desorpcijo molekul nečistoč in nastanek radikalov
- elektroni iz plazme lahko sprožijo disociacijo molekul ali celo prepletanje polimernih verig
- radikali plinskih molekul reagirajo na površini polimera, kar poveča reaktivnost le-te (v kisikovi plazmi nastanejo skupine, kot so -C=O, COOR, -OH, ki povečajo površinsko energijo in s tem omočljivost).

Mehanizem aktivacije je torej v bistvu nekompletna oksidacija polimerov, pri katerih vodikove atome nadomestimo s skupinami, kot so npr. -OH, O=C-O-. Pri takšni substituciji ne razgrajujemo ogljikovodikovih verig. Plazemska aktivacija mora potekati pri določenih pogojih. Predolg čas obdelave v plazmi je lahko škodljiv, ker nastanejo "kratkoveržne" prevleke s slabo adhezijo.

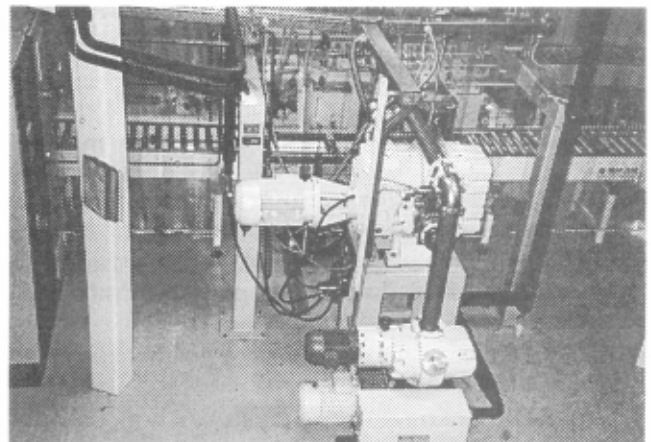
Pri pravilni plazemski obdelavi odstranimo adsorbirane molekule in šibko vezane plasti. Med plazemsko obdelavo nastanejo na površini polimera radikali, ki povečajo omočljivost barv oz. lepil. Pri nekaterih polimerih z argonsko plazmo zamrežimo polimerne verige med seboj in tako izboljšamo mehanske lastnosti površine.

Za aktivacijo površine polimerov lahko uporabimo nizkofrekvenčno, RF ali mikrovalovno plazmo. Pri obdelavi velikih obdelovancev s komplicirano obliko ima nizkofrekvenčna plazma izrazite prednosti, ker zagotavlja uniformno obdelavo po celotni površini, brez dodajanja posebnih elektrod za prilagajanje. Napajalniki so enostavni in relativno poceni.

V normalnih razmerah so lahko nekateri plazemsko obdelani izdelki iz polimera (npr. polietilen, polistirol ali polipropilen) brez škode shranjeni več kot 30 dni pred nadaljnjo obdelavo. Za nekatere druge polimere (npr. polioksimetilen) pa velja, da plazemski obdelavi obdelovancev takoj sledi naslednja tehnološka operacija (npr. lakiranje, tiskanje, nanos tanke plasti).

V primerjavi s kemijsko aktivacijo je plazemska manj selektivna. To nam omogoča obdelavo sestavnih delov, ki vključujejo zelo različne materiale (npr. plastiko, aluminij, jeklo).

Da lahko z nizekotlačno plazmo aktiviramo površino polimerov, so raziskovalci odkrili že na začetku šestdesetih let. Do industrijske uporabe tega postopka pa je prišlo šele v začetku osemdesetih let.



Slika 5 Naprava za plazemsko čiščenje in aktivacijo reflektorjev iz duroplasta BMC pred lakiranjem, ki jo uporabljajo v tovarni Saturnus Avtooprema d.d. v Ljubljani

Opišimo nekaj konkretnih primerov industrijske uporabe plazemskih tehnologij pri obdelavi plastike. V tovarni Saturnus Avtooprema uporabljajo plazmo za čiščenje in aktivacijo površine plastičnih reflektorjev za žaromete pred nanosom laka za izravnavo površine. Naprava, ki jo uporabljajo za plazemsko aktivacijo, je prikazana na naslovni strani. S plazemsko obdelavo površine plastičnih reflektorjev dosežajo dobro oprijemljivost in razlivanje laka.

V isti tovarni bodo v kratkem začeli uporabljati poseben plazemski postopek za aktivacijo utorov plastičnih ohišij žarometov, v katera z lepilom pritrdijo polikarbonatna "stekla". Plazemska aktivacija zagotovi dober oprijem lepila na plastično ohišje.

V Iskri Kondenzatorji v Semiču s plazmo obdelujejo plastična ohišja za kondenzatorje, da lahko nato nanje tiskajo z barvo. Tudi polipropilenske folije, na katere naparavajo plasti Al in Zn za kondenzatorje, pred nanosom obdelajo s koronsko razelektrivjo. To operacijo naredi njihov dobavitelj folije v Nemčiji. S koronsko plazmo obdelane folije so primerne za uporabo naslednjega pol leta.

Znan industrijski zgled uporabe plazme je tudi plazemska obdelava avtomobilskih odbijačev pred barvanjem. Pri izdelavi avtomobilskih pnevmatik pa s plazemsko aktivacijo polietilenskih tereftalatnih niti za ojačanje pnevmatik omogočijo adhezijo le-teh z gumo.

5 Plazemska polimerizacija /3,9/

Pojav plazemske polimerizacije so raziskovalci odkrili že sredi prejšnjega stoletja, ko so začeli raziskovati razelektritve plinov v električnem polju. Pri plazemski polimerizaciji se del ogljikovodikovih, fluoroogljikovih in organskih molekul (npr. acetilena, etilena, stirena ali benzena) ob navzočnosti kisika, dušika ali silicija, izloči na površini podlag in oblikuje polimerno plast. Katere reakcije so tiste, ki vodijo do plazemske polimerizacije,

še danes ne vemo zanesljivo. Tlak delovnega plina je navadno 0,1 do 10^{-4} mbar, električna moč razelektritve 10 do 300W, napajanje pa ali enosmerno ali v radio-frekvenčnem ali mikrovalovnem območju (GHz). Lastnosti plasti določajo poleg naštetih parametrov še tlak nosilnega plina, črpalna hitrost in geometrija reaktorja. Hitrosti nanašanja so navadno 100 nm/min in več.

Plazemska polimerizacija ima pred konvencionalno vrsto prednosti:

- polimerne plasti pripravimo iz skoraj vseh materialov, ki jih lahko uplinimo, tudi iz tistih, iz katerih s klasičnimi postopki ne moremo dobiti polimerov (npr. metan, benzol, ferocen, heksametil disiloksan)
- polimeri, pripravljene s plazemsko polimerizacijo, so visoko zamreženi. Zato so netopni in odlična difuzijska zapora za pline in tekočine
- polimeri, pripravljene s plazemsko polimerizacijo, so temperaturno izredno stabilni
- pripravimo lahko zelo tanke plasti (~ 10 nm), brez por in na poljubno oblikovane podlage
- plasti se dobro oprijemajo na večino tehnično zanimivih podlag.

Plazemska polimerizacija je včasih, kot npr. pri plazemskem čiščenju, nezaželen proces. Sicer pa je to postopek, ki ga uporabljamo za pripravo zaščitnih prevlek in najrazličnejših tankih plasti za tehnično uporabo. Do tehnične uporabe postopka plazemske polimerizacije pa je prišlo šele v tridesetih letih tega stoletja. Izolacijske organske plasti so takrat začeli uporabljati v elektronski industriji. Nekoliko pozneje so kot dielektrik na titanovi foliji za jedrske baterije uporabili polistirenske prevleke. Od začetka sedemdesetih let se ta postopek uporablja tudi za pripravo optičnih prekritij. Danes pa

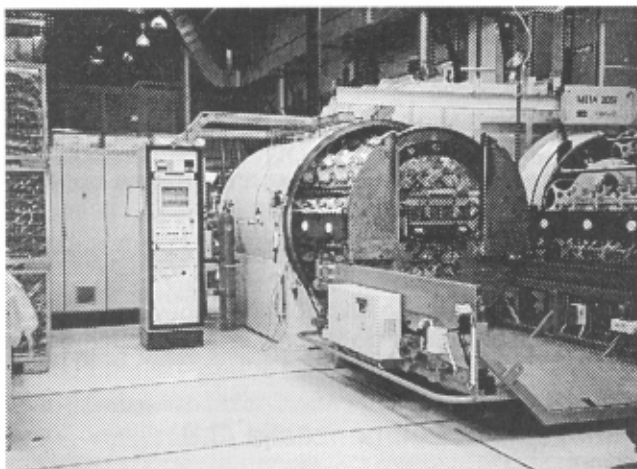
so področja tehnične uporabe zelo široka. V Sloveniji uporabljajo postopek plazemske polimerizacije v tovarni Saturnus Avtooprema v Ljubljani, kjer nanašajo zaščitne prevleke iz heksametil disiloksana (plasil) na reflektorje žarometov, na katere so pred tem naparili aluminijevo odbojno plast. Postopek poteka pri tlaku približno 0,5 mbar.

Da bi zmanjšali težo avtomobila, so tehnologi nadomestili vetrobranska konvencionalna keramična stekla in stekla žarometov s plastičnimi materiali, kakršna sta polikarbonat in polimetilmetakrilat. Takšna stekla vgrajujejo v žaromete tudi v tovarni Saturnus Avtooprema d.d. v Ljubljani. Slaba stran omenjenih materialov pa je, da niso odporni na razenje, na nekatera čistilna sredstva, bencin in podobno. Poškodbe površine plastičnih materialov lahko preprečimo z nanosom zaščitnih prevlek (npr. lakiranjem). Bolj elegantna rešitev je plazemska obdelava površine polikarbonatnih "stekel" s plazmo. V ta namen lahko uporabimo postopek plazemske polimerizacije. Polimeri v tankih plasteh, ki jih nanesemo s plazemsko polimerizacijo, so veliko bolj zamreženi kot masivni polimeri, kar je posledica fragmentacije plinskih monomerov v plazmi. Zato so plasti polimerov zelo goste in neporozne. Zaradi tega so odporne proti kemijskim napadom in so odlične zaporne plasti za tekočine in pline. Zaradi plazemske aktivacije površine podlag je adhezija na podlage odlična. Za dodatno zaščito na površino polikarbonatnih "stekel" s postopkom kemijskega nanašanja iz parne faze nanesemo tanko plast SiO_2 .

Znan je primer plazemske polimerizacije pri nanosu zaporne plasti na stene avtomobilskih plastičnih rezervoarjev za gorivo z namenom, da se zmanjša poroznost rezervoarja za bencin in vlago.

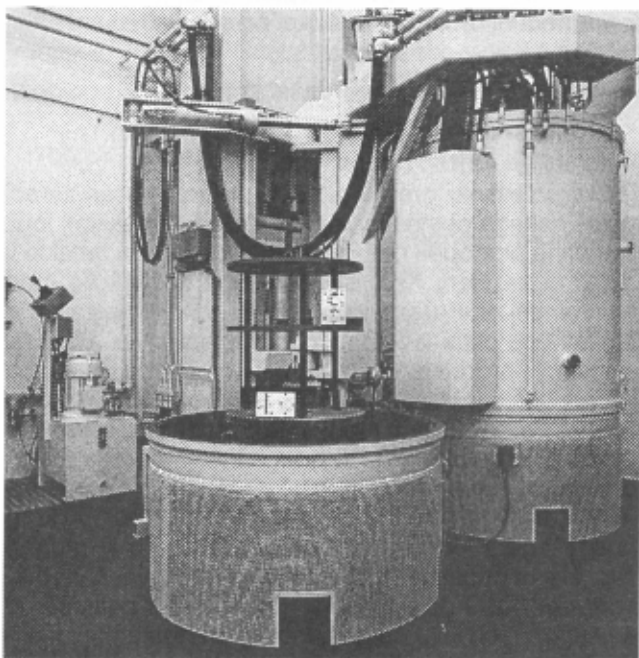
6 Plazemsko nitiranje /11-14/

Plazemsko nitiranje je postopek utrjevanja površin feritnih, titanovih in nekaterih drugih zlitin, ki temelji na segrevanju orodij in strojnih delov z ioni iz tlivne plazme ter na implantaciji in difuziji dušikovih ionov v notranjost podlag. Osnove segrevanja kovin s plazmo je že leta 1920 odkril Nemeč Franz Skaupy. Nekaj let pozneje je postopek plazemskega nitiranja predložil Američan Egan. Praktično pa ga je prvi uspešno preizkusil Nemeč Bernard Berghaus, ki ga je leta 1930 tudi patentiral. Plazemsko nitiranje poteka v vakuumski posodi, v katero uvajamo delovni plin (mešanica dušika in vodika) do tlaka nekaj milibarov. Z napetostjo 100-1500 V med katodo (podlage) in anodo (stene vakuumske posode) "prižgemo" plazmo. Plazemsko čiščenje orodij in strojnih delov poteka v plinski mešanici vodika (85%) in dušika (15%), proces nitiranja pa v plinski mešanici istih plinov, vendar v drugačnem razmerju koncentracij dušika (75%) in vodika (25%). Proces nitiranja poteka v področju t.i. **abnormalnega tlenja**, kjer je zveza med napetostjo in tokom približno linearna in je gostota toka nabitih delcev na površino enolično odvisna od napetosti in zaporedno vezanega upora. Značilne električne moči so od 0,5 do 0,8 W/cm² (pri tlaku $-1-8$ mbar). Maksimalne moči naprav za ionsko nitiranje dosežejo moč do 1 MW. V tem primeru je lahko masa podlag do 30 ton. Delovna temperatura podlag je 400 do 580°C. Če gostota toka doseže neko kritično vrednost, pride do nastanka plazemskega loka, ki poškoduje površino. Temu pojavu se izognemo tako,



Slika 6 Naprava, ki jo v tovarni Saturnus Avtooprema d.d. v Ljubljani, uporabljajo za nanos odbojne in zaščitne plasti na reflektorje žarometov. Al odbojno plast nanašajo z napajanjem, zaščitno plast na osnovi heksametil disiloksana (plasil) s plazemsko polimerizacijo in SiO_2 zaščitno plast z napajanjem.

da napetost pulzno spreminjamo s frekvenco nekaj deset kHz (govorimo o **nitriranju v pulzirajoči plazmi**). Poleg čiščenja in segrevanja površine, implantacije ionov v površinsko plast, odprševanja in adsorpcije nevtralnih atomov na površini se med plazemskim nitriranjem na površini tvori tudi plast železovih nitridov. Hkrati poteka difuzija atomov dušika s površine v notranjost. Pri tem se izločajo nitridi legirnih elementov (Al, Cr, Ti, V), ki utrdijo površino. Pomen plazme je torej v tem, da omogoča segrevanje podlag z ioni, čiščenje površine z ionskim razprševanjem in implantacijo dušikovih ionov pod površino, hkrati pa s tvorbo napak na površini podlag, ki so posledica ionskega obstrreljevanja, spodbudi difuzijo dušika. Plazemsko nitiranje je zato hitrejše od klasičnega plinskega nitiranja, nitiranja v solnih kopelih ali nitiranja v prahu (krajši je čas segrevanja in nitiranja). Dodatne prednosti plazemskega nitiranja so še: lažja kontrola sestave in debeline nitridne plasti, velika ponovljivost rezultatov, enakomernost debeline nitridne plasti, optimalna poraba energije in plinske mešanice, dimenzijska stabilnost podlag po nitiranju. Nasprotno od klasičnih postopkov nitiranja je plazemsko nitiranje okolju prijazno. Slaba stran plazemskega nitiranja je velika investicija v napravo. Kljub temu pa je plazemsko nitiranje ekonomsko sprejemljivejše od klasičnih postopkov nitiranja.



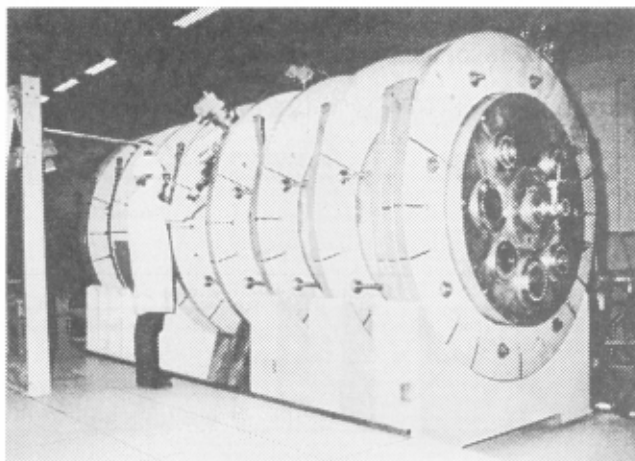
Slika 7 Naprava za pulzno plazemsko nitiranje na Institutu za kovinske tehnologije in materiale v Ljubljani

Poleg plazemskega nitiranja poznamo še nitrocementiranje in cementiranje v plazmi. Nitrocementiranje poteka v plinski mešanici vodika, dušika in metana, cementiranje pa v plinski mešanici vodika in metana.

Plazemsko nitirana orodja in strojni deli se v slovenski industriji uporabljajo že vrsto let.

7 Plazemska ionska implantacija /9,15/

Bistvo postopka je, da priključimo na obdelovanec negativno visoko prednapetost ("bias", od nekaj kV do 100 kV) v obliki pulzov, ki trajajo od nekaj mikrosekund do 150 μ s. Frekvenca ponavljanja pulza je od nekaj Hz do 3 kHz. Ioni iz plazme, ki obdaja obdelovanec, se pospešijo do energije, ki ustreza priključeni napetosti, in se vgradijo (implantirajo) v podlago. Proces poteka po vsej površini hkrati. V električnem polju, ki nastane v času trajanja pulza, se elektroni, ki so veliko gibljivejši od ionov, pospešijo proč od podlage in zapustijo cono, kjer se nahajajo samo ioni. Ta cona se širi, dokler traja pulz napetosti, potem pa se spet vzpostavi ravnotežno stanje. V naslednji periodi se proces ponovi. Plazmo v vakuumski posodi lahko vzpostavimo na različne načine. Ker ima plazma, ki jo pripravimo z enosmerno razelektivitvijo, majhno gostoto ionov, raje uporabimo radiofrekvenčno. Uporabljamo induktivno sklopitev, da se izognemo kontaminaciji sistema zaradi razprševanja elektrod pri kapacitivni sklopitvi. Zelo obetaven način, s katerim lahko ustvarimo gosto plazmo $10^{11}/\text{cm}^3$ temelji na elektronski ciklotronski resonanci. Mikrovalovno energijo dovajamo v komoro s številnimi hlajenimi antenami, magnetno polje pa ustvarjajo permanentni magneti, ki so razporejeni zunaj komore. Elektroni, ki sledijo magnetnim silnicam, vzbujajo izredno gosto, a "hladno" plazmo (povprečna kinetična energija elektronov je 2-4 eV).



Slika 8 Naprava za plazemsko ionsko implantacijo v Los Alamos National Laboratory /9/

Pri plazemski ionski implantaciji je temperatura podlage bistveno nižja kot pri difuzijskih procesih. Med plazemsko ionsko implantacijo se vgrajujejo vsi pozitivno nabiti delci iz plazme. Njihova energija ni enaka (energijska porazdelitev je odvisna od tlaka v vakuumski posodi in od oblike napetostnega pulza). Doza ionov, ki jo lahko dosežemo, pa je zelo velika (10^{16} ionov $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Problem so sekundarni elektroni, ki porabijo precej vhodne energije.

8 Pomen plazme pri nanašanju tankih plasti /16,17/

O pomenu plazme pri nanašanju vakuumskih tankih plasti smo v Vakuumistu že pisali /16/. Zato naj tukaj samo na kratko ponovimo. Pomen plazme pri nanašanju vakuumskih tankih plasti je naslednji: a) plazma je izvir elektronov in ionov, s katerimi lahko segrevamo podlage na zahtevano temperaturo; b) z ioni iz plazme jedkamo površino podlag, c) plazma aktivira kemijske reakcije med atomi iz izvira in reaktivnim plinom, d) s plazmo vplivamo na kinetiko rasti in s tem na strukturo in morfologijo plasti. Ključnega pomena je stopnja ionizacije atomov depozita in atomov reaktivnega plina ter njihova kinetična energija. S prednapetostjo ("bias") na podlagah lahko te ione pospešimo do poljubne energije, če je le podlaga električno prevodna. Uporabo prednapetosti pri nanašanju tankih plasti je prvi predložil Berghaus že v tridesetih letih. Pravilno je ugotovil, da lahko na tak način izboljšamo mikrostrukturo in adhezijo plasti.

Bistvena prednost kemijskih postopkov iz parne faze, ki potekajo v plazmi, v primerjavi s konvencionalnim pa je, da lahko na tak način bistveno znižamo temperaturo, pri kateri na podlagah raste plast. Znižanje temperature gre na račun aktivacije kemijskih reakcij s plazmo.

9 Uporaba plazme v mikroelektronskih in mikromehanskih tehnologijah /1-3,18,19/

Brez plazemskih postopkov prav gotovo ne bi bilo elektronske revolucije, ki se je pričela pred več kot tridesetimi leti. Plazma v mikroelektronskih in mikromehanskih tehnologijah se uporablja v glavnem za:

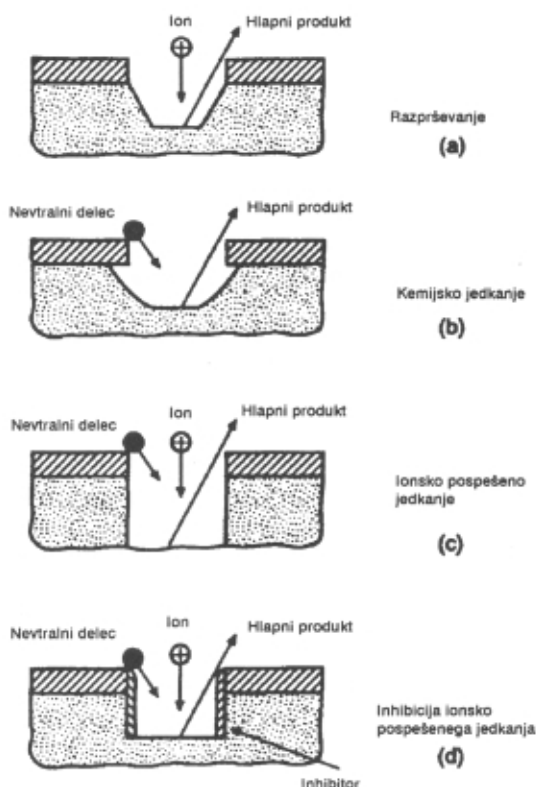
- plazemsko jedkanje
- plazemsko čiščenje (odstranjevanje fotorezista)
- plazemsko pospešen kemijski nanos tankih plasti iz parnih faz (PECVD) in
- plazemsko oksidacijo.

Navedeni postopki imajo že okrog 30% delež v mikro-tehnologijah. Pravzaprav si jih ne znamo več predstavljati brez uporabe plazme. Po drugi strani pa njihova uporaba drastično zmanjša onesnaževanje okolja z odpadnimi kemikalijami, kar se posebej izkaže pri odstranjevanju fotorezista v kisikovi plazmi. Vendar je treba poudariti, da pa le niso okoljsko povsem neškodljive, saj so lahko reakcijski produkti zelo strupeni. Primer je tvorba fosgena COCl_2 kot reakcijskega produkta v CCl_4 plazmi v navzočnosti kisika in vodnih par. Plazemsko jedkanje je brez dvoma najbolj kompleksen način uporabe plazme v sedanjih mikro tehnologijah. Brez njega si ne moremo predstavljati mikroelektronskih ali mikromehanskih tehnologij z dimenzijami pod nekaj mikrometrov oziroma z razmerjem debeline jedkane plasti proti lateralnim dimenzijam, večjim od približno 1:10. Plazemsko jedkanje namreč omogoči anizotropno jedkanje, pri katerem se plast jedka v izbrani smeri mnogo hitreje kot v drugih. Nasprotno pa je konvencionalno mokro jedkanje izotropno. To pomeni, da se polikristalina ali steklasta plast jedka v vseh smereh približno enakomerno. V postopku plazemskega jedkanja so vpleteni štirje med seboj konkurenčni procesi, prikazani na sliki 9 /1/:

- razprševanje
- kemijsko jedkanje (tvorba lahkohlapnih produktov)
- ionsko pospešeno jedkanje
- inhibicija ionsko pospešenega jedkanja

Pri *razprševanju* gre za povsem fizični proces zaradi površinskega obstreljevanja z visokoenergijskimi ioni. Ker pa je postopek neselektiven in povzroča defekte v snovi ni zaželen. Kemijsko jedkanje je reakcija med nevtralnimi energijsko vzbujenimi radikali, nastalimi iz jedkalnega plina v plazmi in jedkano snovjo. Rezultat so hlapni produkti, ki jih izčrpavamo. Proces je izotropen, odlikuje ga velika jedkalna hitrost, visoka selektivnost in izotropno jedkanje. Ionsko pospešeno jedkanje je kombinacija fizičnega in kemijskega učinkovanja, pri katerem so kemijske reakcije med nevtralnimi radikali na površini jedkanca močno (do 100 krat) pospešene z ionskim bombardiranjem. To je mnogo več, kot bi pričakovali za efekt razprševanja, sam mehanizem pa ni dobro znan. Postopek se odlikuje po anizotropnosti in je osnova modernih postopkov reaktivnega ionskega jedkanja (RIE).

Četrti proces, *inhibicija ionsko pospešenega jedkanja*, je tudi ionsko pospešeni proces, le da je njegov namen pasivacija površin, ki niso podvržene ionsko pospešenemu jedkanju. Rezultat je pasivacija stranskih površin, posledica pa je močno anizotropno jedkanje. Najpreprostejši primer je jedkanje Si v klorovi plazmi. Majhen dodatek kisika povzroči oksidacijo površin, ki niso izpostavljene bombardiranju z ioni. Po drugi strani pa oksid ne more nastati na površini, izpostavljeni ionskemu bombardiranju. Posledica je seveda, da se izotropno kemijsko jedkanje, ki je, zaradi mnogo večje koncentracije nevtralov od ionov v plazmi, vedno prisotno, lahko izvrši le v želeni smeri.



Slika 9 Shematična ponazoritev procesov med plazemskim jedkanjem /1/

Moderni postopki RIE so močno anizotropni, nasprotno od navadnega izotropnega plazemskega jedkanja. S pravilno sestavo jedkalnega plina (CF_4 , SF_6 , O_2 , Cl_2 , CCl_4), pravilno izbiro napetosti na podlagah in temperature lovimo ravnotežje med prej navedenimi procesi. Tako lahko poteka jedkanje povsem anizotropno, lahko je izotropno, mogoče pa je doseči tudi poljuben profil. Sodobni jedkalniki RIE omogočajo jedkanje dielektrične plasti (SiO_2 , Si_3N_4), polimerov, polprevodnih plasti (mono in polikristalinični Si, GaAs), kakor tudi prevodnih plasti (npr. Al). Za tvorbo plazme se navadno uporablja RF (13,56 MHz) plazma, vedno bolj pa se uporablja tudi RIE jedkanje, pospešeno z uporabo magnetnega polja (MERIE) in ECR (2,45 GHz) jedkanje.

Plazemsko čiščenje je postopek, podoben plazemskemu jedkanju, vendar se pri tem uporablja za jedkalni plin kisik. Tako se na čist način sežge neželena plast fotorezista. Uporablja pa se lahko RF, ali še bolje, mikrovalovna plazma.

Plazemsko pospešena kemijska depozicija (PECVD) anorganskih in polimernih plasti je tudi zelo pomemben del uporabe plazme v mikroelektronikah. Medtem ko je za doseganje kvalitetnih kemijsko nanesenih tankih plasti treba uporabljati temperature od 700 do 800°C, se da temperaturo z uporabo plazemskih tehnologij znižati na 300-400°C. To omogoča nanos dielektričnih plasti potem, ko je že nanesena prevodna plast Al.

Primeri so nanos pasivacijske plasti Si_xN_y z dodatkom vodika v RF plazmi. Reakcijo, ki poteka med nevtralnimi radikali, poenostavljeno opišemo kot:



Podobno se da z dodatkom N_2O nanesti oksinitridno plast, pa tudi čisti SiO_2 . Le-tega se da uspešneje nanašati v ECR-plazmi (2,45 GHz) ali z nanašanjem iz tetraetoksilana (tetraetilortosilikata) (TEOS), kar je osnova intermetalnih dielektrikov.

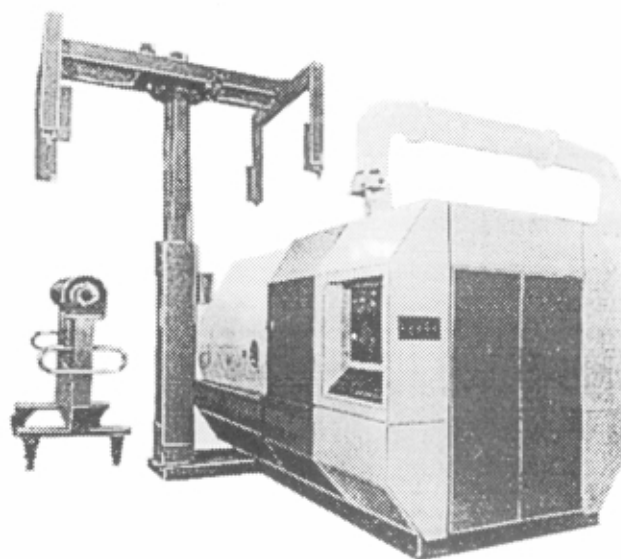
Obstajajo tudi postopki za PECVD nanos SiC, diamantu podobnega ogljika (DLC), diamanta in amorfne Si.

Plazemska oksidacija polprevodnikov je postopek, ki se že dolgo časa uporablja za oksidacijo silicija v mikroelektronikah z zelo veliko gostoto (VLSI). Ta postopek oksidacije poteka pri bistveno nižji temperaturi (300-500°C) kot termična oksidacija, s čimer se izognemo številnim nevšečnostim, kot je npr. difuzija težkih kovin v silicij. O plazemski oksidaciji govorimo, kadar kovinsko ali polprevodniško podlago potopimo v kisikovo plazmo (podlaga je na plavajočem potencialu). Mehanizem rasti oksidne plasti je termična difuzija. Debelina oksidne plasti je zato zelo majhna (manj kot 10 nm pri nizkih temperaturah). Če pa so podlage na pozitivnem potencialu glede na plavajoči potencial, potem je rast oksidne plasti pospešena zaradi tokov skozi oksidno plast. Govorimo o plazemski anodizaciji. Tako lahko pripravimo nekaj mikrometrov debele oksidne plasti. Hitrost rasti oksidne plasti pri 300-500°C je 1-10 nm/min. Pri termični oksidaciji dosežemo enako hitrost oksidacije pri bistveno višjih temperaturah (1100-1200°C).

Prednost plazemskih tehnologij v mikroelektronikah je tudi v tem, da omogočajo visoko ponovljivost rezultatov in da jih je možno avtomatizirati. Opisane plazemske postopke uporabljajo tudi v Laboratoriju za mikroelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.

10 Drugi primeri uporabe plazemskih tehnologij /6,9/

Strogi predpisi pri zaščiti okolja, ki so bili sprejeti v najbolj razvitih državah sveta, prepovedujejo uporabo mokrega kemijskega kloriranja, ki se v tekstilni industriji uporablja za izboljšanje tiskanja, barvanja in strojnega pranja naravnih (volnenih) in sintetičnih (poliesterskih) tkanin. Mokre kemijske postopke so zato tehnologji nadomestili s plazemskimi. V japonskem podjetju Unitika-Sando Iron Works so razvili napravo, s katero obdelujejo poliesterko tkanino v 13,56 MHz plazmi. Širina blaga je lahko 150 cm, hitrost, s katero potuje skozi napravo, pa je 50 m/min. Podobno napravo s še večjo zmogljivostjo (širina blaga 160 cm, hitrost obdelave 80m/min), ki so jo razvili v Rusiji, je namenjena za obdelavo volne. Wu in sod. /10/ so poročali o plazemski obdelavi svile. V plazmo so uvajali monomere akrilamida, ki so se vezali na svilo in spremenili njene lastnosti. Svila je postala odpornejša proti mečkanju in jo je bilo lažje kationsko barvati.



Slika 10 Naprava za plazemsko obdelavo sintetične tkanine (Technoplasma S.A.)

Plazemske tehnologije so zanimive tudi pri predelavi odpadkov. V ameriškem podjetju Energy and Environmental Research Center v Severni Dakoti so pred nekaj leti ob sofinanciranju NASE konstruirali prototip plazemske naprave za čiščenje kontaminirane zemlje, ki deluje pri nizkih temperaturah (10-40°C) /6/. V takšni napravi naj bi oksidirali vse organske kontaminante, kot so npr. nafta ali pesticidi, v končne produkte kot so CO_2 in H_2O . V reaktorju s prostornino približno 0,3 m³ in priključni moči 10 kW naj bi predelali približno tri tone zemlje na uro.

V Georgia Institute of Technology pa je raziskovalcem uspelo v visokotemperaturni plazmi (7000°C) pretaliti 13 kg azbesta v steklasto maso s 5-krat manjšim volumenom /6/.

Pri pregledu površine manjših sestavnih delov Swissair-ovih letal uporabljajo plazemske postopke za odstranitev debele plasti barve, da preverijo, ali so na površini vitalnih delov letala nastale razpoke, ki bi bile lahko usodne pri nadaljnji uporabi letala. V tem primeru plazemske tehnologije omogočajo učinkovito in okolju prijazno odstranitev barve /4/.

Plazma se uporablja tudi za sterilizacijo kovinskih delov in drugih materialov, ki se uporabljajo v medicini (npr. implantati). Bistvo plazemske sterilizacije je odstranitev organskih (bioloških) snovi pri nizkih temperaturah (govorimo o hladnem sežiganju).

11 Sklepi

Pomen plazme je zelo nazorno pojasnil eden od ameriških raziskovalcev, ki je dejal, da si lahko plazmo predstavljamo kot miniaturno kemijsko tovarno, ki lahko proizvaja nove materiale, kakršnih ni mogoče pripraviti po termodinamsko ravnovesni poti. Kombinacija prostih radikalov, nevtralnih delcev, ionov in elektronov torej ponuja nešteto možnosti za sintezo novih materialov.

Kljub velikim investicijskim stroškom bodo plazemski procesi postali cenovno konkurenčni konvencionalnim procesom, ko bodo plazemske tehnike vpeljane v velikoserijsko industrijo, npr. avtomobilsko, ki proizvede

nekaj milijonov avtomobilov na leto, proizvodnjo ravnih zaslonov itd.

12 Literatura

- /1/ Alfred Grill, Cold Plasma in Materials Fabrication, IEEE Press, New York, 1993
- /2/ B. Chapman, Glow Discharge Processes, John Wiley&Sons, New York, 1980
- /3/ J.L. Vossen and W. Kern, Thin Film Processes II, Academic Press, Inc., Boston, 1991
- /4/ R. Suchentrunk, G. Staudigl, D. Jonke, H.J. Fuesser, Surface and Coat. Tech., 97, 1997, 1-9
- /5/ H. Kaufmann, Surf. Coat. Technol., 74-75, 1995, 23-28
- /6/ M. Kenward, Physics World, June 1995, 31-33
- /7/ M. Mozetič, M. Kveder, Vakuunist, 12, 4, 1992, 7-9
- /8/ G. Liebel, Metaloberfläche, 45, 10, 1991, 443-449
- /9/ Handbook of Thin Film Process Technology, Ed. D.A. Glocker, S.I. Shah, Institut of Physics Publishing, Bristol, 1998
- /10/ Z. Wu, Y. Shi, H. Xie, Y. Chen, J. Zhang, J. Xu, H. Chen, Surface Engineering, 11, 1, 1995, 53-56 Bristol, 1995
- /11/ V. Leskovšek, Vakuunist, 15, 2, 1995, 4-10
- /12/ Saša Javorič, Magistrsko delo, Naravoslovnotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani, 1997
- /13/ Surface Engineering, Ed. K.N. Strafford, R.St.C. Smart, I. Sare, C. Subramanian, Technomic Pub., Lancaster, 1995
- /14/ F. Hombeck, T. Bell, Surface Engineering, 7, 1, 1991, 45-52
- /15/ W. Ensinger, Surface and Coat. Technol., 100-101 (1998) 341-352
- /16/ P. Panjan, B. Navinšek, Vakuunist, 15, 2, 1995, 11-15
- /17/ H. Randhawa, Thin Solid Films, 196, 1991, 329-349
- /18/ R. Gottscho, Physics Word, March 1993, 39-45 Lancaster, 1995
- /19/ D. Resnik, U. Aljančič, D. Vrtačnik, M. Cvar, S. Amon, Vakuunist, 17, 4, 1997, 4-10, in 18, 1, 1998, 4-11

Tabela 1 Primerjava plazemskih postopkov za obdelavo površin

Plazemski postopek	Temperatura podlage (°C)	Tlak (mbar)	Delovni plin	Debelina plasti (µm)	Plast
Plazemsko nitriranje	300-800	0,1-10	N ₂ , H ₂ , Ar, CH ₄	100-600	N-C dif. plast FeN, CrN, AlN
Plazemski CVD postopki nanašanja tankih plasti	300, 500-700	0.1-10	N ₂ , H ₂ , Ar, CH ₄ , TiCl ₄ , AlCl ₃ , CO ₂	1-10	TiN, TiC, TiCN, Al ₂ O ₃
PVD postopki nanašanja tankih plasti	100-500	10 ⁻⁴ -10 ⁻²	N ₂ , H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₂	1-10	TiN, TiC, Ti(C,N), TiAlN
Plazemska ionska implantacija	20-200	0,3	N ₂	<1	N-, C impl. plast
Plazemska polimerizacija	20-100	0.01-1	C _x H _y monomeri	1-100	polimeri
Plazemsko jedkanje	20-200	10 ⁻³ -1	He, H ₂ , Ar		
Plazemsko čiščenje	20-200	10 ⁻³ -1	Ar, H ₂ , O ₂		

SCHOTTKYJEVA BARIERA - MODERNI POGLEDI NA STAR PROBLEM II. del - TRANSPORT NABOJA SKOZI STIK KOVINA-POLPREVODNIK

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

Schottky barrier -modern views on an old
problem (Part II)

ABSTRACT

In the second part of the paper the transport mechanisms of the metal-semiconductor contact are discussed. An overview of the basic transport mechanism contributing to the current density through the ideal Schottky structure is given. An existence of possible additional charge transport mechanism due to the presence of the disordered interfacial control layer in ICB deposited Schottky heterostructures is further discussed. The influence of such a transport mechanism on the current-voltage characteristic is described.

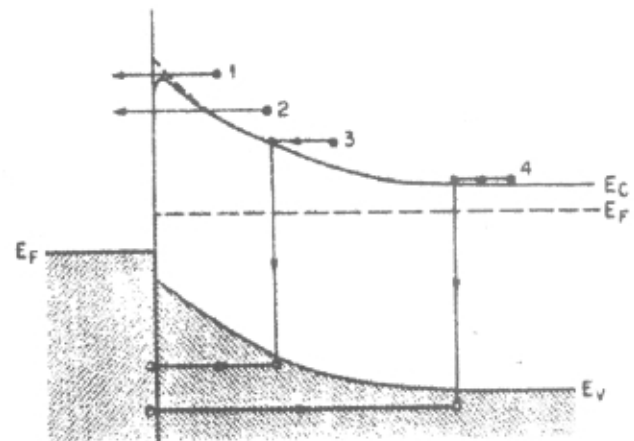
POVZETEK

V drugem delu prispevka opisujemo transportne lastnosti stika kovine in polprevodnika. V začetku je podan pregledni opis različnih mehanizmov prenosa naboja v idealni Schottkyjevi diodi. V nadaljevanju je opisan transport naboja v neidealnem stiku z vmesno kontrolno plastjo, ki nastane pri nanašanju z metodo CIS. Dodatni transport naboja v takšnih Schottkyjevih heterostrukturah lahko povzroči kontinuum elektronskih stanj, ki se pojavi na meji med neurejenim in urejenim delom polprevodnika. Opisan je vpliv takšnega transporta naboja na tokovno karakteristiko diode.

1 UVOD

Po opisu stika med kovino in polprevodnikom v termičnem ravnovesju v prvem delu prispevka [1], se v nadaljevanju ukvarjamo z opisom transporta naboja skozi stik, ko je priključen na zunanji izvir napetosti. S priključitvijo stika na zunanjo napetost se podre termično ravnovesje prevodniških elektronov in po zaključnem električnem krogu teče makroskopski tok. V primerjavi s p-n stikom je v stiku kovina-polprevodnik tok določen z večinskimi nosilci naboja za dani tip (n/p) polprevodnika (elektroni/vrzel). Ko stik kovine in polprevodnika kaže anizotropne električne lastnosti glede na smer toka, govorimo o Schottkyjevi diodi. Če pa je tokovna karakteristika (odvisnost toka od zunanje napetosti) v nekem območju zunanje napetosti linearna, je stik ohmski. Ohmski kontakt lahko nastane pri stiku kovine in polprevodnika, kjer je izstopno delo kovine manjše kot elektronska afiniteta polprevodnika ($\Phi_m < \chi_s$), tako da Fermijeva energija elektronov v kovini leži nad dnem prevodnega pasu v polprevodniku ali pa kjer je bariera dovolj ozka, da elektroni z lahkoto tunelirajo skozi njo.

Mehanizmi transporta naboja skozi idealni stik kovine in polprevodnika (v smislu definicije iz prvega dela prispevka [1]) so prikazani na sliki 1. Glavni mehanizmi transporta naboja v stiku kovine in polprevodnika so: prenos naboja čez vrh potencialne bariere, tuneliranje skozi bariero in rekombinacija v osiromašenem in nevtralnem področju polprevodnika. V idealnih stikih brez vmesne kontrolne plasti je pri višjih (sobnih) temperaturah najpomebnejši prenos naboja čez vrh bariere, pri nizkih temperaturah pa tuneliranje skozi bariero.



Slika 1: Mehanizmi transporta v idealnem stiku kovine in polprevodnika. Termoionska emisija in difuzija (1), termoionska poljska emisija in poljska emisija oz. tuneliranje skozi bariero (2), rekombinacija v depletiranem področju (3) in rekombinacija v nevtralnem področju (4). E_c je rob prevodnega pasu, E_v je rob valenčnega pasu, E_f je Fermijeva energija. Bariera je pri vrhu zaobljena zaradi vpliva zrcalnega potenciala elektrona. Po [2].

Gostoto toka naboja v Schottkyjevi diodi je mogoče zapisati s posplošeno obliko diodne karakteristike:

$$j = j_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{\tilde{E}}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

kjer je j_0 gostota toka v zaporni smeri ($U < 0$), ki je lahko odvisna tudi od zunanje napetosti, \tilde{E} pa je odvisen od posameznega mehanizma transporta. Skupna gostota toka je vsota vseh prispevkov različnih mehanizmov prenosa naboja.

2 TRANSPORT NABOJA V IDEALNEM STIKU KOVINE IN POLPREVODNIKA

Oblika bariere $E_c(z)$ na stiku kovine in polprevodnika je odvisna od porazdelitve prostorskega naboja v osiromašenem področju polprevodnika, če zanemarimo vpliv prostih nosilcev naboja in je rešitev Poissonove enačbe v depletiranem področju. Za konstantno gostoto naboja v depletiranem področju (kontinuumaska aproksimacija) $n(z) = N_D$ je bariera parabolične oblike:

$$E_c(z) = \Phi_b + \frac{e^2 N_D}{2\epsilon\epsilon_0} (z^2 - 2zw). \quad (2)$$

Tukaj je Φ_b višina bariere na meji med kovino in polprevodnikom, ϵ dielektrična konstanta polprevodnika,

$$w = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0(\Phi_b - eU - \xi) / e^2 N_D},$$

pa je širina depletiranega področja, ki je odvisna od zunanje napetosti U in razlike med dnom prevodnega pasu in Fermijevo energijo polprevodnika daleč od meje s kovino ξ /2/. Do začetka osiromašenega področja poteka transport elektronov iz notranosti polprevodnika zaradi prispevkov električnega polja in difuzije (drift-diffusion current). Za transport elektronov z energijo nad višino bariere, ki prehajajo mejo med kovino in polprevodnikom, pa je pomembno njihovo gibanje po depletiranem področju ob meji. Če ob tem doživljajo le malo trkov, lahko prehod skozi mejo opišemo s termično emisijo (podobno kot izhlapevanje elektronov iz kovine), v nasprotnem primeru pa z difuzijo skozi depletirano področje. Mehanizem prenosa naboja, ki se mu podreja večina elektronov, ki zadanejo ob bariero, določa razmerje med številom elektronov, ki jih zaustavi potencialna bariera, in številom elektronov, ki se zaustavijo s trki v barieri. Z drugimi besedami, primerjati je treba dolžino, na kateri se energija elektrona v barieri spremeni za kT s povprečno prosto potjo /3/. Povprečna prosta pot elektrona v siliciju je približno 7,6nm /2/, dolžina, na kateri se bariera spremeni za kT , pa je približno

$$d \approx L_{Di} \sqrt{N_i / N_D} \sqrt{kT / \Phi_b},$$

kjer je L_{Di} intrinzična Debyejeva dolžina (24 μm za silicij), N_i pa intrinzična gostota elektronov. Ob gostoti donorskih primesi $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ je $d \approx 0,6 \text{ nm}$, kar je približno desetina povprečne proste poti elektrona. V tem primeru je glavni mehanizem prenosa naboja termična emisija, kjer je gostota toka /4/:

$$j = A * T^2 \exp(-\Phi_b / kT) [\exp(eU / kT) - 1]. \quad (3)$$

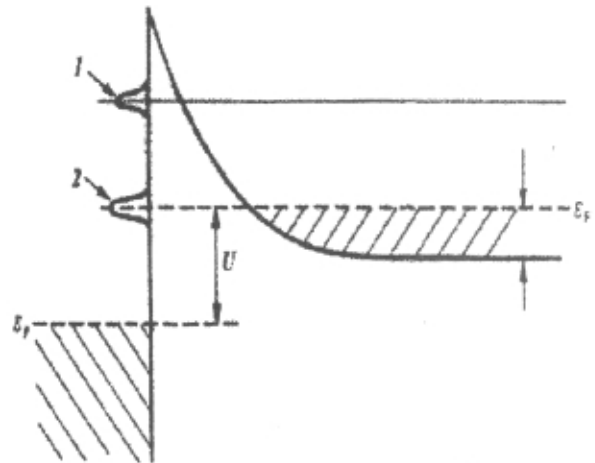
A^* je modificirana Richardsonova konstanta z efektivno maso elektrona v polprevodniku. V primeru, ko je glavni način prenosa elektronov čez bariero difuzija, je gostota toka /4/:

$$j = \frac{eN_c D_e}{w} \int_0^w \exp(E_c / kT) dz \quad (4)$$

N_c je efektivna gostota stanj elektronov v polprevodniku, D_e pa difuzijska konstanta. Tok v zaporni smeri je pri difuziji odvisen od oblike dna prevodnega pasu in tako tudi od zunanje napetosti ter ne doseže nasičenja.

Z nižanjem temperature se zmanjšuje tudi gostota prevodniških elektronov v prevodnem pasu in s tem tudi delež termične emisije oziroma difuzije v skupni gostoti toka. Pri nižanih temperaturah lahko postane v skupnem toku pomemben delež tunelskega toka, ki ga tvorijo elektroni, ki tunelirajo skozi potencialno bariero (2 na sliki 1), vendar le v degeneriranih polprevod-

nikih s Fermijevo energijo nad dnom prevodnega pasu (slika 2) /5/.



Slika 2: Termična poljska emisija (1) in poljska emisija (2) na stiku kovine in degeneriranega polprevodnika /5/

Velika koncentracija donorskih primesi pri degeneriranih polprevodnikih povzroči zraven povečanja gostote elektronov v prevodnem pasu tudi ožjo bariero in tako poveča prepustnost za tuneliranje. Pri zelo nizkih temperaturah večina elektronov tunelira pri Fermijevi energiji s poljsko emisijo (2, slika 2), pri zvišanih temperaturah pa elektronom pomaga termično vzbujevanje proti vrhu bariere pri termični poljski emisiji (1, slika 2). Za dovolj velike vrednosti zunanje napetosti ($eU > 3kT$) imata tudi poljska emisija in termična poljska emisija obliko (1):

$$j = j_{0,fe} \exp(eU / E_{00}) \quad (5)$$

$$j = j_{0,fe} \exp(eU / E_0)$$

kjer je E_{00} parameter pri poljski emisiji, odvisen samo od snovnih konstant polprevodnika, temperaturna odvisnost termične poljske emisije pa se pokaže skozi zvezo med E_{00} in $E_0: E_0 = E_{00} \coth(E_{00}/kT)$. Zaporna tokova sta pri obeh mehanizmih transporta funkciji višine bariere, parametra E_{00} in zunanje napetosti.

Prispevek drugih mehanizmov transporta naboja v vsoti posameznih tokov k prevladujoči termični emisiji se navadno opiše z empiričnim parametrom idealnosti n , tako da je gostota toka /4/:

$$j = j_0 \exp(eU / nkT) [1 - \exp(-eU / kT)] \quad (6)$$

kjer je j_0 zaporni tok pri termični emisiji. K povečanju faktorja idealnosti nad 1 prispevajo difuzija, rekombinacija, termična poljska emisija in puščanje diode pri robovih. Analiza merjenih karakteristik na osnovi zgornjega izraza za gostoto toka (6) je mogoča le, ko ni prispevka poljske emisije oziroma dokler za elektrone na stiku med kovino in polprevodnikom dobro velja Boltzmannova statistika. Vpliv drugih mehanizmov

transporta ob termični emisiji, se pokaže kot odvisnost nasičenja (t.j. tok za dovolj velike vrednosti zaporne napetosti) oziroma višine bariere od zunanje napetosti. V linearnem približku je zveza med spremembo višine bariere in faktorjem idealnosti naslednja:

$$n^{-1} = 1 - \frac{\partial \Phi_b}{e \partial U} \quad (7)$$

Lastnosti stika med kovino in polprevodnikom se navadno analizira z empiričnim izrazom (6) ob upoštevanju vpliva serijskega upora nevtralnega dela polprevodnika R_s na tokovno karakteristiko. Za dovolj velike vrednosti zunanje napetosti velja:

$$j = A * T^2 \exp(-\Phi_b / kT) \exp[e(U - IR_s) / nkT] \quad (8)$$

Pri določanju in interpretaciji lastnosti stika na osnovi gornjega izraza je potrebna velika previdnost. Pogosto dobro geometrično ujemanje izmerjene in izračunane tokovne karakteristike še ne pomeni, da lahko »apriori« sklepano na primarni mehanizem transporta na stiku brez podrobne fizikalne slike. Še posebej to velja pri neidealnih stikih, narejenih z metodami, ki lahko posegajo v samo strukturo kovine in polprevodnika.

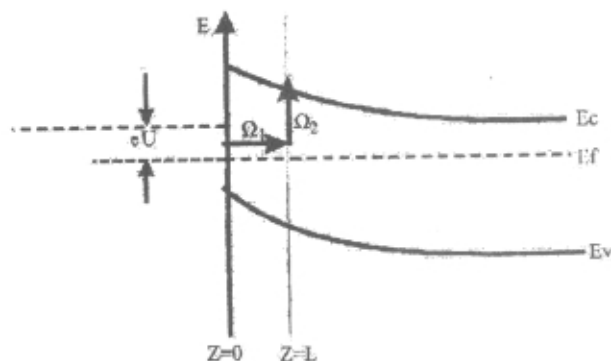
3 TRANSPORT NABOJA V SCHOTTKYJEVIH STRUKTURAH, IZDELANIH PO METODI CIS

Bistvena lastnost Schottkyjevih struktur, izdelanih s curkom ioniziranih skupkov atomov (CIS), je nastanek tanke (nekaj mrežnih razdalj v siliciju) neurejene plasti DICL (disordered interfacial control layer), katere lastnosti so določene s kovinskimi atomi, vgrajenimi v kristalno mrežo polprevodnika, in s kontinuumom lokaliziranih stanj v energijski reži DIGS (disorder induced gap states) na meji med DICL in urejenim delom polprevodnika /6/. Navzočnost DICL lahko močno vpliva tako na potencialno bariero v termičnem ravnovesju z vpetjem Fermijevega nivoja /1/, kot na transportne lastnosti. Vpliv DICL na tokovno karakteristiko CIS-Schottkyjevih struktur je dvojen:

- zaradi spremenjenega prostorskega naboja v DICL glede na idealno osiromašeno področje polprevodnika se spremeni oblika dna prevodnega pasu, kar vpliva na difuzijo po osiromašenem področju in termično emisijo čez bariero
- lokalizirana stanja v energijski reži polprevodnika omogočajo tuneliranje elektronov tudi pri energijah pod robom prevodnega pasu.

V modelu neidealnega stika kovine in polprevodnika je na meji kovina/DICL kontinuum elektronskih stanj v energijski reži MIGS, ki ga povzročajo repi v polprevodnik eksponentno padajočih valovnih funkcij elektronov in na meji DICL/urejen polprevodnik kontinuum lokaliziranih elektronskih stanj DIGS v razdalji L od meje s kovino. Transport elektronov se lahko odvije v dveh korakih. Ob negativni (zaporni) zunanji napetosti elektron z energijo E v prvem koraku elastično tunelira iz zasedenega MIGS-stanja v prosto DIGS-stanje, nakar se v drugem koraku termično vzbudi do dna prevod-

nega pasu, kjer postane prevodniški elektron. Opisani mehanizem je prikazan na sliki 3.



Slika 3: Transport naboja skozi energijsko režo polprevodnika v neidealnem kontaktu kovine in polprevodnika z neurejeno vmesno kontrolno plastjo

Celotni hamiltonijan stika kovine in polprevodnika lahko zapišemo kot vsoto posameznih prispevkov, ki opišejo kovino, urejeni polprevodnik in sklopitveno vmesno plast:

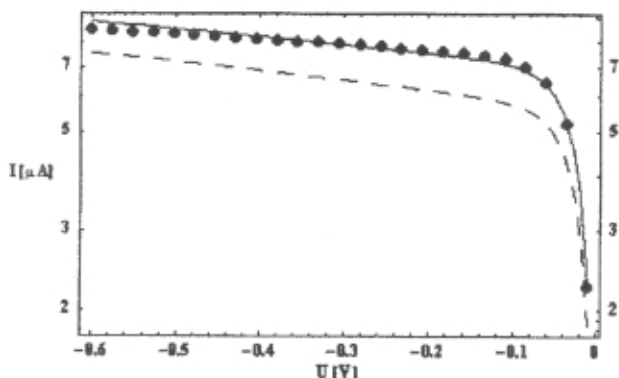
$$\hat{H} = \hat{H}_{\text{kovina}} + \hat{H}_{\text{polprevodnik}} + \hat{H}_{\text{DICL}} \quad (9)$$

Tuneliranje elektrona skozi vmesno plast je odvisno od gostote stanj na levi, gostote stanj na desni, zasedenosti obeh stanj, matričnega elementa sklopitvenega dela hamiltonijana in energije elektrona /7,8/. Podobno je prehod iz zasedenega DIGS-stanja odvisen od gostote stanj, energijske razlike med dnom prevodnega pasu in stanjem DIGS ter temperature. Tuneliranje zaradi DICL najbolj opazno vpliva na zaporni del tokovne karakteristike, ki je za takšen neidealni kontakt vsota gostot tokov zaradi idealne termične emisije (t.j. $n=1$), tuneliranja in puščanja, ki ga opišemo z ohmskim uporom R_I .

Vpliv tunelskega toka (slika 4) je bil izračunan ob naslednjih poenostavitvah:

- matrični element sklopitvenega dela hamiltonijana je konstanten
- lokalizirana elektronska stanja eksponentno padajo s konstantnim valovnim vektorjem q
- gostota stanj MIGS in DIGS je konstanta v energijski reži z enako lokalno Fermijevo energijo E_{HO} .

Polna črta pomeni gornjo vsoto prispevkov posameznih mehanizmov transporta k skupni gostoti toka, črtkana črta pa delno vsoto idealne termične emisije in toka zaradi puščanja stika. Parametri pri izračunu tunelskega toka so bili: višina bariere 0,7 eV (za stik Ag/n-Si), Fermijeva energija lokaliziranih stanj $E_{HO}=0,5$ eV, matrični element $H_{\text{DICL}}=0,1$ eV, širina DICL $L=2,5$ nm, valovni vektor lokaliziranih stanj $q=5$ nm⁻¹, gostota stanj MIGS in DIGS 10^{12} eV⁻¹ cm⁻², $R_s=20,2$ Ω, $R_I=3 \cdot 10^5$ Ω. Točke so izmerjene vrednosti stika Ag/n-Si(100), izdelanega po metodi CIS s pospeševalno napetostjo 600 V.



Slika 4: Vpliv tunelskega toka zaradi DICL na tokovno karakteristiko neidealnega stika kovine in polprevodnika. Črtna črta je idealna termična emisija in tok zaradi puščanja stika, polna črta pa vsota idealne termične emisije, tuneliranja in puščanja. Polne pike so izmerjene vrednosti za kontakt Ag/n-Si(100) pri 600 V pospeševalne napetosti kovinskih atomov.

4 SKLEP

Opisani so najpomembnejši mehanizmi transporta naboja na stiku kovine in polprevodnika. V idealnem stiku je pri polprevodnikih z veliko mobilnostjo najpomembnejša termična emisija nosilcev čez bariero pri zvišanih temperaturah. Prispevek drugih mehanizmov je navadno podan v obliki empiričnega parametra, faktorja idealnosti, ki opisuje odmik od idealne termične emisije.

V neidealnih Schottkyjevih strukturah, izdelanih po metodi curka ioniziranih skupkov atomov, je mogoč tudi transport elektronov zaradi vmesne neurejene kontrolne plasti s kontinuumom lokaliziranih elektronskih stanj na meji med vmesno plastjo in urejenim delom polprevodnika. Takšen tunelski tok pri energijah v energijski reži polprevodnika je odvisen od gostote lokaliziranih stanj in širine vmesne plasti ter matričnega elementa hamiltonijana, ki opisuje sklopitev kovine in polprevodnika preko vmesne neurejene plasti. Navkljub grobim poenostavitvam lahko takšen prispevek k skupni gostoti toka skozi stik dobro opiše posebnosti tokovne karakteristike stika kovina-polprevodnik, izdelanega po metodi curka ioniziranih skupkov atomov.

5 LITERATURA

- /1/ D. Korošak, B. Cviki, Vakuumist, 18, 1998, 17.
- /2/ S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices 2nd ed., John Wiley and Sons, 1981
- /3/ H. A. Bethe, Mass. Inst. Technol. Radiat. Lab. Rep. 43, 1942, 12
- /4/ E. H. Rhoderick, R. H. Williams, Metal-Semiconductor Contacts 2nd ed., Clarendon Press, 1988
- /5/ F. A. Padovani, R. Stratton, Solid State Electron. 9, 1966, 695
- /6/ B. Cviki, D. Korošak and Zs. J. Horvath, Vacuum 50, 1998, 385
- /7/ J. Bardeen, Phys. Rev. Lett. 6, 1961, 57
- /8/ W. A. Harrison, Phys. Rev. 123, 1961, 85

VABILO

Strokovna ekskurzija v Saturnus

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije (DVTs) obvešča svoje člane, da organiziramo

v četrtek 17. decembra ob 11. uri

ogled nove proizvodne hale v tovarni Saturnus-Avtooprema d.d. v Ljubljani.

Sodelavci Saturnusa nam bodo pokazali nove vakuumske naprave za proizvodnjo reflektorjev za avtomobilске žaromete (naparjevalnik META, napravo za plazemsko čiščenje in aktivacijo plastičnih reflektorjev). Ogledu bo sledilo predavanje dr. Mirana Mozetiča o pomenu plazme in plazemskih tehnologij v sodobni industrijski proizvodnji. Po predavanju bo še kratek občni zbor Društva za vakuumsko tehniko Slovenije.

Vse, ki se želite udeležiti ekskurzije, prosimo, da to sporočite Janezu Novaku ali Lidiji Belič z Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko (tel. 177 66 00).

Sicer pa se ob napovedani uri dobimo pred vhodom v tovarno Saturnus na Letališki 17.

A.P.

ZGODOVINA RAZISKOVANJA PLAZME (I. del)

Stanislav Južnič*

History of plasma research

ABSTRACT

The description of the scientific research in plasma physics from the first notions in cathode ray tube, until the modern approaches to the fusion reactors is given. First part of the article describes the beginning of plasma physics among researches of low pressure discharges.

POVZETEK

Opisujemo raziskovanje plazme od zgodnjih katodnih elektronk do sodobnih raziskovanj reaktorjev za zlivanje jeder. V prvem delu razprave opisujemo razvoj fizike plazme iz raziskovanja nizkotlačnih razelektritev.

1 Uvod

Antičnim Grkom se je zdelo, da je svet sestavljen iz štirih (vrst) snovi: zemlje, vode, zraka in ognja. Če so imeli pri tem v mislih agregatna stanja, je njihovo mnenje podobno današnjemu.

Baje je bil Prometej tisti, ki je dal ogenj ljudem, a je bil za to bridko kaznovan. V naslednjih tisočletjih je bil ogenj koristen in seveda tudi zanimiv. Vendar so šele v drugi polovici 19. stoletja raziskovalci obvladali visoke temperature pri visokih in nizkih tlakih.

Raziskovanje visokih tlakov je bilo posebno razvito v naši nekdanji habsburški monarhiji, kjer je dunajski zdravnik Johann August Natterer (1821-1901) od leta 1844 dalje dosegal tlake 3000-4000 bar in uspešno prodajal svoje naprave. Vendar se fizika plazme, ki praznuje ob koncu tisočletja šele sedemdeseto obletnico svojega poimenovanja, ni razvila iz raziskovanja visokih tlakov, temveč iz raziskovanja razelektritve plinov pri nizkih tlakih v katodnih elektronkah.

2 Šibko ionizirana plazma v plamenu

2.1 Faradayevi poskusi s plamenom

Raziskovanje plamena je postalo posebej priljubljeno po Faradayevih božičnih predavanjih za mladino:

"...Kateri brilijant bi se mogel kosati v blesku s plamenom? Brilijant se leskeče samo tedaj, če svetlobo odbija, plamen pa sveti tudi v temi..." /1/.

Faraday je opazoval slojevitost plamena, ki ga je, osvetljenega s sončno svetlobo, projeciral kot senco na bel papir /2/. Njegova prva, leta 1818 objavljena fizikalna razprava "o pojočem plamenu" različnih plinov v cevki je spodbudila mnoge nadaljnje raziskave.

Leta 1845 je začel Faraday raziskovati "magnetne lastnosti plinov". Njegova odkritja je dopolnjeval Plücker, ki ga je obiskal v Londonu leta 1848.

Diamagnetizem plamena je odkril genovski univerzitetni profesor fizike piarist Michele Alberto Bancalari, ki se je rodil leta 1805 v Chiavariju pri Genovi /3/. O svojem odkritju je poročal 21.7.1847 fizikalni skupini 9. zborovanja italijanskih naravoslovcev v razpravi o univerzalnosti magnetizma. Tri mesece pozneje je Bancalarijeve poskuse dopolnil Zantedeschi, profesor fizike in matematike na liceju sv. Katarine v Benetkah in član tamkajšnjega instituta. Ob Danielovi bateriji z desetimi elementi s premeri po 18 cm je imel prešibak magnet, ki je dvigoval le s silo 480 N. Zato je v Torinu naročil močnejši valjasti elektromagnet z železnim jedrom dolžine 33,5 cm in debeline 1,5 cm ovit s Cu vodnikom dolžine 33 m. Pola magneta je postavil na razdaljo 2,7 cm. Plamen sveče, oljne ali špiritne svetilke je naravnal tako, da je bil vrh štirikrat ožji od sredine.

Zantedeschi je dokazal, da magnet in ne zračni vrtinec neposredno odbija plamen. Vendar je diamagnetizem plamena povezal s Keplerjevo teorijo magnetnega Sonca, ki privlači planete. To se je uredniku Johannu Pogendorffu (1796-1877) ob natisu nemškega prevoda zdelo precej dvomljivo /4/.

Zantedeschi je poslal kopijo svoje razprave Aragoju v pariško akademijo in Faradayju v London, saj je poznal Faradayjevo raziskovanje diamagnetizma. Faraday je razpravo decembra 1847 skupaj s svojimi poskusi poslal v objavo Richardu Taylorju, uredniku Phil. Mag. Uporabil je veliko močnejši elektromagnet z valjastim železnim jedrom dolžine 1,17 m, premera 9,5 cm in oddaljenosti med poloma 15,2 cm. Bakreno navitje je bilo dolgo 1326 m s polmerom vodnika 4,3 mm. Dokazal je, da magnet vpliva na vse vrste plamenov. Dognal je, da sta vroč zrak in plamen bolj diamagnetna od hladnega zraka in se zato od njega ločita v toku proti polu magneta.

Faraday je zavrnil Zantedeschijev očitek, da je pripisal magnetne lastnosti le trdninam in kapljevinam, ne pa tudi plinom. Bancalarijevo odkritje je Faradayja prepričalo v temperaturno odvisnost diamagnetizma, ki ga je opazil le pri plinih, ne pa tudi pri trdninah in kapljevinah. Opravil je številne primerjave med diamagnetnostjo različnih plinov v odvisnosti od temperature /5/. Tako je dopolnil Zantedeschijevo ugotovitev, da je kisik med najbolj diamagnetnimi plini /6/.

Faraday je dokazal, da se diamagnetizem pojavi "predvsem zaradi segretega stanja plinastega dela plamena". Raziskovanje diamagnetnosti plinov pri sobni temperaturi pa je Faraday po okrevanju tri leta pozneje nadaljeval z meritvami v atmosferi /7/.

Lastnosti plamena so zanimale tudi Karla Ferdinanda Brauna (1850-1918). Med decembrom 1877 in 1878 je na univerzi v Marburgu nadaljeval Hittorfova (1869) raziskovanje razprševanja katode in električne prevodnosti plinov v Geisslerjevi elektronki. Z meritvami "unipolarnosti", večje prevodnosti plamena v eni smeri kot v drugih, je nadaljeval delo Herwiga (1877), Hoppeja, Hittorfa (1869) in Alexandra Edmonda Becquerela. Braun je domneval, da električni tok ne premika samih delcev plamena, temveč poteka prevajanje podobno kot v kapljevinah /8/.

* 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.

2.2 Raziskovanje šibko ionizirane plazme plamena na Dunajskem fizikalnem inštitutu

Grailich, profesor in kustos adjunkt dvornega mineraloškega kabineta na Dunaju, je raziskoval plamen skupaj z elevž Weissom /9/, poznejšim direktorjem astronomskega observatorija in univerzitetnim profesorjem na Dunaju. Ugotovila sta, da neperiodični zvoki med gorenjem nastanejo ob spreminjanju prostornine pri prodiranju segretega kisika in odletavanju produktov gorenja v segreti zrak iz goreče cevi /10/. Sprejela sta Faradayjevo teorijo plamena, podobno kot pozneje Zoch v Erlangenu. Zoch je domneval, da se plamen v višjih legah izgublja in neti na novo. Upošteval je Grailichovo raziskovanje sprememb prostornine pri gorenju, opravil poskuse s cigaretinim dimom in ugotavljal, da vse pojave ognja spremlja tudi zvok zaradi povišanja temperature /11/.

Zoch, poznejši direktor realne gimnazije v Sarajevu, je študiral na univerzi v Erlangenu pri profesorju Wilhelmu Beetzju (1822-1886). Beetz je poučeval v Erlangenu med letoma 1858-1868, pozneje pa je na politehniko v Münchnu uporabljal tanke plasti za raziskovanje magnetnih pojavov /12/.

Poleti 1861 je Pietro Blaserna (1836-1918), poznejši predstojnik akademije v Rimu, v Fizikalnem inštitutu na Dunaju raziskoval svetleče figure v vodi in ugotovil, da so pri večini kovin enake Lichtenbergovim figuram /13/. Podobna raziskovanja plamena, anodnega razprševanja in Lichtenbergovih figur je istočasno na inštitutu opravljal tudi Reitlinger, od leta 1861 ob pomoči elevé Franza Krausa. Potrdil je Faradayjeve ugotovitve o prebojni razdalji, obliki figur in razmerju med figurami v pozitivni in negativni elektriki. Meril je v štirih zelo različnih plinih, kar je omogočalo splošne zaključke /14/.

10.7.1862 sta Reitlinger in Kraus priredila Brandov poskus s plamenom med izoliranimi kroglicami, ki sta bili z vodniki povezani na električno napravo /15/. Ettingshausen je bil tedaj bolan /16/, tako da mu je že naslednje leto pomagal Stefan kot ko-direktor inštituta.

William Thomas Brande (1788-1866) je leta 1813 nasledil Humphrya Davya kot profesor kemije na Royal Institution, kjer je med letoma 1827-1854 raziskoval in urejeval Quaterly Journal skupaj s Faradayem. Med letoma 1816-1826 je bil tudi tajnik Royal Society.

Brandovo odkritje sta raziskovala tudi Faraday v Londonu in Heinrich Gustav Magnus (1802-1870) v Berlinu /17/. Reitlinger in Kraus sta namesto Brandovih kroglic uporabila kondenzatorja in dokazala, da gre pri poskusu za razelektritev, ki se različno vede do obeh elektrod. Plamena alkohola in olja sta se odklanjala proti negativni elektrodi, plameni žvepla, benzola in žveplovega oksida pa proti pozitivni elektrodi. Rezultati njenih poskusov so se skladali z napovedmi Clausiusove teorije elektrolize /18/.

Avstrijec **Edmund Reitlinger** (1830-1882) je najprej študiral matematiko in astronomijo, nato pa pravo. Leta 1855 je študiral fiziko pri Wilhelmu Webru (1804-1891) na univerzi v Göttingenu, kamor se je Weber leta 1849 vrnil iz Leipziga po dvanajstih letih pregnanstva zaradi podpisa politične peticije. Leta 1858 je Reitlinger doktoriral pri Ettingshausnu na Dunaju in postal naslednje leto skupaj s Stefanom docent na dunajskem Fizikalnem inštitutu. Reitlinger je razširil svoja predavanja na zgodovino fizike, induktivno logiko in teorijo fizikalnega raziskovanja, ko je po Machovem odhodu v Gradec prevzel njegova predavanja za študente medicine.

Leta 1863 je bil Reitlinger med kandidati za izrednega profesorja v Gradcu. Leta 1865 ga je Mach znova brez uspeha priporočal za von Langovega naslednika v Gradcu, naslednje leto pa je Reitlinger postal profesor na dunajski Politehniko in tudi na Tehniški visoki šoli poleg Victorja Pierra. Med letoma 1878-1910 je bil profesor mehanike in statike na isti šoli Čeh Josef Finger (1841-1925), ki je pred tem med letoma 1870-1874 poučeval na višji realki v Ljubljani /19/.

3 Četrto agregatno stanje

Visokotlačno visokotemperaturno plazmo na Soncu so začeli bolje razumevati šele po uspešnih poskusih z razelektritvami pri nizkih tlakih v katodnih elektronkah.

Fiziki in kemiki so se tedaj po raziskovanjih trdnin in kapljev in vse bolj posvečali plinom. Ko so jih redčili, so se v katodnih ceveh kazali nenavadni pojavi razelektritve pri nizkem tlaku. Naziv "razelektritev" (discharge) se je ohranil, čeprav z njim poleg trenutne iskre danes opisujemo tudi stalne električne tokove skozi plin.

Štiriindvajsetletni Faraday je na začetku svojega znanstvenega dela leta 1816 v predavanju "O snovi sevanja" prvi spregovoril o sevanju kot posebni snovi:

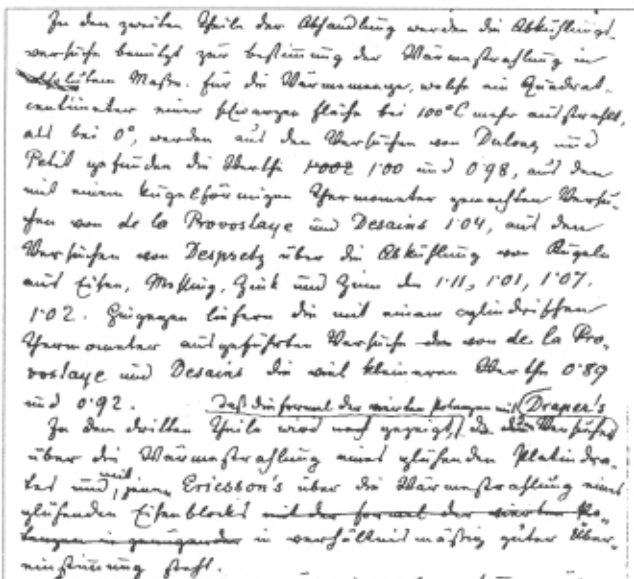
"Zamislimo si spremembo tako različno od izparevanja, kot je para različna od kapljavine, in upoštevajmo razsežnost sprememb kot merilo za velikost razlik. Če si znamo zamisliti takšno spremembo, potem nismo daleč od te snovi sevanja; podobno kot pri izparevanju, se tudi pri tej spremembi številne lastnosti prejšnjega stanja izgubijo, še več pa jih izgine."

Faraday je idejo čez tri leta še dopolnil. Šest desetletij pozneje se je William Crookes (1832-1919) skliceval nanj, ko je opisal sevanje kot četrto agregatno stanje snovi:

"Tako različni so ti pojavi od vsega drugega, kar se dogaja v zraku ali v plinih pri navadnih tlakih, da smo prisiljeni domnevati, da se srečujemo iz oči v oči s četrtem agregatnim stanjem ali stanjem, ki je tako daleč od plina, kot je plin daleč od kapljavine."

Svoje ideje je Crookes oprl tudi na teorijo vrtenja radiometra zaradi domnevnega tlaka katodnih žarkov, ki se je pozneje izkazala za napačno. Posebno posrečena je bila Crookesova domneva, da v četrtem agregatnem stanju "materija prehaja v silo", kar je podžgalo nemške kritike /20/. Žal je Crookes umrl prezgodaj, da bi v fiziki plazme lahko prepoznal uresničenje svojih domnev o četrtem agregatnem stanju.

4 Kaj sveti na Soncu?



Slika 1: Faksimile Stefanovega rokopisa izračuna temperature Sonca, oddanega na seji dunajske akademije 20.3.1879

V času prvih Crookesovih razprav o četrtem agregatnem stanju je Stefan 20.3.1879 prvi izračunal sprejemljivo temperaturo Sonca 5586°C /21/. Nadaljnjih štirideset let je minilo pri iskanju goriva, ki bi Soncu dajalo toliko energije, ne da bi se zaznavno izrabljalo.

Herman Helmholtz (1821-1894) je leta 1854 imel gravitacijo za vir energije Sonca. Izračunal je potek krčenja Sonca zaradi izgub energije, vendar je dobil premajhno starost Zemlje. Podobno je William Thomson (1824-1907), poznejši Lord Kelvin, termodinamsko določil veliko nižjo starost Zemlje, kot so jo kazali fosilni ostanki /22/. Pozneje je 20.5.1904 na Royal Institution nejevoljno poslušal zaključek razprave po Bakerianskem predavanju Ernesta Rutherforda (1871-1937) z univerze McGill v Montrealu o novo odkriti radioaktivnosti kot viru notranje energije nebesnih teles. Rutherford je imel bržkone v mislih cepitev in ne zlivanja jeder, ko je povedal da: "... obstoj radija na Soncu v razmerju štirih masnih delov na milijon sam po sebi pokriva sedanjo sevano toploto. Odkritje radioaktivnih elementov, ki ob svojem razpadu osvobajajo ogromne količine energije, tako poveča možno limito trajanja življenja na tem planetu in omogoča čas, ki ga geologi in biologi zahtevajo za potek evolucije." /23/.

Rutherfordovim podobna ugibanja o procesih, s katerimi nam sveti Sonce, so štiri leta pozneje lahko prebrali tudi v slovenskem jeziku. Besedilo omenja helij in zato že veliko bolj spominja na sodoben opis zlivanja jeder v zvezdah:

"Vprašati se moremo, odkod se jemlje toplota na solncu, da je navidezno nikdar ne zmanjka... Na solncu se nahajajo namreč silne množine plina helija. Zelo verjetno je, da je nastal ta helij iz radioaktivnih snovi, ki se istotako nahajajo v veliki množini na solncu. Ako je to mnenje pravo, nam ni težko razložiti, zakaj je solnčna gorkota neizpremenljiva. Pri postajanju helija iz ra-

dioaktivnih snovi se razvija namreč tolika toplota, da se z njeno pomočjo vzdržuje solnčna toplota na vedno isti stopnji..." /24/.

Francis William Aston (1877-1945) je leta 1920 in 1925 v Cavendishovem laboratoriju z masnim spektrogramom ugotovil, da je masa He za 0,8 % manjša od štirikratne mase protona. Kemik William Draper Harkens (1873-1951) z univerze v Chicagu je razliko imenoval "vezavno energijo". Direktor observatorija univerze v Cambridgu kveker Eddington pa je objavil, da v zvezdah nastaja energija z zlivanjem vodikovih atomov v težje elemente /25/.

Leta 1928 sta v Göttingenu Nemeec Houtermans in ruski teoretik George Gamow (1904-1968) napisala razpravo o razpadu α s tunelskim efektom. Houtermans je menil, da je možen tudi obrnjen proces, v katerem jedro absorbira delec α in nato razpade. Vendar takšna fuzija ni bila izvedljiva pri energijah, dosegljivih v tedanjih laboratorijih. Mladi britanski fizik na izpopolnjevanju v Göttingenu Robert d'E. Atkinson pa je poznal Eddingtonovo določitev temperature v notranjosti zvezd /26/, kjer je bilo energije dovolj. Marca 1929 sta Houtermans in Atkinson odposlala razpravo z naslovom "Kako lahko kuhamo helijeva jedra v potencialnem loncu", vendar so uredniki naslov spremenili v "O vprašanju možnosti sinteze elementov v zvezdah" /27/.

Nemeec **Friederich Georg Houtermans** je bil rojen leta 1903 v Zappotu pri Danzigu, današnjem Gdansk. Odraščal je na Dunaju, kjer je njegova mati Elza, napol Židinja, kot prva ženska dobila doktorat iz kemije. Leta 1921 je začel študirati fiziko v Göttingenu. Vendar je moral študij zaradi pomanjkanja denarja prekiniti in se preživljati kot turistični vodnik v Rimu. Leta 1927 je v Göttingenu končal disertacijo o resonančni fluorescenci v Hg pri Jamesu Franku (1882-1964), ki je leto pred tem dobil Nobelovo nagrado.

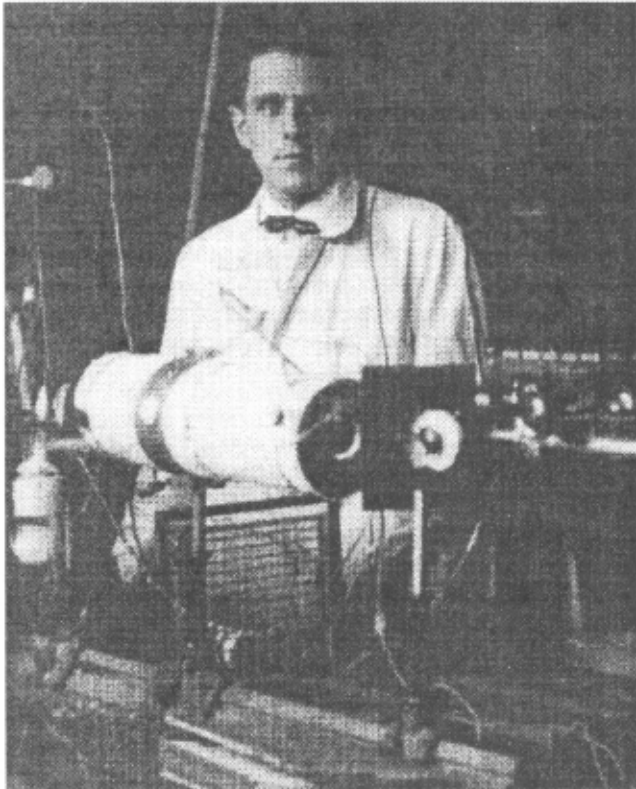
Leta 1929 je Houtermans na Technische Hochschule v Berlinu postal asistent Wilhelma Westphala in nato Gustava Hertza (1887-1975), nečaka Heinricha Hertza (1857-1894). Pri G. Hertzu, ki je delil Nobelovo nagrado s Houtermansovim nekdanjim mentorjem Franckom, je razvijal elektronski mikroskop, ki ga je tisti čas v Nemčiji sestavljalo več raziskovalnih skupin /29/.

Avgusta 1930 je bil Wolfgang Pauli (1900-1958) med konferenco fizikov v Odesi poročna priča Houtermansu in mladenki, ki je skupaj z njim doktorirala iz fizike v Göttingenu. Leta 1932 se je Houtermans habilitiral na univerzi, vendar je kot četrt Žid in član nemške komunistične partije poleti 1933 emigriral in se zaposlil v laboratoriju električnih in glasbenih naprav blizu Londona. Decembra 1934 je odšel na Fizikalno-tehnični institut v Harkov, kjer je raziskoval tudi Landau. Houtermans je delal v eksperimentalnem laboratoriju za jedrsko fiziko, vendar so ga 1.12.1937 aretirali kot nemškega obveščevalca, podobno kot pol leta pozneje Landau. 25.4.1940 je bil Houtermans izročen Gestapu. Od tam ga je rešil Max von Laue (1879-1960), tako da se je leta 1941 lahko priključil privatnemu laboratoriju Manfreda von Ardenneja (1907-1997) v Lichtenfeldu pri Berlinu, kjer je raziskoval teorijo verižne reakcije za državni poštni urad. Pred koncem vojne je prešel na drugi fizikalni institut v Göttingenu, leta 1952 pa je postal profesor na univerzi v Bernu. Umrli je v Švici leta 1966.

Zvečer po končanem članku o jedrskih reakcijah kot viru energije zvezd se je Houtermans sprehajal pod zvezdnim nebom s prijetno mladenko. "Ali ne sijejo prelepo?" mu je zaklicala. Skomiznil je z rameni in ji pojasnil: "Že od včeraj vem, zakaj sijejo."

Vendar Houtermans in Atkinson nista imela na razpolago praktično nobenih eksperimentalnih rezultatov. Vedela sta, da bi pri visokih temperaturah v jedru Sonca atomi vodika lahko prišli ob svoje elektrone. Visoki tlak v Soncu bi jih nato stisnil v zmes protonov, osemkrat gostejšo od svinca. Izračunala sta, da bi zlivanje vodika zadostovalo za toploto Sonca. Nista pa vedela, ali bi zmes protonov pri razmerah v notranjosti Sonca v resnici vzdrževala termojedrsko reakcijo. Pozneje so ugotovili, da sta Houtermans in Atkinson napačno ugotovila presek za ujetje v jedru in verjetnost za radioaktivni razpad. Vendar so se napake med seboj izničile v dovolj pravičen rezultat.

Houtermansov opis jedrske reakcije je dal leta 1928 Johnu Cockroftu (1897-1967) idejo za gradnjo pospeševalnika za protone, ki sta ga leta 1932 končala skupaj s šest let mlajšim Ernestom Waltonom v Cavendishovem laboratoriju /28/.



Slika 2: Friederich Georg Houtermans (1903-1966) (Iosif B. Khriplovich, *The eventful life of Fritz Houtermans*, *Phys.Today* (julij 1992) str.30)

Bethe je leta 1938 na univezi Cornell, nasprotno od Houtermansa in Atkinsona, že imel na razpolago eksperimentalne raziskave jedrskih reakcij, saj so bile v zgodnjih tridesetih letih prav fuzijske reakcije v gorišču raziskovanj fizike visokih energij /30/. Izračunal je, kako hitro se morajo zlivati protoni, da obdržijo razmere v notranjosti Sonca. V letih 1938-1939 sta Bethe in Charles Critchfield ugotovila, da termojedrska reakcija v

vesolju poteka po dveh poteh: v vodikovem (proton-proton) ali v ogljikovem ciklu. Slednjega je v Berlinu neodvisno odkril tudi Nемеc Karl von Weizsäcker (rojen 1912) /31/. Vodikov cikel je močno spominjal na kvantitativne predloge cele vrste raziskovalcev, med njimi Marie Curie (1867-1934) leta 1912 in neodvisno Francoza Jeana Baptista Perrina (1870-1942), Edingtona ter Šveda Svante Arrheniusa (1859-1927) leta 1923 /32/.

Nемеc **Hans Albrecht Bethe** je bil rojen leta 1906 v Strassburgu, kjer je bil njegov oče kolega K.F. Brauna na univerzi. Studij fizike je končal pri Arnoldu Sommerfeldu v Münchnu leta 1928. Raziskovalno delo je nadaljeval pri Rutherfordu v Cambridgu in pri Enricu Fermiju (1901-1954) v Rimu. Poklicno pot na univerzah v Münchnu in Tübingenu je ob začetku nacistične oblasti leta 1933 prekinil z odhodom v Anglijo. Leta 1935 je odšel na univerzo Cornell v ZDA, kjer je dve leti pozneje postal profesor fizike. Leta 1940 je na Cornell prišel tudi Debye kot profesor kemije. Bethe je bil vodja tehničnega oddelka pri izdelavi atomske bombe v Los Alamosu. Tam je zadnje leto vojne pod njegovim vodstvom poldrugo leto mlajši, naturalizirani Američan madžarskega rodu Edward Teller raziskoval vodikovo bombo. Leta 1949 je Bethe iznajdba, povezane z vodikovo bombo, tudi patentiral /33/. Po vojni je v Ženevi sodeloval v pregovorih s SZ glede kontrole nad jedrskimi poskusi.



Slika 3: Hans Bethe (skrajno desno) ob Richardu Feynmanu (1918-1988) na srečanju v Rochesterju januarja 1952 (Freeman J. Dyson, *Feynman at Cornell*, *Phys.Today*, (februar 1989) str.33)

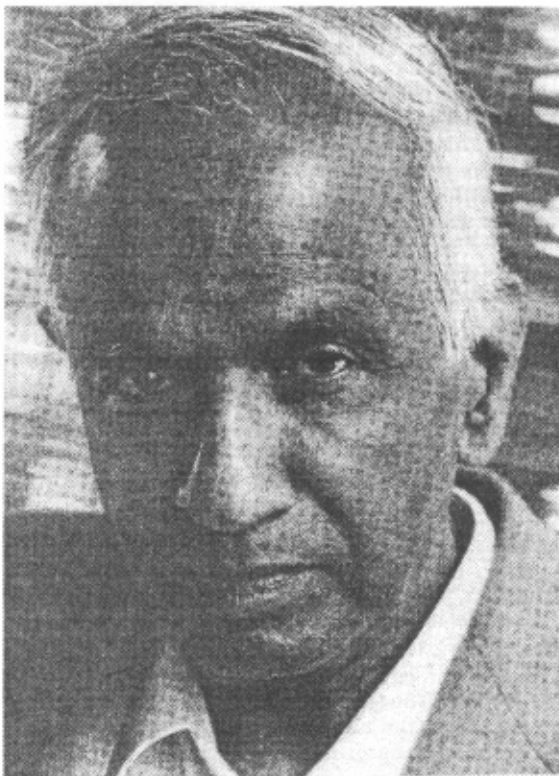
Bethejevo pionirsko delo je izzvalo navdušenje in žive razprave, saj se je izkazalo, da orjaške zvezde niso mogle sevati z današnjo svetilnostjo milijarde let. Ker še niso poznali prehoda zvezde v stanje nižje svetilnosti, je Spitzer leta 1948 domneval, da so orjaške zvezde morale nastati razmeroma pozno iz prahu v spiralnih ozvezdijh /34/.

Ralph H.Fowler, Rutherfordov zet in P.A.M.Diracov profesor v Cambridgu, je visoke tlake pojasnjeval z modelom plina iz jeder in elektronov /35/. Njegove raziskave je nadaljeval Chandrasekhar, Diracov študent na Cam-

bridgu. Leta 1931 je objavil, da so bele pritlikavke, ki jih je leta 1915 odkril Walter Sydney Adams (1876-1956) in pozneje raziskoval Eddington, sestavljene iz močno stisnjene snovi, plazme. Od jeseni leta 1952 do pomladi 1953 je Chandrasekhar kot profesor v Chicagu pol leta skupaj z Enricom Fermijem (1901-1954) reševal astrofizikalne probleme, povezane z magnetohidrodinamiko /36/.

Subrahmanyan Chandrasekhar se je rodil v Lahoru (Pakistan) leta 1910. Ko je bil star dvajset let, je končal univerzo v Madrasu. Račune za svojo teorijo belih pritlikavk je opravil med dolgim potovanjem v Anglijo poleti 1930, kjer je študiral pri Diracu na Cambridgu in doktoriral leta 1933. Z Eddingtonom se je zapletel v spor glede realnosti črnih lukenj in zgornje meje za maso belih pritlikavk. Čeprav je Eddingtonova ostra kritika na zborovanju Kraljevske astronomske družbe januarja 1935 skoraj uničila Chandrasekharjevo kariero, je vedno ostal občudovalec Eddingtonovega dela.

Od leta 1937 je Chandrasekhar vseskozi delal na univerzi v Chicagu. Leta 1944 je postal profesor, leta 1953 pa naturaliziran Američan. Leta 1983 je delil Nobelovo nagrado za fiziko z Williamom Fowlerjem, profesorjem Tehnološkega instituta v Kaliforniji. Fowler je od leta 1947 v laboratoriju simuliral termojedrske reakcije, ki naj bi potekale v zvezdah. Pri tem so mu pomagale bogate izkušnje raziskovanja elementarnih delcev v pospeševalnikih. Ko je leta 1953 njegov institut na Caltechu obiskal pet let mlajši slovit angleški astronom Fred Hoyle, sta začela dolgoletno raziskovanje sinteze kemijskih elementov v zvezdah in leta 1980 tudi v supernovah. Chandrasekhar je umrl pred tremi leti v Chicagu.



Slika 4: Subrahmanyan Chandrasekhar 1910-1995 (Phys.Today (marec 1991) str. 65)

5 Langmuirjevo raziskovanje nihanja plazme

Sredi dvajsetih let je Langmuir spuščal tok vodika na segreto volframovo nit v žarnici, da so vodikove molekule razpadle na atome. Ko se je tok vodika oddaljšal do hladnejših delov poskusne naprave, so se atomi vodika ponovno združevali v molekule in s toploto rekombinacije dvignili temperaturo plina do blizu 6000°C, kot jo ima površina Sonca.

Langmuir je razvil metodo raziskovanja razelektritve v plinih s tanko nabito sondo, izdelano iz kovin z visokim tališčem, kot sta volfram ali molibden. Dovolj drobna sonda ni zaznavno spreminjala porazdelitev električnega potenciala v plazmi /37/. Že leta 1925 je Langmuir v obločni razelektritvi v živosrebrnih parah pri nizkem tlaku s segreto katodo pri sobni temperaturi ugotovil celo vrsto možnosti za pospeševanje številnih primarnih elektronov do hitrosti, ki presegajo potencialno razliko v katodni elektronki /38/.

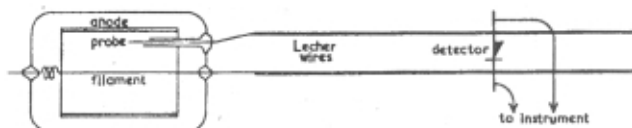
Že desetletja določajo najpomembnejše lastnosti plazme z meritvami napetosti med stenami posode in Langmuirjevo sondo. A.F. Dittmer v letih 1923 in 1924 z uporabo Langmuirjeve tehnike odkril posebno izrazito anomalijo v tanki plasti nekaj mm proč od vlakna, ki je vir primarnih elektronov. Da bi pojasnil Langmuirjevo odkritje nenavadno močnega sipanja pri obločnici, je Dittmer leta 1926 prvi predpostavil obstoj močnih notranjih nihanj. Njihovi nihajni časi so bili primerljivi z 10^{-8} s trajajočim prehodom primarnih 50 eV elektronov iz niti v območje največjega sipanja /39/.

Dittmer med poskusi ni mogel zaznati tega nihanja. Še pred natisom njegove razprave pa je F.M. Penning objavil svoja opazovanja kontroliranih visokofrekvenčnih radijskih sevanj v obločnici pri praznjenju pri nizkem tlaku s Hg parami, ki so kazala prepričljivo korelacijo med opaženim močnim sipanjem in sevanjem /40/.

Poleg presenetljivo močnega sipanja so opazili tudi dve drugi posebnosti razelektritve v plinih, ki so bile povezane z nihanji v plazmi.

Prva med njimi je "kotno" sipanje primarnega curka blizu katode pri obločnici. Najbolj prepričljive raziskave tega pojava so objavili K.G. Emelús in njegovi študentje s Queen's University v Belfastu po letu 1941 s poenostavljenimi Langmuirjevimi sondami. Večkrat so opisali povezavo med kotnim sipanjem primarnega curka in obstojem primarnih nihanj v praznjenju. Uporabljali so volframovo katodo v Hg pri nizkem tlaku in anodo v obliki koaksialnega valja. Dovolj drobna premerična sonda, ki ni zaznavno spreminjala porazdelitve električnega potenciala v plazmi, je bila postavljena med elektrodi. Pri napetosti 15-100 V in toku od nekaj do 100 mA so skoraj vedno zaznavali nihanja z valovnimi dolžinami okoli 10 cm pri zelo različnih frekvencah in amplitudah /41/.

Drugo posebnost včasih imenujemo Langmuirjev paradoks. Maxwelllova porazdelitev energij elektronov se obdrži pri razelektritvi v plinu do zelo majhnih razdalj od izolirane stene. Meritev je presenetila raziskovalce, saj se na negativno nabiti steni zbirajo le visokoenergijski elektroni iz plina in zato kvarijo Maxwelllovo porazdelitev elektronov v bližini. Daleč od stene se Maxwelllova



Slika 5: Skica enostavne sonde za odkrivanje nihanj v plazmi (D. Gabor, *Plasma oscillations, Brit.J. Appl. Phys. 2 (1951) str.209*)

porazdelitev ponovno vzpostavi zaradi prehajanja energije pri trkih med elektroni. Vsekakor so bile vse dotlej znane povprečne proste poti prehajanja energije za več redov velikosti večje od zelo majhnih razdalj, potrebnih za ponovno vzpostavitev ravnovesne porazdelitve pri razelektritvi.

6 Plazma dobi ime

Pol stoletja je minilo od Crookesove ideje o četrtem agregatnem stanju do Langmuirja, ki ga je pomladi leta 1928 imenoval "plazmo" in opisal nihanja v njej.

Langmuir je raziskoval plazmo pri neonski svetilki in s sondo meril parametre nizkotemperaturne plazme v razredčenem plinu. Med raziskovanjem obločne razelektritve v Hg pri nizkem tlaku pri sobni temperaturi je spomladi 1928 sodelavca v laboratoriju GE poprosil za nasvet: "Poglej, Tonks, iščem ime. Pri teh plinskih razelektritvah imenujemo področje v neposredni bližini stene elektrode "mejno plast (sheath)", kar je v redu. Toda, kako naj imenujemo glavni del razelektritve? Prevodnost je tam velika, tako da ne moreš dobiti napetostne razlike kot pri mejni plasti, ki pobere ves naboj. In tam imamo popolno nevtralizacijo prostorskega naboja. Nočem si izmišljati izraza, toda moram opisati to vrsto prostora, ločeno od mejne plasti. Kaj predlagaš?" Langmuir je seveda pretiraval glede napetostne razlike in nevtralizacije prostorskega naboja, vendar si je Tonks vzela čas za premislek. Bil pa je prepočasn, saj je Langmuir že naslednji dan privihral k njemu in razglasil: "Vem, kako ga bomo imenovali! Imenovali ga bomo »plazma«. Razpravo z novo skovanko je poslal v tisk 21.6.1928.

Tonks se je 39 let pozneje spominjal, da je Langmuir ob izbiri tudi omenil kri. Izbiral je namreč ime v nasprotju z nazivom "mejna plast" ob steni, da bi opisal širok spekter pojavov gibanja v elektrolitih, plamenu in Heavisidovi plasti v atmosferi. Na izbiro naziva niso vplivale ne nihajne značilnosti nestabilne plazme, niti kipeče gibanje v živih celicah ali podobnost s protoplazmo. V tistem času so tako o plinski kot o krvni plazmi vedeli veliko manj kot danes /42/. Tonks in Langmuir sta naziv plazma uporabila za tisti del ločne razelektritve, kjer so gostote ionov in elektronov visoke, vendar enake med seboj. Obsega ves prostor, ki ga ne zasedajo "mejne plasti" /43/. Ionizirani plin se imenuje plazma, ko je Debyejeva dolžina majhna v primerjavi z drugimi razdaljami /44/.

Langmuir je bil tudi sicer uspešen pri kovanju novih izrazov. Med drugim je leta 1914 pomagal uveljaviti končnico -tron, ki se še danes drži cele vrste elektronskih naprav /45/.

Langmuir je menil, da se je v poskusih s plazmo izognil možnostim nihanja /46/. Po Dittmerjevi razpravi iz leta

1926 je Langmuir leta 1928 in februarja 1929 skupaj s Tonksom raziskoval elektromagnetna nihanja zelo visokih frekvenc. Objavila sta tudi enostavno teorijo elektronskih in ionskih oscilacij v ioniziranem plinu z enim samim mehanizmom za pojasnitev obeh posebnosti električne razelektritve v plinih: "kotnega" sipanja in Langmuirjevega paradoksa. Nekateri teoretijski rešitve jima je v zasebnih pismih pomagal najti tudi slaviti profesor na Cambridgeu J.J. Thomson. Nova teorija je temeljila na povsem enakomerni, makroskopsko nevtralni plazmi pri ničelni temperaturi. Majhen premik elektronov iz ravnovesja povzroči delovanje Coulombove sile nazaj k ravnovesju, ki je v prvem približku nevtralno. Nastanejo harmonična nihanja z značilno frekvenco, ki so jo imenovali po Langmuirju, čeravno jo je prvi objavil že Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) v teoriji elektronov leta 1909.

Vendar je Lorentz obravnaval transversalne valove, medtem ko sta Tonks in Langmuir opisala longitudinalne, povsem drugačne narave. Da bi poudarili razliko, so valove Langmuirjevega tipa imenovali električni zvočni valovi, čeravno izraz ni povsem ustrezen. Poleg teh valov so v plazmi možni tudi drugi, med njimi akustični in pozneje leta 1942 odkriti hidromagnetni (Alfvénovi).

Nihanja elektronov s 1000 MHz so bila prehitra, da bi jim sledili težji ioni. Ionske oscilacije pa so tako počasne, da pustijo elektronsko gostoto ves čas pri ravnovesni vrednosti, ki ustreza Boltzmannovemu zakonu.

Tonks in Langmuir sta leta 1929 merila v dveh katodnih elektronkah z vročima katodama za izvira elektronov. Kolektorji so bili postavljeni tako, da so sprejemali del direktnega curka primarnih elektronov iz vlakna. Pri strani je bila anoda, ki je vzdrževala razelektritev. V prvi elektronki sta bili dve volframovi vlakni, oprti na dolge vodnike, pokrite s steklom, blizu srede okrogle žarnice velikosti 18 cm. Njuna izpostavljenost dela sta bila dolga 1,1 cm in vzporedna na medsebojni razdalji 0,5 cm. Vzporedno z njima sta 4,2 cm proč postavila kolektor, okroglo ploščo premera 1,1 cm, pokrito s sljudo. Druga katodna elektronka je bila enaka, le da je imela tri navpične volframove niti. Z detektorjem Zn-Te in galvanometrom sta zaznavala nihanja s frekvencami elektronov v plazmi v skladu s teorijo /47/.

V naslednjem zvezku Phys. Rev. sta Tonks in Langmuir analizirala še mejno plast, ki nastane ob stiku plazme s trdno površino brez magnetnega polja. Pri tem sta uporabila različne domneve o potencialni razliki med plazmo in steno. Ugotovila sta, da je debelina mejne plasti v grobem podana z Debyejevo zaščitno razdaljo, ki je podobna obratni vrednosti absorpcijskega koeficienta ioniziranega fluida za električne sile /52/.

Irving Langmuir (1881-1957) je bil rojen New Yorku. Leta 1903 je postal metalurški inženir na univerzi Columbia. Tri leta pozneje je doktoriral v Göttingenu pri Hermannu Waltherju Nernstu (1864-1941), nekdanjem Boltzmannovem študentu. Nernst sicer ni bil uporaben svetovalec, toliko bolj pa je Langmuirju pomagal nekdanji Plückerjev učenec, matematik Felix Klein (1849-1925), ki je med letoma 1886-1910 prav tako poučeval na univerzi v Göttingenu.

Po nekaj letih poučevanja kemije je po nasvetu sošolca leta 1909 začel raziskovalno delo pri General Electric Research Laboratory v Schenectadyju, New York, kamor je leta 1886 Edison preselil svoje raziskovalne naprave. Laboratorij je bil sprva decembra 1900 postavljen v skednju ob Steinmetzovem penzionu, kamor je ta nastavil dotedanjega inštruktorja za kemijo pri MIT Willis R. Whitneyja kot prvega direktorja raziskovanja pri GE/48/. Langmuir je pisal materi: "Medtem ko sem v Schenectadyju, bom iskal zares dobro službo na univerzi." Ta "medtem" se je podaljšal na skoraj pol stoletja Langmuirjevega raziskovanja pri GE.

Leta 1911 je Langmuir pridobil atomarni vodik in opisal varjenje kovin v vodikovem plamenu. Leta 1913 je objavil po njem imenovan zakon termoionske emisije. Leta 1916 je konstruiral manometer in visokovakuumsko črpalko. Leta 1919 je predložil svoj model atoma na osnovi starejšega Bohrovega. Znan je postal tudi po enačbi Langmuira-Megnada Saha (1893-1956), ki povezuje stopnjo površinske ionizacije s površinsko temperaturo kovine, njenim izstopnim delom in potencialom ionizacije atomov. Skupaj z Gilbertom Newtonom Lewisom (1875-1946) sta postavila teorijo kemičnih valenc. Leta 1916 je objavil enačbo izotermne enomolekularne adsorpcije. Langmuir je tudi pomagal izumitelju Williamu Stanleyju pri problemih prehanja toplote v termovki, kar mu je pomagalo pri izumu za 25 % učinkovitejše vakuumske žarnice.

Leta 1932 je Langmuir kot prvi ameriški industrijski znanstvenik dobil Nobelovo nagrado za kemijo za raziskovanje monomolekularnih površinskih tankih plasti. Istega leta je Coolidge nasledil Whitneyja kot direktor laboratorija GE, pa tudi Langmuir je postal direktor in pozneje svetovalec. Med svetovalci GE so bili tudi drugi Nobelovci: Hans Bethe s Cornell, Ernest Lawrence z Berkeleyja in Eugene Wigner s Princetona.

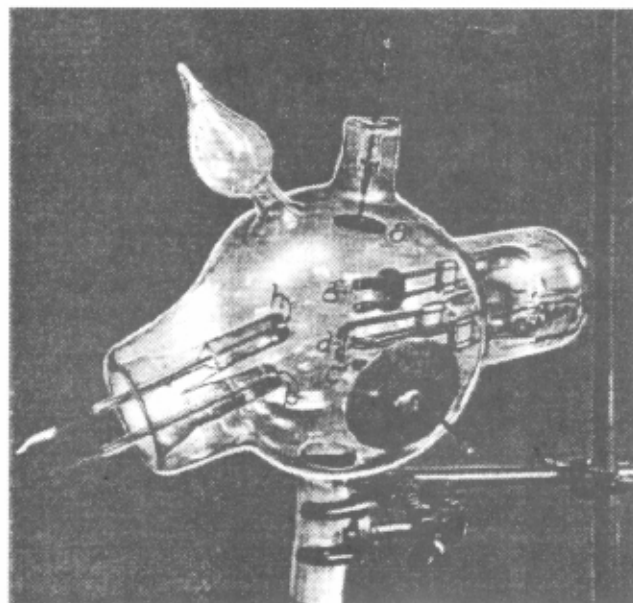
Do konca 2. svetovne vojne je laboratorij GE bolj spominjal na Edisonovo kot na Einsteinovo dobo. Ukvarjal se je izključno z elektriko, kjer je imel močne patente. Delali so v majhnih skupinah po metodi, ki so jo na Cambridgu posrečeno krstili za "klasično tradicijo vrvic in pečatnega voska". Tako je Langmuir s priučenim znanstvenikom Vincentom Schaeferjem in prvo žensko z doktoratom iz fizike v industrijskem laboratoriju Katharino Blodgett med iskanjem boljšega maziva za ležaje odkril enomolekulske tanke plasti kapljevine na kapljevine /49/.

Leta 1939 se je Langmuir navdušil nad Hannovim odkritjem verižne reakcije, tako da sta Kingdom in Pollock že leta 1940 začela raziskovati uran pri GE, kar je ob koncu vojne preraslo v Skupino za raziskovanje jedra pri GE. Leta 1947 so Langmuir, Pollock in Franck Edler na 70 MeV sinhrotronu prvi opazili sinhrotronsko sevanje.

Leta 1945 je imel laboratorij GE 630 zaposlenih, med njimi 160 znanstvenikov in inženirjev. Okoli pol jih je raziskovalo fiziko, 30% kemijo, 15% metalurgijo in 5% mehaniko. Leta 1946 se je po Whitneyju upokojil tudi Coolidge in kmalu za njim, konec leta 1858, še Saul Dushman (1883-1954), Albert W. Hull in tudi Langmuir leta 1950, ko je v laboratoriju delalo že 1000 ljudi, ki so si dali postaviti novo stavbo v Knollsu. Nove generacije raziskovalcev in konkurenca na tržišču so tedaj tudi v GE že zahtevala izvajanje velikih projektov /50/.

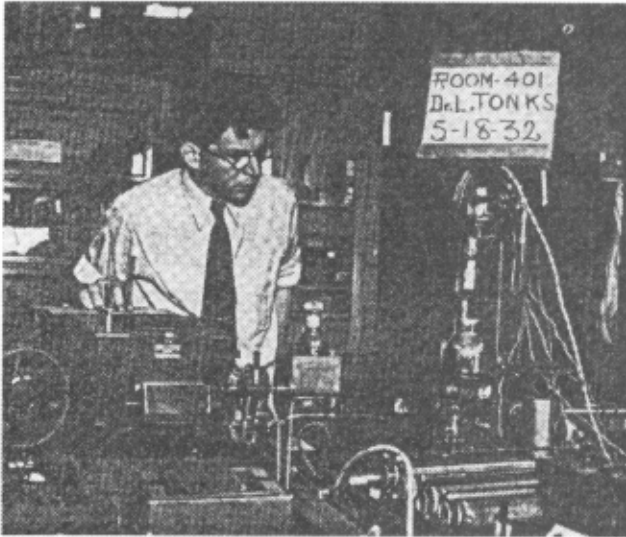


Slika 6: Irving Langmuir (1881-1957) (Irving Langmuir, *Pathological science, Phys.Today (October 1989) str.37*)



Slika 7: Langmuirjeva in Tonksova merilna naprava, opisana 20.11.1928 (Tonks, Langmuir, n.d., 1929, str.202)

Lewi Tonks (1897-1971) je doktoriral leta 1923 na univerzi Columbia, kjer je generacijo pred njim študiral Langmuir. Tri leta po diplomi je začel delati pri General Electrics. Leta 1937 je poimenoval "pinch" efekt /51/, ki ga je tri leta prej odkril Benett kot "magnetne samo-uravnavaajoče tokove".



Slika 8: Lewi Tonks (1897-1971) v laboratoriju, *The Physical Review. The First Hundred Years (H. Henry Stroke (urednik), American Institute of Physics Press, New York, Maryland, str.724)*

7 SKLEP

V fiziki plazme so se v letih velike svetovne ekonomske krize združila raziskovanja astronomov (pozneje imenovanih astrofiziki), geofizikov in raziskovalcev razelektritve pri nizkem tlaku. Za Langmuirjevo definicijo plazme je bilo še bistveno električno polje, ki je povzročilo ionizacijo. Pozneje je plazma postala sopomenka za ionizirani plin /53/. Langmuirjevi nasledniki so raziskovali predvsem nenavadno vedenje plazme v magnetnem polju in v naslednjih desetletjih razvili novo panogo znanosti, imenovano magneto-hidrodinamika, ki jo bomo opisali v nadaljevanju.

Literatura

- 1 Faraday, Lectures on the chemical history of a candle, slovenski prevod "Zgodovina sveče", MK, Ljubljana, 1950, str.9.
- 2 Faraday, n.d., 1950, str.10 in 18.
- 3 Sull' Magnetismo dei Gasi, Giorn. di Roma; Sull' Azione di elettromagnetismo sull' vapori di acqua e di alcool, pol strani dolgo poročilo v Corisp.Scient.Roma 1 (1848).
- 4 Francesco Zantedeschi (1797-1873), Ueber die Bewegungen der Flamme unter elektromagnetischem Einfluss, Gazz. Piemont št. 242 (12.10.1847) in Racc. fis. chim 3. Prevod v Ann. Phys. 73 (1848) str. 286-290; Dell' influenza elettromagnetica nei corpi coll' analisi di una nota de prof.Bancalari, Benetke 1848.
- 5 Faraday, On the Diamagnetic Conditions of Flame and Gases, Phil.Mag. 31 (december 1847) S.10, št.210, str.401-421 in Experimental researches in electricity, ponatis v Great books of the western world (ur.Robert Maynard Hutchins), Encyclopaedia Britannica, inc, 1952, str.856, 857, 858 in 865. Prevod v Ann.Phys. 73 (1848) str.259-263 in 286.
- 6 Zantedeschi, Della condizione magnetica e diamagnetica proprie del regno inorganico e della condizione diamagnetica generale ai composti dei regni organici. Benetke 14.3.1848; Plücker, Ueber das magnetische Verhalten der Gase, Ann.Phys. 83 (1851) str.87.
- 7 Faraday, On the Diamagnetic Conditions of Flame and Gases, Phil.Mag. 31 (december 1847), S.10, št.210, str.401-421 in Experimental researches, n.d., 2720 (2.8.1850). Prevod v Ann.Phys. 73 (1848) str.257; Eduard Riecke, Plücker's Physikalische Arbeiten, Juliusa Pluecker gesammelte wissenschaftliche Abhandlungen (ed.A. Schönflies & F.Pockel), 1. vol, Leipzig, 1895, str.XIII.

- 8 Karl Ferdinand Braun (1850-1918), Bemerkungen über die unipolare Leitung der Flamme, Ann.Phys. 3 (1878) str.441 in 444.
- 9 Naziv "elevé" ali "Ordentliche Zögling" je dobil dunajski študent po treh semestrih. Največ 12 takšnih študentov je prejelo stipendijo na dunajskem Fizikalnem inštitutu.
- 10 Wilhelm Josef Grailich (1829-1859) in Edmund Weiss (rojen leta 1837-1917 v Dublinu), Über das singen der Flammen, Wien.Ber. 29 (1858) str.271.
- 11 Johann (Ivan Branimir) Zoch, Ann.Phys. (1.5.1866) str.589 in 591-593; Ferdinand Rosenberger, Die Geschichte der Physik, III, Braunschweig, 1890, str.745; Christa Jungnickel in Russel McCormach, Intellectual mastery of nature, I, The University of Chicago Press, 1986, str.204.
- 12 Jungnickel 1986, str.224; Walter Höflechner, Ludwig Boltzmann, Graz 1994, II, str.139; Južnič, Zgodovina raziskovanja "katodnih žarkov" in (katodnega) razprševanja elektronov, Vakuunist 14/3 (1994) str.28.
- 13 Reitlinger, Wien.Ber. II 43 (1861) str.534.
- 14 Reitlinger, Wien.Ber. II 43 (1861) str.25.
- 15 Brande, On some new Electrochemical Phenomena, Phil.Trans. 26.11.1814, str.1 (prebrano pred RS 25.11.1815).
- 16 Reitlinger in Kraus, über Brande's elektrochemische Untersuchungen, Wien.Ber. 46 (10.7.1862) str.389.
- 17 Ann.Phys. 102 (1857) str.42.
- 18 Reitlinger, n.d., 1862, str.368 in 388-389; Simon Šubic, Grundzüge einer Molekular-Physik, Wien, 1862, str.199-200.
- 19 Höflechner, n.d., 1994, II, str.50.
- 20 Predavanje Williama Crookesa (1832-1919) Radiant Matter or the Fourth State na kongresu Britanskega združenja v Sheffieldu 22.8.1879. Prevod "Sur la matière radiante" v Ann. Chem. Phys. 19 (1888), ponatisjen v Henri Abraham in Paul Langevin (1872-1946) (ur.), Les quantités élémentaires d'électricité. Ions, électrons, corpuscules, Gauthier-Villars, Paris, 1905, str.112-114 in 124; Johann Puluj (1845-1918), Physical memoirs. Radiant electrode matter and the so-called fourth state, London 1889, str. 235.
- 21 Jožef Stefan, Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur, Wien.Ber 79 (1879) str.36-37.
- 22 Thomson, On the Secular Cooling of the Earth, Trans.RS Edinburgh 23 (28.4.1862), Ponatis v Mathematical and Physical Papers, III, London, 1890, str.295-311.
- 23 David B.Wilson, Kelvin and Stokes, Adam Hilger, Bristol, 1987, str.220.
- 24 Fran Čadež (1882-1945), Skrivnost radioaktivnosti, Ljubljana, 1908, str.46.
- 25 Arthur Eddington (1882-1944), The Internal Constitution of the Stars, Cambridge, University Press, 1926. Nemški prevod Der innere Aufbau der Sterne, Berlin, Springer, 1928, str.364, 368, 392 in 394.
- 26 Eddington, n.d., 1928, str.18 in 149.
- 27 Atkinson, Houtermans, Z.Phys. 54 (1929) str.656.
- 28 S.Južnič, Zgodovina pospeševalnikov: Od idej do prvih izvedb, Vakuunist 15/2 (1995) str.18-19.
- 29 S.Južnič, Zgodovina elektronskega mikroskopa, Vakuunist 14/4 (1994) str.22.
- 30 Harold P.Fluth, Reaching ignition in the tokamak, Phys.Today (marec 1985) str.53.
- 31 Ralph E.Lapp, Roads to discovery, Harper & Brothers Publishers, New York, 1960, str.162.
- 32 Jean Perrin, Les atomes, Paris, Librairie Félix Alcan, 1927, str.277-278; Eddington, n.d., 1928, str. 368.
- 33 Peter Galison and Barton Bernstein, In any light: Scientists and the decision to build the Superbomb, 1952-1954, HSPS 19/2 (1989) str. 271 in 336.
- 34 Lyman Spitzer, Dreams, Stars and Electrons, Princeton University Press, 1997, str. 3 in 51.
- 35 Friedrich Hund (1896-1997), Geschichte der physikalischen Begriffe, 2. del, Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich, 1978, str.197.
- 36 I.B. Ponekorov in V. Pokrovski, Enrico Fermi, Nauka, Moskva, 1972, str.119-121; Spitzer, Physics of fully ionized gases, Interscience publishers, New York, 1956, str.12-14.
- 37 Tonks in Langmuir, A general theory of the plasma of an arc, Phys. Rev. 34 (15.9.1929) str. 881.
- 38 Langmuir, Phys. Rev. 26 (1925) str. 585.
- 39 Dittmer, Phys. Rev. 28 (1926) str. 507.

- 40 Nature 118 (1926) str.301 in Physica 6 (1926) str.241; Tonks in Langmuir, Oscillations in Ionized Gases, Phys.Rev. 33 (1929) str.195.
- 41 D.Gabor, Plasma oscillations, Brit.J.Appl.Phys. 2 (1951) str.209.
- 42 M.A.B.Whitaker, History and quasihistory in physics education - part 1, Phys. Educ 14 (1979) str.111 in Tonks, Am. J. Phys. 35 (1967) str. 857-858.
- 43 Tonks in Langmuir, n.d., Phys. Rev. 33 (1929) str.196.
- 44 Langmuir, Phys. Rev. 33 (1929) str. 954; Spitzer, n.d., 1956, str.17.
- 45 Georg Wise, Irving Langmuir (1881-1957), v Vacuum Science and Technology, (ur. Paul A. Redhead), American Vacuum Society, 1994, str. 34.
- 46 Gabor, n.d., 1951, str. 210.
- 47 Tonks in Langmuir, n.d., 1929, str.203-210.
- 48 George Wise, Science at General Electric, Phys.Today (december 1984) str.52.
- 49 S.Južnič, Zgodovina tehnologije tankih plasti, Vakuist 15/4 (1995) str.20.
- 50 Wise, n.d., 1984, str.54-56.
- 51 Tonks, Trans.Electrochem.Soc 72 (1937) str.167 in Theory of Magnetic Effects in the Plasma of an Arc, Phys.Rev 56 (15.8.1939) str.369.
- 52 Teorija raztopin Debya in Hückla je bila objavljena v Phys. Zeits. 24 (1923) str. 185 in 305 (Langmuir in Tonks, n.d., Phys. Rev. 33 (1929) str. 201; 34 (1929) str. 876-922 in Spitzer, n.d., 1956, str.17-18).
- 53 Alfvén, n.d., 1963, str.134-135.

Poročilo o udeležbi zastopnikov DVTS na seji in skupščini mednarodne zveze IUVESTA

Mednarodna zveza za vakuumsko znanost, tehnike in aplikacije (IUVESTA) je ob letošnjem skupu svojih strokovnih kongresov (29.8. - 4.9. v Birminghamu: IVC-14, ICSS-10, NANO-5 in QSA-10) izpeljala tudi:

- 81. sejo izvršnega odbora (ki se mu je iztekel triletni mandat), 27.8.98,
- 13. generalno skupščino držav članic (2.9.98) in
- 82. sejo izvršnega odbora - novega, ki je prevzel dolžnosti 4.9.98.

V Društvu za vakuumsko tehniko Slovenije (DVTS), ki je aktivni član IUVESTA, sem bil na seji I.O. 26.2.98 izvoljen za slovenskega zastopnika v omenjeni mednarodni zvezi za naslednje triletno obdobje. Bil sem povabljen, da sodelujem na skupščini IUVESTA in na 82. seji I.O. Dosedanja naša zastopnica, dr. Monika Jenko, ki je tudi koordinator dejavnosti IUVESTA za manj razvite dežele, se je udeležila vseh treh sestankov, jaz pa le zadnjih dveh.

13. skupščina IUVESTA (13th General Meeting of IUVESTA) je potekala v eni od dvoran kongresnega centra v Birminghamu v sredo, 2. sept. 1998 od 18 do 20.30 ure. Prisotnih je bilo približno 100 delegatov, večinoma po trije iz vsake države članice, teh je sedaj 30 po številu. Po ugotavljanju navzočih je dosednji predsednik IUVESTA, prof. Robins, pozdravil prisotne in skupaj z dolgoletnim sekretarjem prof. Collignonom sta pričela sestanek. Pomembnejše točke so bile: sprejetje popravkov statuta, poročilo sekretarja, poročilo odgovornega za tehniko in znanost (Valbusa) ter poročilo blagajnika (Dobrozemsky), kjer je bilo omenjeno, da se bo članarina države članice povečala od 200 na 220 SFr. Potem je predsednik Robins poročal o delovanju oz. o sestankih izvršnega odbora, o naši aktivnosti za dežele v razvoju in o menjavi generacij oz. funkcionarjev v zvezi. Sledile so volitve novih funkcionarjev, predaja predsedništva ter nova imenovanja. Za konec je bilo še nekaj obvestil, pripomb (na finančno poročilo) in krajših pojasnjevanj. Vsi smo se nato udeležili skupne zakuske na Univerzi Birmingham, kjer je bilo veliko priložnosti za pogovore in navezavo stikov.

Novo vodstvo IUVESTA je naslednje: predsednik prof. Woodruff, podpredsednik M.G. Barthes-Labrousse, generalni sekretar W.D. Westwood, blagajnik H. Wahl, znanstveni direktor U. Valbusa, znanstveni sekretar M. Sancrotti.

82. seja izvršnega odbora IUVESTA je tudi potekala v kongresnem centru, in sicer v petek, 4.9.98, s pričetkom ob

14.00. Sejo je odprl prof. Woodruff. Po ugotavljanju navzočnosti (Westwood) in predstavljanju vseh delegatov je novi predsednik (Woodruff) predstavil svoje videnje bodočega delovanja zveze in njenih sekcij (tudi že na osnovi številnih pogovorov, ki jih je že imel s starimi in z novimi sodelavci. Sledili so načrti za delo po področjih: o nagradah in šolanju (Valbusa), o kongresih (Rogers), o izobraževanju (Greene), o daljnoročnem planiranju (Barthes), o publiciranju (Westerberg) in o statutarnih zadevah (Westwood). Finančno prognozo za obdobje 1998-2001 je podal novi blagajnik, Švicar g. Wahl. Nato je prof. Valbusa, odgovoren za Science Technical Divisions (STD), podal predvideno delovanje sekcij (Applied surface science, Electronic materials+processing, Nanometer structures, Plasma science+technique, Surface science, Thin films, Vacuum metallurgy, Vacuum science) ter zaprosil, da vsaka sekcija sama pripravi podatke o sebi in svoj program aktivnosti. Še ne popolno poročilo o pravkar končanem kongresu (IVC14, ICC10, ..., nad 700 abstraktov, delno že znana finančna situacija, ...) v Birminghamu je podal Woodruff. O naslednjem svetovnem kongresu l. 2001 v San Franciscu je nekaj podatkov povedal prof. Rogers; prvi pripravljani sestanek na to temo je potekal že septembra letos v AVS. Glasovanje o kraju, kjer bo potekala naslednja seja izv. odbora (EC 83) februarja 1999, je med San Diegom (ZDA) in Bains de Sallon (Švica) dalo prednost Švici (19.-21.02.99). Tam bo takrat potekala delavnica o uporabi plazme v industriji. Naslednji sestanek EC 84 bo v Bruslju približno 5.-10. sept. 1999. Sledilo je vpisovanje prisotnih v formular sekretariata, kje bi kdo v naslednjem obdobju želel sodelovati (Slovenci smo se prijaviili za "vzgojo", "finance" in "razvijajoče se dežele"). Ob sklepu seje so bila dana še razna navodila in obvestila:

- kmalu bomo prejeli poročilo sekretarja (dr. Westwood)
- skrbno naj pošiljamo poverilnice, če se kdo ne bo mogel sam udeležiti seje
- v naslednjem obdobju bodo velike konference v Aziji in na Japonskem (Robins) ter v Egiptu
- podatke in zapisnike sej od vseh aktivnosti (sekcij, društev, držav,...) pošiljati sekretarju.

Na koncu sta se predsednik in sekretar zahvalila angleškimi kolegom za organizacijo kongresa ter vsem navzočim za sodelovanje.

Mag. Andrej Pregelj

Priprava površine podlag pred nanosom vakuumskih tankih plasti - modifikacija površin

Med nanašanjem vakuumskih tankih plasti atomi iz izvira prispejo na površino posamično. Večina se jih na površini adsorbira in združi v nukleacijska jedra. Iz njih zrastejo kristalna zrna, ki oblikujejo tanko plast. Fizikalne lastnosti nanesene plasti (adhezija, mikrostruktura,...) so zato v veliki meri odvisne od površine podlage (t.j. od vrste podlage, čistosti in topografije površine, narave in dosega jakosti vezi med plastjo in podlago). Meja med podlago in plastjo je najpomembnejši del tankoplastnega sistema, saj v prvi vrsti določa, kakšna bo adhezija plasti. V splošnem razlikujemo pet vrst takih mej:

- a) **mehansko mejo**, ki nastane na grobi ali zelo porozni površini. V tem primeru naneseni material zalije pore oz. raze, kar daje neko stopnjo adhezije, ki je odvisna od poroznosti oz. hrapavosti podlage. Kemijskih vezi med podlago in plastjo v tem primeru ni.
- b) **spojinsko mejo**, ki nastane, kadar pride do kemijske reakcije med kondenzatom in podlago; debelina takšne meje je nekaj atomskih plasti.
- c) **ostro mejo**, ki nastane med dvema materialoma, ki nista medsebojno topna, kemijske reakcije na meji pa so šibke.
- d) **difuzijsko mejo**, ki nastane med dvema materialoma, ki sta medsebojno topna. V tem primeru se v mejni plasti zvezno spreminjata sestava in mrežni paramater. Energija, ki je potrebna za nastanek difuzijske cone med podlago in plastjo, je v splošnem 1-5 eV. To energijo moramo na nek način dovajati, npr. s segrevanjem ali z ionskim obstreljevanjem podlage. Pri naprejevanju npr. bakra na nesegrete podlage iz zlata je izvir energije, ki sproži difuzijo, toplota, ki se sprošča med samo kondenzacijo. Difuzijska plast lahko rabi kot prehodna med dvema zelo različnima materialoma in ima blagodejne učinke, npr. zmanjša termične napetosti zaradi različnih razteznostnih koeficientov.
- e) **psevdivduzijska meja**, ki nastane, kadar atome podlage in plasti, ki niso medsebojno topni, na meji premešamo npr. z ionskim obstreljevanjem.

Na mehanizem rasti in adhezijo tankih plasti na različne podlage lahko vplivamo na več načinov. Zaporne plasti v obliki fizikalno ali kemijsko adsorbiranih plinov, spojninskih plasti in drugih kontaminantov preprečujejo neposreden stik kondenzata s podlago. Zato je prvi pogoj za dobro adhezijo odstranitev kontaminantov s površine. Adhezijo izboljšamo, če povečamo hrapavost površine, nanesemo vmesno plast, spremenimo razmere pri nanašanju tanke plasti (npr. temperaturo podlage, gostoto toka in energijo ionov na podlago). Tako npr. lahko s povišano temperaturo podlage omogočimo medsebojno difuzijo atomov kondenzata in podlage ter tako ostro mejo spremenimo v difuzijsko. Segrevanje podlag tudi poveča verjetnost za kemijsko reakcijo na meji. Difuzijo spodbudimo tudi tako, da na površini podlag naredimo (npr. z ionskim obstreljevanjem) čimveč napak (npr. točkaste napake, dislokacije). Istočasno povečamo število nukleacijskih mest. Z ionskim obstreljevanjem hkrati spodbudimo difuzijske procese, zato lahko na meji dveh materialov, ki nista topna, nastane psevdodifuzijska plast. Tudi z nanosom zelo majhne količine druge aktivne snovi na podlago lahko izboljšamo nukleacijo tanke plasti.

Da dosežemo želene lastnosti tankih plasti (npr. adhezijo), moramo površino podlag pred nanosom ne samo dobro očistiti, ampak pogosto tudi spremeniti (modificirati) njene kemijske, morfološke ali mehanske lastnosti. Tehnolog lahko vpliva na lastnosti vakuumskih tankih plasti s predobdelavo podlage, t.j. s spreminjanjem reliefa njene površine, s predhodnim pregrevanjem, s kemijskim čiščenjem oz. jedkanjem, ki povzroči spremembo njene sestave, z obdelavo v plazmi, ki zaradi adsorbiranih ionov poveča število nukleacijskih centrov, s prednukleacijo z drugo aktivno snovjo. Velik vpliv imajo tudi preostali plini v vakuumski posodi, ki s svojo navzočnostjo ovirajo tako nukleacijo kot rast plasti.

Primer kemijske modifikacije površine je npr. obdelava površine polimerov v plazmi. Uporabo plazme za aktivacijo površine polimerov sta že leta 1968 predložila Beauchamp in Buttrill. Ceneno plastiko, kot je npr. polipropilen, uporabljamo za izdelavo številnih izdelkov iz vsakdanjega življenja, ker se odlikuje z odličnimi mehanskimi lastnostmi. Njihova slaba stran pa je, da jih je težko barvati, tiskati ali lepiti, ker slabo oprijemajo barvo oz. lepila. Vzrok za to je nepopolnost površine takšnih polimerov. Problem lahko rešimo s klasičnimi metodami modifikacije površine (obdelava s plamenom, kemijska obdelava, obdelava z UV svetlobo). Medtem ko so kemijski postopki ekološko nesprejemljivi, pa druga dva postopka ne omogočata obdelave kompleksnih površin. Veliko primernejša in učinkovitejša modifikacija polimernih površin je plazemska aktivacija. Uporabimo bodisi plazmo, ki jo ustvarimo pri atmosferskem tlaku (npr. koronska plazma), ali nizkotlačno plazmo. Za delovni plin izberemo tistega, ki ne polimerizira v plazmi (kisik, dušik, dušikovi oksidi, amoniak ali inertni plini). Pri tem aktivni delci plazme sodelujejo v treh procesih:

- a) vpadli ioni odstranijo s površine adsorbirane molekule, hkrati pa razbijejo verige polimerov, pri čemer nastanejo radikali, ki bistveno spremenijo lastnosti površine polimerov. S plazemsko obdelavo nastanejo na površini večine polimerov karbonsilni (kisikova plazma) ali aminske (dušikova plazma) radikali, na katere se potem vežejo atomi nanosa. Tako se poveča gostota nukleacijskih jeder in izboljša adhezija.
- b) elektroni iz plazme povzročijo disociacijo in zamreženje polimernih verig.
- c) radikali monomerov, ki jih dodajamo v plazmo, se vežejo na površino polimerov in s tem povečajo njeno reaktivnost. S plazemskimi procesi lahko spremenimo ne le kemijsko sestavo površine, ampak tudi nekatere druge lastnosti, kot so npr. omočljivost, adhezivnost, trdoto, kemijsko inertnost, koeficient trenja, lepljivost, biokompatibilnost itd. S plazemsko obdelavo lahko aktiviramo površino večine polimerov, razen tistih na osnovi fluorogljikov.

Kemijske lastnosti površine podlage lahko spremenimo tudi tako, da dodamo vmesno plast, ki ima lahko več funkcij.

Tako npr. adhezijo kovinskih plasti (npr. bakra) na podlage iz polimera (npr. poliamid, polietilen) izboljšamo, če njeno površino najprej pojedkamo v kisikovi nizkotlačni plazmi, nato pa napršimo 0,1 do 1 μm debelo plast kroma. Pri tem se krom veže na funkcionalne kisikove skupine, kar zagotovi dobro oprijemljivost na polimerno podlago. Na kromovo plast nato nanesemo poljubno kovinsko plast.

Z vmesno plastjo lahko zgladimo površino. Tako npr. pred nanosom dekorativne prevleke na grobo površino kovine nanese plast polimera, ki izboljša gladkost le-te. Tudi površino reflektorjev za avtomobilске žaromete pred nanosom Al odbojne plasti najprej izravnamo s 30-100 μm debelo plastjo laka. Tak postopek uporabljajo v tovarni Saturnus Avtooprema, d.d., v Ljubljani. Lak nanesejo na površino reflektorjev z elektrostatičnim pršenjem, nato pa ga toplotno obdelajo.

Z vmesno plastjo lahko tudi preprečimo difuzijo materiala iz podlage v plast. Primer so mikroelektronska vezja z veliko gostoto elementov (VLSI), kjer reakcijo med metalizacijsko plastjo na osnovi aluminija ali volframa s silicijem preprečimo tako, da nanese vmesno zaporno plast TiN ali TiW. Drug primer je nanos epoksidne vmesne plasti na površino polimera, s čimer preprečimo difuzijo atomov podlage v plast.

Vmesna plast lahko v nekaterih primerih zagotovi dobro adhezijo funkcionalne plasti na podlago. Tako npr. adhezijo zlata ali srebra na oksidne podlage (npr. steklo) izboljšamo, če na podlago najprej nanese tanko plast kroma. Dobra adhezija kroma na oksidni podlagi je posledica oksidacije kroma. Na meji krom-zlato pa pride do nastanka difuzijske plasti, ki zagotovi dobro adhezijo kot obema. Na podoben način izboljšamo adhezijo nparjene plasti aluminija na stekleno podlago. Vmesna plast je v tem primeru lahko nikelj ali krom.

Adhezijo trdih zaščitnih prevlek TiN na orodna jekla izboljšamo tako, da na vroče podlage ($T=450^{\circ}\text{C}$) najprej nanese tanko plast čistega titana. Titan tvori z ogljikom iz jekla zrna TiC, ki potem delujejo kot nukleacijska jedra pri nanosu prevleke TiN. Naslednji mehanizem, ki vodi do izboljšanja adhezije TiN prevlek, je tvorba intermetalnih zlitin titana in železa v mejni plasti. Sestava titanove vmesne plasti je lahko konstantna, lahko pa se spreminja zvezno od čistega titana do TiN.

Adhezijo plasti lahko izboljšamo tudi tako, da podlage obstrelujemo z ioni iz plazme. Pri tem so podlage na negativnem potencialu -50 do -200V, ki pospeši ionizirane atome tarče. Uporabo tega potenciala (»bias«) pri nanašanju tankih plasti je prvi predložil Berghaus že v tridesetih letih. Pravilno je ugotovil, da lahko na tak način izboljšamo mikrostrukturo in adhezijo plasti. Ionsko obstreljevanje podlage pred nanosom plasti ima več pomenov. Ker povzroči nastanek točkastih defektov in napetostnih gradientov, poveča difuzijo in s tem topnost atomov nanosa. Ioni z energijo 50 do 200 eV se vgradijo nekaj atomskih plasti globoko in tako oblikujejo psevdodifuzijsko plast, ki bistveno izboljša adhezijo plasti. Psevdodifuzijska plast nastane kot posledica atomskega mešanja. Le-tega sproži vpadli ion, katerega energija se po velikem številu trkov prenese na veliko število atomov podlage. Psevdodifuzijska plast zato lahko nastane tudi, kadar atomi podlage in nanosa medsebojno niso topni. Zaradi obstreljevanja površine z »visokoenergijskimi« ioni inertnega in reaktivnega plina (npr. dušik) ter ioniziranimi atomi nanosa se hkrati bistveno poveča njihova površinska difuzija. Zato lahko zasedejo tista mesta na površini, ki so energijsko manj ugodna. Tehniko nanašanja tankih plasti s prednapetostjo (»bias«) uporabljamo na Institutu Jožef Stefan pri nanašanju trdih zaščitnih prevlek za zaščito orodij in strojnih delov. Kadar nanašamo tanke plasti na podlage, ki so električni izolatorji, jih obstrelujemo z nevtralnimi atomi iz posebnih izvirov s širokim curkom (premer 10 do 50 cm) »visokoenergijskih« (100-500 eV) delcev. To tehniko uporabljajo v podjetju Fotona za izboljšanje adhezije in gostote optičnih tankih plasti na steklene podlage. Tako izboljšajo adhezijo, gostoto plasti in lomni količnik.

Z vmesno plastjo, ki ima majhne notranje napetosti (npr. zlitina TiCr (75/25)), lahko v nekaterih primerih zmanjšamo notranje napetosti v mejni plasti. Preostale napetosti v njej namreč poslabšajo adhezijo.

Adhezijo tankih plasti lahko povečamo tudi tako, da zvečamo hrapavost površine podlage. Ta vpliva tako na rast plasti, kot na njene lastnosti, zato je eden kritičnih parametrov za doseg ponovljivih lastnosti plasti. Napake in hrapavost podlage ovirajo difuzijo nparjenih oz. nparšenih atomov tarče po površini in učinkujejo kot nukleacijski centri, ki večajo število klic in otkov. Hrapavost površine lahko povečamo z mehansko abrazijo (npr. brušenje, poliranje, peskanje) ter s kemijskim ali elektrolitskim jedkanjem. Pri tem se hrapavost površine spreminja z jedkanjem mej med zrni oz. jedkanjem zrn.

Mehanske lastnosti površine lahko spremenimo, ne da bi pri tem spremenili njihovo kemijsko sestavo. V številnih primerih trdnost površine povečamo, če z nje odstranimo razpoke. Zato krhke materiale (npr. keramiko) po strojni obdelavi kemijsko jedkamo, da zaoblamo razpoke, ki so med obdelavo nastale na površini. Če teh razpok ne odstranimo pred nanosom plasti, se razširijo v plast, kar poslabša njeno oprijemljivost na podlago. Tudi poroznost površin zmanjšuje adhezijo tankih plasti, saj močno zmanjša stično površino. Poroznost lahko odpravimo z impregnacijo s primernim materialom.

Mehanske lastnosti površin lahko spremenimo tudi tako, da plazmi spremenimo kemijsko sestavo. Primer je plazemsko nitiranje površine orodnih jekel ali titanovih zlitin. Med tem poteka na površini podlag več procesov:

- a) desorpcija nečistoč
- b) razprševanje površine oksidne plasti
- c) nastajanje napak v kristalni strukturi, ki pospešijo difuzijo
- d) lokalno povečanje temperature
- e) implantacija dušikovih in ogljikovih ionov
- f) nastanek spojinske cone
- g) adsorpcija nevtrálnih delcev
- h) difuzija atomov dušika s površine v notranjost.

Pri tem nastaneta tanka spojinska ($\sim 5 \mu\text{m}$) in difuzijska plast (50-1000 μm). Medtem ko je spojinska cona krhka, ima difuzijska plast boljše mehanske lastnosti kot originalna površina. Zgled je plazemsko nitiranje jekel. Če na nitirano površino nanese keramično prevleko, ji dodatno izboljšamo obrabno odpornost. Govorimo o t.i. prevlekah duplex.

Poseben primer modifikacije površine je odstranitev naravne oksidne plasti, ki nastane npr. na silicijevih rezinah ali podlagah iz aluminija, ki so izpostavljene atmosferskim vplivom. 5 do 10 nm debelo plast silicijevega oksida odstranimo v razredčeni fluorovodikovi kislini. Čas jedkanja izberemo tako, da odstranimo le oksidno plast. Predolgi časi jedkanja niso priporočljivi, ker se poveča hrapavost silicijeve rezine. Po tej operaciji moramo podlage najpozneje v 30 minutah uporabiti, sicer ponovno zraste oksidna plast.

Primer modifikacije površin je plazemska oksidacija, ki se že dolgo časa uporablja v mikroelektroniki. S plazemsko oksidacijo silicija pripravimo pasivacijske plasti SiO₂. Ta postopek oksidacije poteka pri bistveno nižji temperaturi (300-500°C) kot termična oksidacija (1000-1200°C), s čimer se izognemo številnim nevesočnostim, kot je npr. difuzija težkih kovin v silicij.

Dr. Peter Panjan,
Institut "Jožef Stefan",
Jamova 39, 1000 Ljubljana

14th International Vacuum Congress (IVC-14), 10th International Conference on Solid Surfaces (ICSS-10), 5th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology (NANO-5) in 10th International Conference on Quantitative Surface Analysis (QSA-10), Birmingham

Poročilo o delu v sekcijah »Znanost o površinah« in »Nanostrukture«

International Convention Centre v Birminghamu je med 31.8. in 4.9.1998 gostil pomembno mednarodno konferenco, ki je združevala 14th International Vacuum Congress (IVC-14), 10th International Conference on Solid Surfaces (ICSS-10), 5th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology (NANO-5) in 10th International Conference on Quantitative Surface Analysis (QSA-10).

Konferenca je bila organizirana v okviru International Union for Vacuum Science, Technique and Applications (IUVSTA), ki danes združuje vrsto sekcij (Applied Surface Science, Nanometer Structures, Surface Science, Thin Films, Electronic Materials and Processing, Plasma Science and Technique, Vacuum Metallurgy in Vacuum Science), od katerih je skoraj polovica tako ali drugače povezana z raziskavami površin. Med številnimi udeleženci konference je bilo tudi dvanajst Slovencev: z Inštituta za tehnologijo površin in optoelektroniko, Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko, z Inštituta za kovinske materiale in tehnologije in z Inštituta »Jožef Stefan«, ki so s prispevki sodelovali v številnih vzporednih sekcijah.

Raziskavam površin je bilo namenjenih kar nekaj sekcij, tako da je bilo pogosto težko izbirati med podobnimi prispevki, ki so bili predstavljeni na vzporednih sekcijah. Moderne površinske metode, od tunelske mikroskopije in mikroskopije na atomsko silo do kvantitativnih metod, kot so nizkoenergijski elektronski uklon z Augerjevo spektroskopijo in druge, so omogočile pravi razcvet tega področja. Iz prispevkov je moč sklepati, da se raziskovalci danes največ ukvarjajo s problemi novih površinskih struktur, z manipulacijo površin na atomskem nivoju, s katalizo in površinskimi reakcijami in z razvojem novih metod, tako za analizo kot za pripravo površin s specifičnimi lastnostmi. Pri izbiri materialov še vedno prevladujejo silicij, nekaj manj spojine III-V in II-VI, kar po svoje priča o tem, da si od teh raziskav neposredno korist obeta razvita industrija, ki se predvsem ukvarja z modernimi mikro- in optoelektronskimi tehnologijami.

V okviru konference smo imeli udeleženci tudi možnost obiskati Nano-scale Physics Research Laboratory, ki je eden od desetih samostojnih laboratorijev Odseka za fiziko in astronomijo Univerze v Birminghamu. Laboratorij je bil ustanovljen leta 1994 z namenom prispevati k raziskavam s področja fizike, kemije in tehnologije nanometrskih struktur, naprav in procesov, tako z vidika osnovnih raziskav kot tudi razvoja modernih optičnih, električnih in kemijskih tehnologij za 21. stoletje. V laboratoriju se ukvarjajo s fiziko atomskih skupkov in nanostruktur, pripravo in študijem novih molekularnih materialov na osnovi fulerenov, z obdelavo polprevodniških površin z nizkoenergijskimi elektronskimi curki, z manipulacijo atomov in molekul na površinah s tunelsko mikroskopijo v ultra visokovakuumskih razmerah ter z razvojem novih katalizatorjev in senzorjev. Obisk je bil koristen tudi zato, ker smo lahko tisti, ki se ukvarjamo z nekaterimi omenjenimi področji, primerjali videno z našim delom in možnostmi.

V okviru konference sem tudi kot slovenski zastopnik sodeloval pri sestanku Nanometer Structure Division (NDS) pri IUVSTA, v katero je že nekaj let včlanjena tudi Slovenija. Pred sestankom smo zastopniki 29 nacionalnih združenj izvolili novi Steering Committee z desetimi člani (E. Gornik iz Avstrije, R. Clark iz Avstralije, R. Wiesendanger iz Nemčije, B. Geerligs iz Nizozemske, N. Garcia iz Španije, L. Samuelson iz Švedske, H. J. Guentherodt iz Švice, R. Palmer iz Združenega kraljestva, D. Bonnell iz Združenih držav in S. Yamamoto iz Japonske). Istočasno je od Dr. J. M. Murdayja (Naval Research Laboratory v Washingtonu) prevzel predsedstvo sekcije Prof. R. Wiesendanger (Univerza v Hamburgu), ki je ob nastopu napovedal, da si bo v času mandata prizadeval predvsem a) za intenzivnejšo znanstveno izmenjavo znotraj NDS, konkretno za izvedbo 3rd Intern. workshop on Non-contact AFM in 2nd Intern. Symp. on SPS v Hamburgu leta 2000, b) za intenzivnejšo personalno izmenjavo med univerzami, raziskovalnimi centri in industrijo, tudi z internim oglaševanjem mest na spletni strani in c) za promocijo sekcije v znanstveni politiki ter preko IUVSTA tudi za pomoč pri organizaciji šol in konferenc. Tako bo med drugim naslednje leto konferenca NANO-6 v Seulu ter Joint Workshop with EM on "Quantum Structures and Devices" v Coroni, Italija.

Dr. Albert Prodan

Poročilo o delu v sekciji »Plazemska znanost in tehnike«

S področja plazemske znanosti je bilo predstavljenih le nekaj prispevkov, saj se v zadnjih letih večina raziskovalcev ukvarja z donosnejšo tehnološko uporabo plazme. Plazemska obdelava površin in nanašanje tankih plasti je bilo področje, na katerem je bilo predstavljenih največ del na konferenci. Vendar pa so bila dela razpršena po drugih sekcijah, predvsem v elektronskih materialih, tankih plasteh in uporabni znanosti o površinah. Formalno je bilo tako v sekciji plazemska znanost in njena uporaba predstavljenih le 53 predavanj ali postrov. Sicer pa je bilo največ predavanj in postrov s področja uporabe plazme namenjeno nanašanju tankih plasti. Pri tem se je še utrdila vodilna vloga različnih magnetronskih razelektritev pri nanosu različnih prevlek vrhunske kakovosti. Glavna smer pri proizvodnji teh plasti gre v povečanje hitrosti nanosa, zato se uporabljajo vedno večje komore z vedno večjimi električnimi močmi razelektritev.

Dr. Miran Mozetič

Poročilo o delu v sek. »Tanke plasti« in »Vakuumska metalurgija«

V sekciji »Tanke plasti« je bilo nekaj zelo odmevnih preglednih predavanj o industrijski uporabi vakuumskih postopkov nanašanja tankih plasti. J. Schneider z univerze v Linköpingu je predstavljal prednosti in slabosti industrijskih postopkov za pripravo amorfnih in kristaliničnih tankih plasti Al₂O₃. Te plasti se uporabljajo kot obrabno obstojne prevleke (zaščita orodij in strojnih delov), kot difuzijske zaporne plasti (zaščita polimernih folij za vakuumsko pakiranje hrane), za optična prekritja in kot dielektrične plasti. Poudarek je bil na opisu postopkov, ki omogočajo velike hitrosti nanašanja (50 do 1000 nm/s). Takšni postopki nanašanja tankih plasti so bili tudi predmet zelo zanimivega vabljenega predavanja V. Kirchhoffa s Fraunhoferjevega inštituta iz Dresdna. Velike hitrosti nanašanja bistveno zmanjšajo stroške proizvodnje in so pogoj za to, da bodo PVD postopki nanašanja tankih plasti postali konkurenčni elektrokemijskim. Pri tem ni samo problem, kako doseči tako velike hitrosti nanašanja, ampak tudi, kako zagotoviti ustrezno mikrostrukturo plasti. Za to je potrebna plazma z veliko gostoto. Med najobetavnejšimi PVD postopki je magnetronsko naprščevanje v pulzni plazmi. To tehniko nanašanja plasti je predstavil S. Schiller s Fraunhoferjevega inštituta v Dresdnu. Govoril je o prednostih površinskih tehnologij, ki temeljijo na pulzni plazmi.

V sekciji »Vakuumska metalurgija« ni bilo odmevnejših predavanj. Na zmanjšanje zanimanja je prav gotovo vplivalo dejstvo, da je bila skoraj istočasno v Garmisch-Partenkirchnu organizirana konferenca »Plasma and Surface Engineering«, ki je specializirana za to področje. Da bi pritegnili večje zanimanje za to tehnološko zelo pomembno področje, so na sestanku »Vacuum Metallurgy Division«, kjer sem sodeloval kot zastopnik Slovenije, predložili spremembo naslova same sekcije, češ da je nekoliko zastarel. Vsebinsko primernejši bi bil naslov »Surface engineering and vacuum metalurgy«.

Dr. Peter Panjan

Razstava opreme

Razstava je bila postavljena v centralnem prostoru Birminghamskega INVENTION centra, kjer so v okoliških dvoranah potekala predavanja. Svoje izdelke in znanje je ponujalo 82 podjetij, ki s svojo dejavnostjo posegajo na zelo različna področja, bolj ali manj vezana na vakuumsko tehniko. Tako smo poleg proizvajalcev vakuumskih črpalk, merilnikov tlaka, masnih spektrometrov in instrumentov za analizo površin lahko spoznali še novosti tehniških založb, elemente, potrebne pri kriotehniko, naprave za mikroelektroniko in elektrooptiko, različne električne napajalnike (VF, VN, mikrovalovni), getre, potrebščine za fizikalne eksperimente (za ustvarjanje plazme, X-žarkov, curkov naelektrjenih delcev) itd. Zanimive so bile izvedbe nekaterih elementov in sistemov, predvidenih za doseganje ultra- in ekstremno-visokega vakuumu (UVV in XVV). Posebno zanimanje mi je vzbudil miniaturni merilnik vakuumu danske firme Wenzel Electronics z nazivom »MikroPirani«, ki lahko meri tlake v območju 1000 -10⁻⁴ mbar. Opaziti je tudi močno tendenco med proizvajalci vak. opreme, da bi razvili cenovno ugodno suho (tj. brezoljno) črpalko. Po splošnem mnenju je bila to največja tovrstna prireditve v Evropi letos. Ne glede na to, s katerega področja - nanotehnologije, tanke plasti, plazma, znanost o površinah in prekritjih, polprevodniki - je obiskovalec prišel in ne glede na to, kaj je njegov posej na delovnem mestu - menedžer ali konstrukter - v vsakem primeru je imel veliko videti.

Mag. Andrej Pregelj

V SPOMIN

dr. Francetu Lahu
(1923-1998)



Letos po poletnih dopustih nas je težko prizadela vest o smrti dolgoletnega sodelavca IEVT, doktorja fizikalnih znanosti, pronicljivega raziskovalca, aktivnega člana Društva za vakuumsko tehniko Slovenije (DVTS) in več let tudi njegovega predsednika.

Rodil se je leta 1923 v kraju Prvenci pri Markovcih na Štajerskem. Gimnazijo je končal l. 1941 na Ptuju. Med vojno ni smel nadaljevati šolanja, ampak je bil pod nemško okupacijo prisiljen opravljati pomožna dela na železnici, na postajah na Ptuju in v Avstriji. Po opravljenem višjem tečajnem izpitu pomladi 1946 se je jeseni istega leta vpisal na Univerzo v Ljubljani. Študij mu je bil spet prekinjen s služenjem vojaškega roka (1946-48 v Horgošu), po vrnitvi pa ga je nadaljeval na takratni Tehniški visoki šoli v Ljubljani. Vzporedno se je l. 1950 zaposlil na tej šoli kot laborant v VV laboratoriju Inštituta za šibki tok. V začetku 1954 je bil premeščen na Inštitut za elektroniko v Ljubljani (predhodnik sedanjega IEVT, ki je avgusta 1954 postal samostojni zavod); še istega leta se je potem udeležil strokovnega izpopolnjevanja v podjetju Edwards v Angliji. Diplomiral je leta 1956 z nalogo "Konstrukcija in izdelava ionizacijskega vakuumetra s tetrodo" in kmalu postal višji strokovni sodelavec. Doktoriral je na Prirodoslovno-matematični fakulteti v Zagrebu leta 1965 s temo "Preiskovanje stabilnosti omega-trona za kvantitativne meritve parcialnih tlakov pri mikroanalizi residualnega plina v visokem in ultravisokem vakuumu". Leta 1968 je bil imenovan za vodjo oddelka za vakuumsko tehniko in to delo je potem opravljal do upokojitve v letu 1982. Leta 1973 je bil na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani habilitiran kot docent za področje vakuumске tehnike, leta 1979 pa ga je Prirodoslovno-matematična fakulteta Sveučilišta v Zagrebu imenovala za višjega znanstvenega sodelavca. Kot predsednik je delal v DVTS od leta 1975 do 1982. Leta 1983 je bil na vakuumskem kongresu v Zagrebu skupaj z dr. Ševarcem imenovan za častnega člana zveze JUVAK. Umrl je letos konec septembra doma v Ljubljani, in bil pokopan v krogu družine, sorodnikov in bližnjih znancev na Markovskem pokopališču pri Ptuju.

Dr. France Lah se je vedno zavzemal za novosti. Tako je že na začetku svojega službovanja zelo aktivno sodeloval pri oranju ledine na področju vakuumске tehnike v Sloveniji oz. v Jugoslaviji. V njegovem oddelku (na IEVT) so nastajali prvi vakuumски sistemi, se rojevali živosrebrni, pa Piranijevi, Penningovi, B.-Alpertovi merilniki in kalibracijske metode, potekal je razvoj različnih črpalk in razviti so bili številni vakuumски sistemi ter aparature, namensko za najrazličnejše tehnološke postopke po Sloveniji. Poleg strogo razvojno-raziskovalnega dela, ki je večinoma opisano v znanstveno-strokovnih člankih (več kot 62 naslovov), je ves čas deloval še na vzgojnem področju: od učenja mladih kadrov ob delu v laboratorijih, rednih učnih ur na srednji tehniški šoli in na tečajih DVTS do predavanj o vakuumски tehniki na univerzi v okviru podiplomskega študija. V drugi polovici svojega plodnega delovnega obdobja si je veliko prizadeval, da bi postala vakuumistika, kot izrazito interdisciplinarna veda, novo, enakopravno področje v moderni delitvi strokovnih dejavnosti. Trudil se je tudi, da bi prav vakuumски oddelek IEVT dobil pravico umerjanja vakuumskih instrumentov za vso Jugoslavijo.

Dr. Lah je navezal mnoge stike s tujimi tehnološkimi skupinami; bil je aktiven pri snovanju slovenskega vakuumskega centra, jugoslovanske zveze in mednarodne organizacije (IUVSTA). Podpiral je razvojno-raziskovalno delo, kjerkoli je bilo mogoče, in tudi v ta namen pridobival mlajše sodelavce. Poleg aktivnega delovanja v stroki se je trudil tudi za urejanje odnosov v svojem družbenem okolju, tako na Inštitutu (bil je predsednik sveta IEVT, dvakrat predsednik upravnega odbora, predsednik raznih komisij itd.) kot v krajevni skupnosti, kjer je prebival. Osebnostno je bil skromen, preprost, vedno pripravljen pomagati pri reševanju vsakršnih težav in rad se je iskreno veselil uspehov svojih sodelavcev.

Naj ob tej priliki obudimo nekaj spominov nanj. Tisti, ki smo ga poznali, verjetno ne bomo nikdar pozabili,

kako se je vsa leta trudil za afirmacijo DVTS,

kako je vsak dan zjutraj obšel vsa delovna mesta in vsakemu zaposlenemu v oddelku namenil vzpodbudno besedo,

s kako skrbno pisavo je pripravljala službena, društvena in druga poročila,

kako se je veselil prvih števil Vakuumista, ...

In še, in še ...

Njegovi prijatelji in sodelavci se ga bomo spominjali kot dobrega, modrega človeka in kot vztrajnega strokovnjaka, ki je znal zaneti zanimanje za vakuumsko tehniko in za delovanje v društvu.

Andrej Pregelj

V SPOMIN

Alojzu Virantu
(1936-1998)



Oktober 1998

Viško pokopališče v
prelepem in zlatem jesenskem soncu.....

Nad nami čisto in sinje nebo.....

V tišini se čuje tiho podrsavanje korakov žalujočih
po pokopališkem pesku

Tu in tam tih pogovor

V daljavi pisk lokomotive.....

Ozrem se proti cerkvi, stolp je ves zlat v soncu
.....Tam v daljavi vidim Krim. Malo na levo Mokrc
in seveda tudi Kurešček

Pod njim je mala vasica Dobravca s cerkvico, sicer
je ne vidim, a jo le slutim. Tu, v kmečki družini, je
ugledal luč sveta naš sodelavec in prijatelj Lojze
Virant, ki ga sedaj spremljamo na njegovi posled-
nji poti.....

V nežni mladosti mu ni bilo poklonjeno srečno
otročstvo, kajti vojna je bila strašna in dom požgan.

Po vojni se je šolal v Ljubljani za kovinarja. Nato
je delal v Kovinski industriji Ig in Elektromedicini.
Spoznal sem ga 3. januarja 1957, ko se je zaposlil
v mehanski konstrukciji našega Inštituta za elek-
troniko in vakuumsko tehniko. Bil je mlad, pre-
prost in veder kmečki fant. Malo redkobeseden in
resen, a tudi prijetno hudomušen in šegav.

Nato je ob delu diplomiral na strojnem oddelku
Tehniške srednje šole. Na inštitutu je postal pravi
specialist za mehanske konstrukcije nešteti
različnih vakuumskih naprav in elementov. To so
bile razne vakuumske črpalne in impregnacijske
naprave, rotacijske vakuumske črpalke, difuzijske
oljne črpalke, ventili, pasti itd., itd. Od leta 1988 je
bil tudi vodja konstrukcije IEVT. Nazadnje, že v
pokoju, je kot konstruktor sodeloval pri projektu
vakuumske impregnacijske naprave v sklopu In-
stituta J. Stefan. V Prirodoslovnem muzeju v
Ljubljani v njej sedaj impregnirajo okostje
neveljskega mamuta.

Rad je imel svoje delo, temu se je predal z vsem
svojim znanjem in srcem.

Pri sodelavcih je bil res priljubljen in pogosto smo
se ob raznih jubilejih sestajali v ljubljanskih pred-
mestnih gostilnicah in tam kramljali. Z njim se ni
bilo mogoče spreti!

Včasih pogledam fotografije iz časov, ko smo
skupaj počitnikovali na Jadranu na Dugem otoku,
na Unijah, na otoku Silbi.

Že dolgo sva bila dobra prijatelja tudi zasebno. Pri
tem sem spoznal, kako mu je težka mladost
skovala njegovo osebnost, v kateri je bilo toliko
iskrenosti, potrpežljivosti, nerazvjenosti in
razumevanja.

Sicer pa je bil ves predan svoji družini, za katero
je prav izgoreval. Skoraj nismo poznali njegovih
skrbi, bojazni, težav ... Nosil jih je sam v sebi, da
nas ne bi z njimi obremenjeval, čeprav je bil
izredno razumevajoč za težave in skrbi vseh nas
.....

Ko je ob hudi bolezni spoznal, da zanj ni rešitve,
iz njegovih ust nisem slišal tožbe. A slutil sem, da
ga razjeda strah in skrb, kaj bo z njegovo družino,
ko njega več ne bo!

V tišini je odzvenel zvok trobente, ko je žaro z
njegovim pepelom sprejela zemlja v svoj ob-
jem.....

Sonce je bilo že prav nizko nad obzorjem.....

Nam pa so se solze iskriale v očeh.....
zapustil nas je – dober človek.....

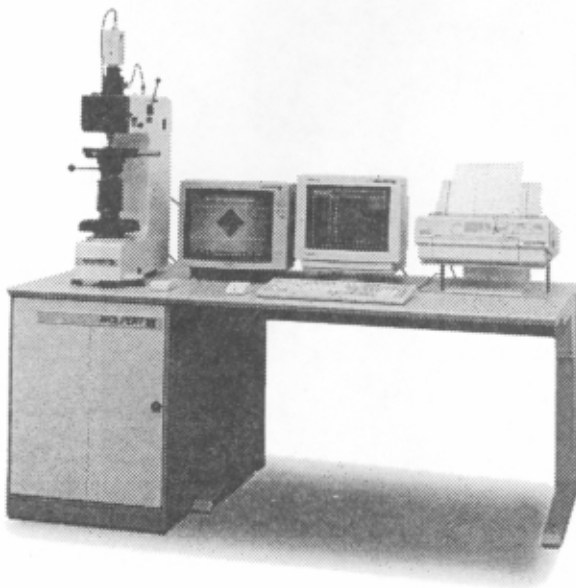
Branko Kos

S&H d.o.o.

Mlinska pot 19
1231 Ljubljana - Črnuče
SLOVENIJA

POSLOVALNICA:

GT center, Brnčičeva 13
1231 Ljubljana - Črnuče
TEL.-FAX: 061 161 21 84

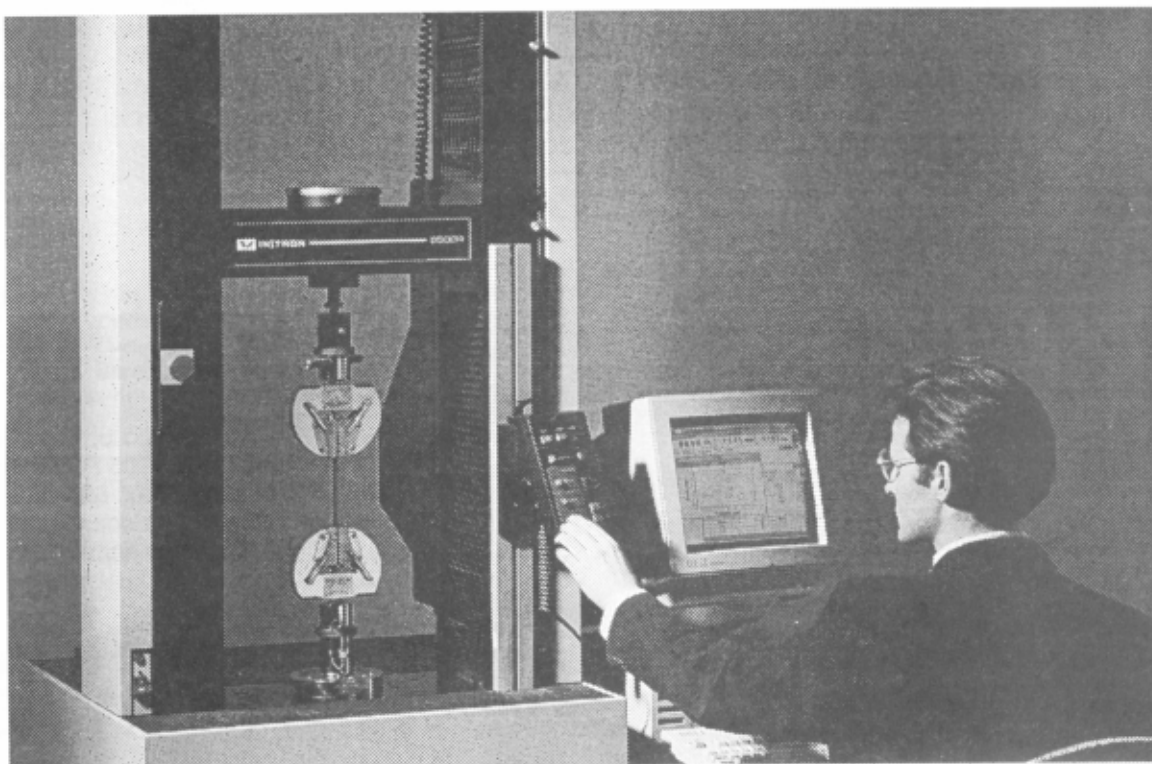


■ ZASTOPSTVO ZA FIRMO INSTRON SHENK TESTING SYSTEMS LIMITED.

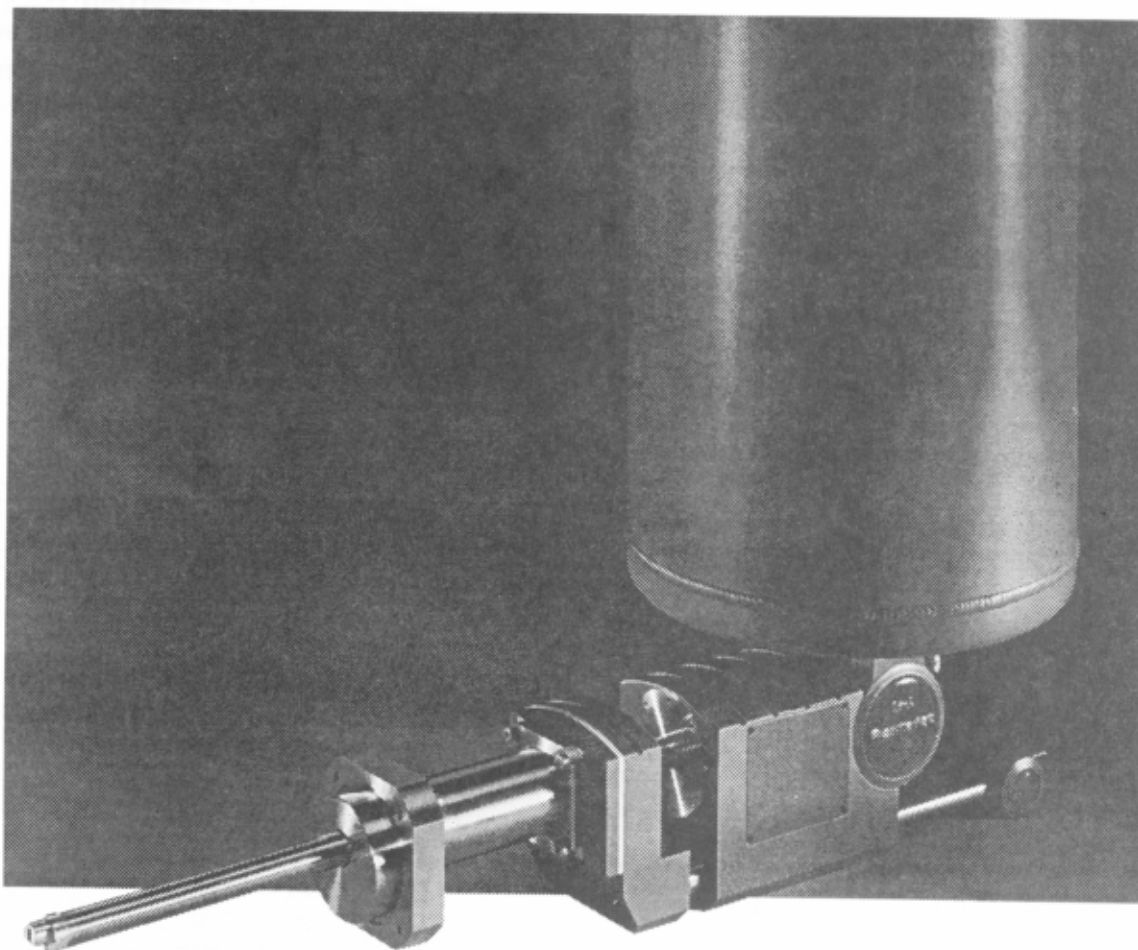
■ ZELO KAKOVOSTEN SERVIS Z DOLGOLETNO TRADICIJO ZA LASTNI PRODAJNI PROGRAM, OPRAVIMO PA TUDI SERVISNO USLUGO NA MERILNI OPREMI DRUGIH PROIZVAJALCEV.

■ ŠIROK IZBOR KVALITETNE MERILNE OPREME ZA TESTIRANJE MEHANSKIH LASTNOSTI MATERIALOV S KOMPLETNIM POTREBNIM Priborom.

■ ŠIROK IZBOR KVALITETNE OPREME ZA MERJENJE TRDOTĚ MATERIALOV IN CERTIFICIRANIH REFERENČNIH BLOKOV FIRME INSTRON WOLPERT.



Link Pentafet Plus



Oxford instruments je v svetu vodilno podjetje na področju tehnologije x-žarkovnih detektorjev ter mikroanalitskih sistemov za elektronsko mikroskopijo. Zaradi nenehnega vlaganja v razvoj in raziskave ter odličnosti proizvodnje **Oxford instruments** pošilja na trg novo generacijo Si(Li) detektorjev, ki v celoti zadoščajo potrebam današnje analize. **LINK PENTAFET PLUS** generacija detektorjev združuje visoko resolucijo in občutljivost ter optimalno geometrijo. Vsi detektorji so proizvedeni v posebej za to prirejenih čistih sobah, kar zagotavlja optimalno delovanje ter dolgotrajno zanesljivost. **Oxford instruments** je tudi nosilec certifikata **ISO 9001**.

OXFORD

scan

Scan, d.o.o.
Breg ob Kokri 7, 4205 PREDDVOR
Tel.: 064-458-020, Fax: 064-458-0240,
elektronska pošta: scan@siol.net
<http://www.scan.si>

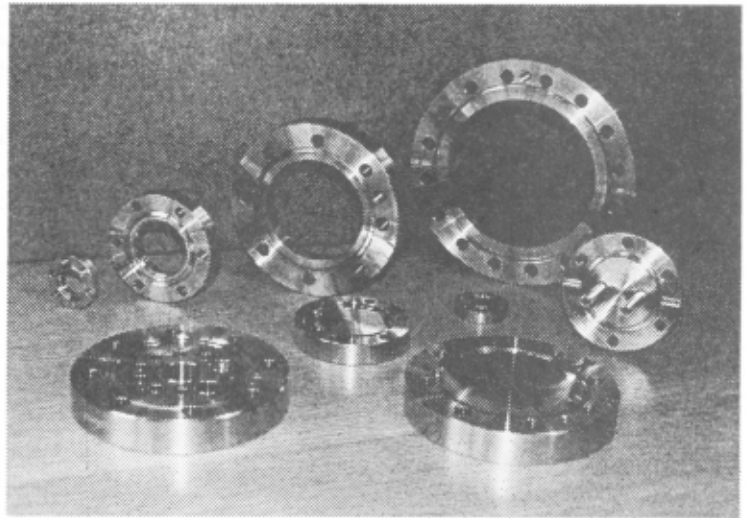
**Vsem bralkam in bralcem revije VAKUUMIST želimo
srečno in uspešno novo leto 1999!**



INŠTITUT ZA ELEKTRONIKO IN VAKUUMSKO TEHNIKO

SPECIALNI VAKUUMSKI ELEMENTI

- PREVODNICE
- OKNA
- PREHODNI KOSI
- MERILNE SONDE
- KOMORE
- VENTILI



PREVODNICE za vgradnjo v stene posod ali kot komplet v prirobnicah (KF, CF, ...), lahko tudi oblikovane po želji: električne, s plastično ali stekleno izolacijo (kompresijski in usklajeni spoji) in s poljubnim številom prevodov

- električne, visokotokovne (hlajene z vodo)
- cevne, za pretoke plinov ali tekočin
- gibalne, za prenos rotacije ali translacije v grobi, visoki in ultra visoki vakuum

OKNA za opazovanje notranjosti recipienta; tesnenje izvedeno z elastomernimi tesnili

PREHODNI KOSI za posebne namene:

- kovinski mehovi, ventili
- cevi s spojem steklo-kovina
- spojke z različnimi tipi prirobnic

MERILNE SONDE z ustreznimi instrumenti:

- Pirani ($1000-10^{-3}$ mbar)
- Penning ($10^{-2}-10^{-6}$ mbar)
- Bayard Alpert ($10^{-3}-10^{-9}$ mbar)

KOMORE za tehnološke postopke in RR namene:

- za vsa področja vakuuma
- hlajene ali ogrevane po zahtevah naročnika

VENTILI standardnih dimenzij za različne namene, preizkušeni na tesnost:

- kotni, ravni, ploščni
- pregrevni do 150°C
- iz ustreznih VV materialov (nerjavno jeklo, viton, Al)
- izdelani po sodobnih tehnologijah (TIG-varjenje, peskanje s steklenimi kroglicami itd.)



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/ljiev>
e-mail: IEVT.group@guest.arnes.si

MEDIVAK

MEDIVAK, d.o.o.	tel. fax	: 00386 61 720450
Šolska ulica 21	GSM	: 041 615 455
SLO - 1230 Domžale	žiro račun	: 50120-601-114647

Poslovalnica:	tel.	: 00386 61 372 659
Dolsko 11	GSM	: 041 615 455
1262 Dol pri Ljubljani	fax	: 00386 61 372 382

LEYBOLD**ZASTOPSTVO
SERVIS
SVETOVANJE**

- 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

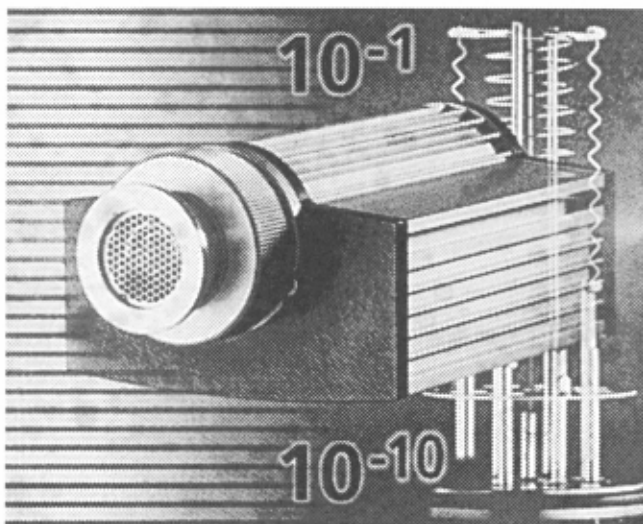
- za kemijsko in drugo industrijo

Vakuumski ventili

- Varnostni, dozirni
- 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***Srečno novo leto!*

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.

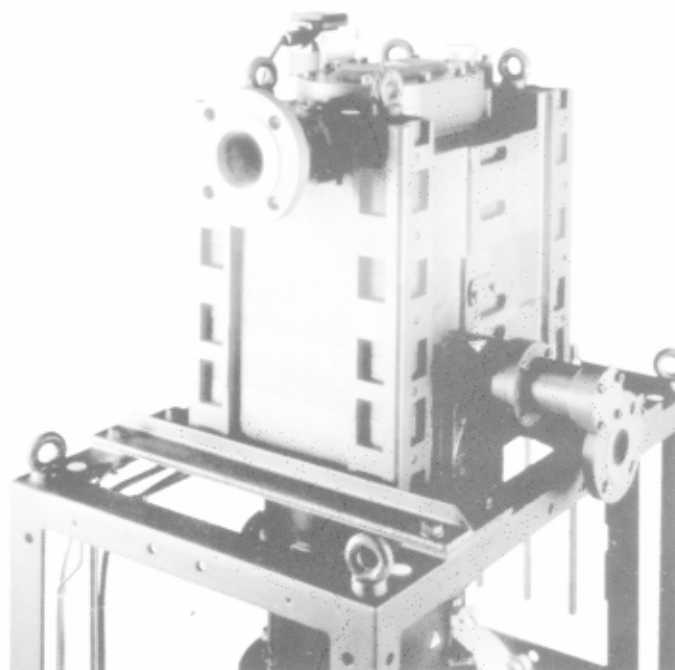
Srečno novo leto!

 **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



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



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



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

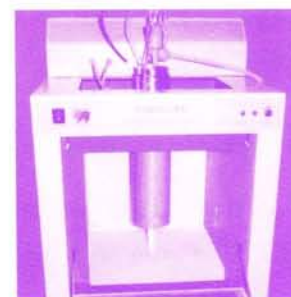
Hiter sežig raznih polimernih materialov



ETHOS CFR

Mikrovalovni reaktor s kontinuirnim pretokom

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



MIKROVALOVNO DOLOČANJE VODE/SUHE SNOVI

micro FAST

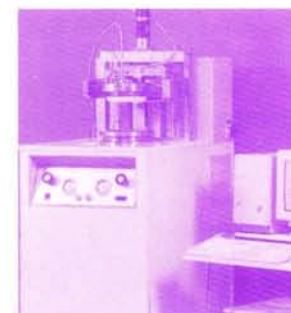
Mikrovalovni vakuumski sistem za določanje vode/suhe snovi

3-6 vzorcev
v 6 minutah



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