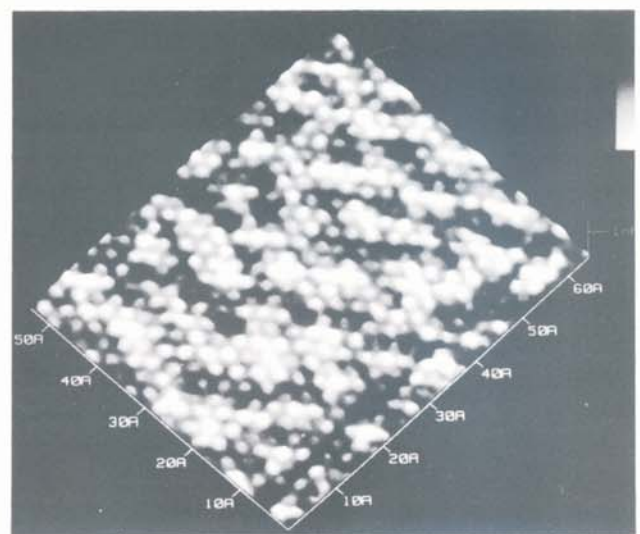
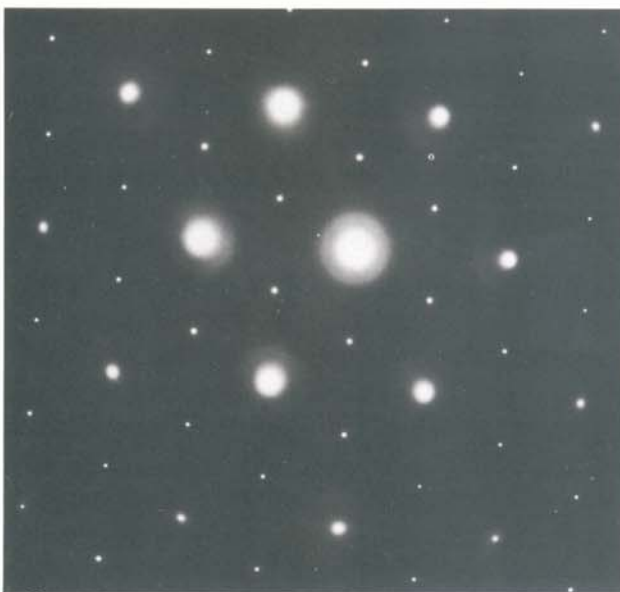
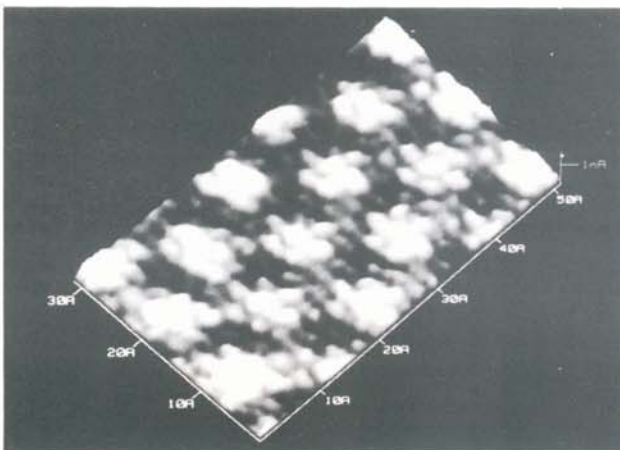


VAKUUMIST

GLASILO DRUŠTVA ZA VAKUUMSKO TEHNIKO SLOVENIJE

LJUBLJANA, junij 93

letnik 13, št. 2, 1993



VSEBINA

- Vakuumska ploskovna izolacija (V. Nemanič)

- Kriostati in vakuumska tehnika (A. Pregelj, M. Mozetič, A. Paulin)

- Vakuumsko sušenje lesa v praksi (Ž. Gorišek)

- Spoji stekla s kovino v vakuumski tehniki (A. Šventner-Kosmos, S. Jerič)

- Izviri atomarnega vodika (M. Mozetič, M. Kveder, A. Pregelj, M. Drobnič)

- Površinska difuzija atomarnega vodika (M. Kveder, M. Mozetič, F. Brecej, M. Drobnič)

- I-V karakteristike Ag/n-Si(111) Schottky-jeve bariere, nanesene po metodi curka ioniziranih skupkov, CIS (B. Cvikl, T. Mrdjen, M. Koželj, M. Kramberger)

- Lastnosti plazme v pilotski RF plazemski napravi (N. Jelić, M. Čerček, T. Gyergyek, M. Mozetič, M. Stanojevič)

- NASVETI

Slike na naslovni strani prikazujejo: tunelsko mikroskopski posnetek valov gostote naboja na površini 1T-TaS₂ (zgoraj levo) in pripadajoči elektronski uklon (zgoraj desno) ter elektronski uklon na 2H-NbS₂ (spodaj levo) in ustrezní tunelski mikroskopski posnetek (spodaj desno). Posnetki so bili narejeni v Laboratoriju za elektronsko mikroskopijo na Institutu "Jožef Stefan" (iz članka v reviji Surface Science, 287 (1993) 409, avtorji: M. Remškar, A. Prodan in V. Marinković).

SPONZORJA VAKUUMISTA:

- Ministrstvo za znanost in tehnologijo Slovenije
- **BALZERS** Balzers Hochvakuum Ges. m.b.H., Dunaj

- VAKUUMIST
- Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije
- Glavni in odgovorni urednik: Peter Panjan
- Uredniški odbor: Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje vakuumske tehnike in sistemov), dr. Bojan Jenko, dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumske metalurgije), dr. Alojzij Križman, mag. Miran Mozetič, mag. Vinko Nemanič, Marijan Olenik, Bojan Paradiž, Andrej Pregelj, dr. Vasilij Prešern, mag. Bojan Povh in dr. Anton Zalar
- Lektorja: dr. Jože Gasperič in mag. Bojan Povh
- Naslov: Uredništvo Vakuumista, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 61000 Ljubljana, tel. (061)267-341
- Številka žiro računa: Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, 50101-678-52240
- Grafična obdelava teksta: Jana Štrušnik
- Grafična priprava in tisk: Biro M, Žibertova 1, Ljubljana
- Naklada 400 izvodov

NASVETI

Dipl.ing. Silvo OSET iz Šentjurja, ki se ukvarja z konstruiranjem in izdelavo vakuumskih naprav, nas je vprašal za nasvet v zvezi z izbiro črpalk za vakuumsko sušenje lesa. Naprosili smo doc. dr. Željka Goriška iz Biotehnične fakultete, Odd. za lesarstvo iz Ljubljane, da je pripravil kratek sestavek o sušenju lesa v vakuumu, ki ga objavljamo v tej številki Vakuumista. Za vakuumiste bo gotovo zanimivo branje, saj do sedaj o tem nismo pisali. Ker se pri vakuumskem sušenju lesa uporabljajo črpalke s tekočinskim obročem, smo se pozanimali tudi pri proizvajalcu letih, v Litostroju, Tovarna črpalk, Ljubljana. G. Janez

Simčič nam je poslal dopis in prospekt za enostopenjske in dvostopenjske črpalke s tekočinskim (vodnim) obročem različnih kapacitet, ki dosegajo končni totalni tlak 213 mbar (enostop.) oz. 40 mbar (dvostop.) V dopisu nas obvešča, da imajo v načrtu preizkus črpalke z oljnim obročem z avtonomnim sistemom separatorja oljnih par in hladilniki olja. Nekaj podobnega bi torej potrebovali za izdelavo vakuumske črpalne naprave za sušenje lesa, kjer bi bile uporabljene "domače" črpalke.

Jože Gasperič

Kako izmeriti parametre plazme?

Mnogi razvojni inženirji uporabljajo pri svojem delu različne plazemske tehnologije. Običajno plazemskih reaktorjev ne izdelajo sami, ampak jih kupijo pri različnih proizvajalcih vakuumske opreme. Takšni reaktorji so marsikje odlična oprema za točno določeno aplikacijo. Pogosto pa želimo tehnologijo plazemske obdelave nekoliko spremeniti. V teh primerih je ugodno, da vsaj približno vemo, kakšna je naša plazma. Z drugimi besedami, izmeriti moramo čimveč parametrov plazme. Stanje plazme popolnoma opišemo z več deset količinami, vendar nam včasih zadoščajo že njeni osnovni parametri, to so gostota nabitih delcev ali kratko gostota plazme (n), temperatura elektronov (T_e), Debyejeva dolžina (λ_D) in potencialna razlika med plazmo na mestu sonde in referenčno elektrodo ali kratko potencial plazme (V_s). Za merjenje parametrov obstajajo različni masno - energijski analizatorji, ki imajo dve skupni lastnosti, namreč, visoko ceno (od ~ 100 000 DEM naprej) in težavno tolmačenje rezultatov (senzor v večini primerov tako močno zmoti plazmo, da je naprava uporabna samo za analizo toka delcev na izbrano površino komore). Vendar pa obstajajo preproste in cenene sonde, s katerimi lahko v večini primerov vsaj približno določimo osnovne parametre. To so Langmuirjeve sonde.

Najpreprostejša Langmuirjeva sonda je drobna kovinska elektroda, ki jo potopimo v plazmo in priključimo na izvir enosmerne napetosti. Druga elektroda je kovinski del razelektivne komore, ki jo plazma obliha. Če je plazma homogena, izotropna, dovolj gosta in dovolj močno ionizirana in če so dimenzije sonde pravilno izbrane, lahko iz karakteristike sonde (odvisnost toka od napetosti) izračunamo vse štiri osnovne parametre (n , T_e , V_s in λ_D). Plazma ni nikdar popolnoma homogena, izotropna itd., zato v večini praktičnih primerov potrebujemo nekaj več znanja za pravilno tolmačenje karakteristike ali pa izberemo drugačno sondo (za pametno izbiro spet potrebujemo nekaj izkušenj).

Preproste Langmuirjeve sonde delimo na enojne, dvojne, emisijske in katalitične. V nadaljnjem besedilu na kratko predstavljamo vse štiri tipe sond.

- Enojna sonda je opisana zgoraj. Z njo lahko dokaj natančno izmerimo n , T_e , V_s in λ_D . Daje tudi podatek o energijski porazdelitvi elektronov v plazmi. Postane neuporabna v nestabilnih plazmah. Je zelo občutljiva za RF motnje.
- Dvojna sonda je sestavljena iz dveh enako velikih drobnih elektrod, katerih dimenzija naj bo vsaj $10 \lambda_D$, razdalja med elektrodama pa vsaj $100 \lambda_D$. Z njo izmerimo n , T_e in λ_D . Nepogrešljiva je v steklenih sistemih, kjer ni na voljo referenčne elektrode ali pa je le ta majhna. Je razmeroma neobčutljiva za RF motnje. Uporabna je tudi v dokaj nestabilnih plazmah. Parametre plazme pravilno določimo samo v primeru, ko je energijska porazdelitev elektronov vsaj približno maxwellska.
- Emisijska sonda je pravzaprav majhna katoda, iz katere izparevajo elektroni (običajno žička iz toriranega volframa). Z njo v vsakem primeru dokaj natančno izmerimo V_s .
- Katalitična sonda je drobna kovinska elektroda, ki je priključena na zelo tanki žici termočlena. Deluje kot enojna sonda, le da so rezultati meritev nekoliko manj natančni. Poleg n , T_e , V_s in λ_D meri tudi stopnjo disociiranosti molekul v nekaterih vrstah plazme.

Vse štiri tipe sond so uporabili v različnih oblikah za karakterizacijo najrazličnejših plazem. Literatura s področja Langmuirjevih sond je izredno obsežna. Večina člankov, ki so bili objavljeni v strokovnih revijah do začetka petdesetih let, napačno tolmači rezultate meritev karakteristik. Klasičen učbenik s tega področja je knjiga *J. D. Swift and M. J. R. Schwar, Electrical Probes for Plasma Diagnostics, Iliffe Books Ltd., London (1969)*. **Podrobnejša navodila za izdelavo in uporabo različnih vrst sond bomo pripravili za objavo v prihodnjih številkih Vakuumista.**

**Miran Mozetič in Miha Kveder,
Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko,
Teslova 30, 61111 Ljubljana**

BALZERS

YOUR PARTNER FOR ADVANCED VACUUM TECHNOLOGY

TURBOMOLECULAR PUMPS

- Single and Double-flow standard pumps
- Wide range pumps
- Pumps with magnetic bearings
- Pumps for corrosive gas applications
- Electronic drive units



For further details, information and documentation please contact our sales engineer Ing. Karl Blümel.

LEAK DETECTOR



- SNP coarse vacuum leak detector system
- HLT 100 helium leak detector
- HLT 160 helium leak detector
- Frigo Sniff RXS 200 (for R134 a)

Balzers Hochvakuum Ges. m.b.H.
 Diefenbachgasse 35
 A-1150 Wien
 Tel. (0222) 894 17 04, 894 17 05
 Telefax (0222) 894 17 07



INŠTITUT ZA KOVINSKE MATERIALE
IN TEHNOLOGIJE p.o.

INSTITUTE OF METALS
AND TECHNOLOGIES p.o.

61000 LJUBLJANA, LEPI POT 11, POB 431,
SLOVENIJA

Telefon: 061 151 161
Telefax: 061 213 780

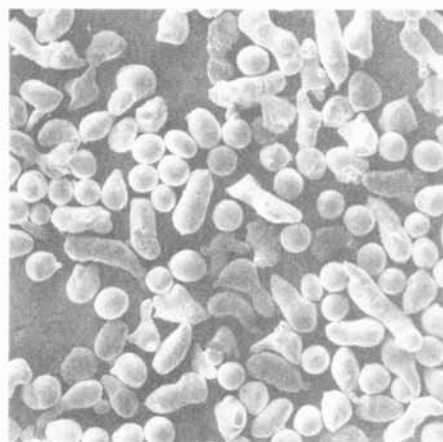
RAZISKAVE, RAZVOJ, STORITVE:



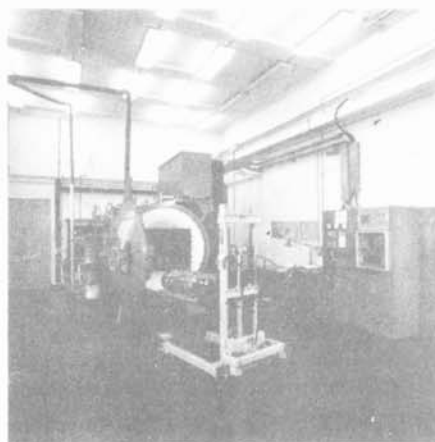
Posnetek inter- in transkristalnega preloma jekla s perlitno strukturo, P 10000x



Oprema za korozijske teste



Vodno atomiziran prah Milit, P 600x



Vakumska peč

Sinteza sodobnih kovinskih materialov

- s konvencionalnimi postopki
- s postopki metalurgije prahov

Karakterizacija materiala po kemijskih, korozijskih, mehanskih in mikroskopskih metodah

Razvoj tehnologij proizvodnje jekla, aluminijevih in posebnih zlitin

Matematično modeliranje in računalniška simulacija procesov in tehnologij

Sodobna vakuumaska termična obdelava

Varstvo okolja

Nadzor in atestiranje

Ekspertne storitve in svetovanja

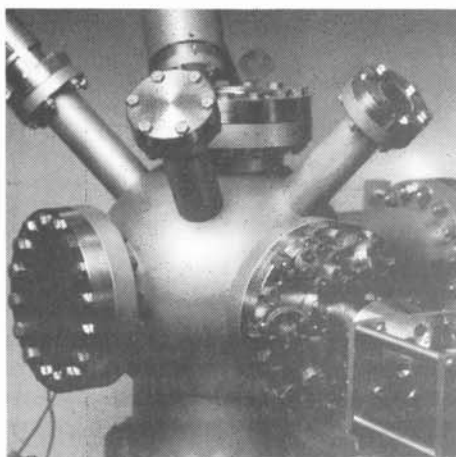
Pilotna proizvodnja kovinskih materialov

Vzgoja novih raziskovalcev

Organizacija znanstvenih in strokovnih posvetovanj

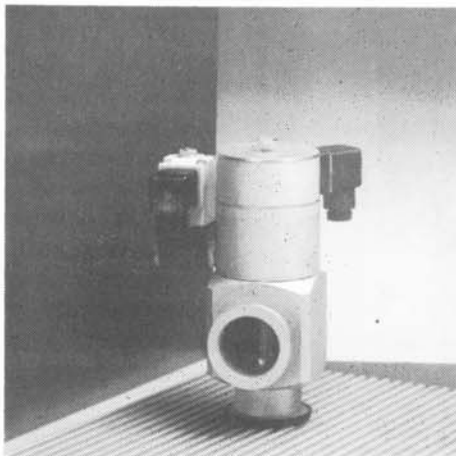
IEVT

RAZISKAVE, RAZVOJ, STORITVE:



- vakuumska, visokovakuumska in ultravakuumska tehnika
- vakuumske tehnologije
- tehnologije tankih plasti
- površinska analitika

IZDELKI:



- vakuumske komponente in sistemi
- elementi za elektroniko
- optoelektronske komponente
- elektronska oprema
- naprave za medicino

ŽELIMO VAM USTREČI - POKLIČITE NAS!

INŠTITUT
ZA ELEKTRONIKO
IN VAKUUMSKO
TEHNIKO

61111 LJUBLJANA, TESLOVA 30, POB 59,
SLOVENIJA

Telefon: 061 267-341, 267-377, 263-461
Telefax: 061 263-098, Telex: 31629 YU IEVT



Kambič

Laboratorijska oprema

Vakuumski sušilniki



Proizvodni program: inkubatorji, sterilizatorji, sušilniki, avtoklavi, liofilizatorji, keramični mlinci, naprave za vakuumsko destilacijo odpadnih emulzij, vakuumski sušilniki, zamrzovalne skrinje za ultra nizke temperature, vodne kopeli, ejektorske vakuumske črpalke, olja za pogon difuzijskih in rotacijskih vakuumskih črpalk.

VAKUUMSKA TEHNIKA

Izdelava in servisiranje laboratorijske opreme

KAMBIČ ANTON

Sela 4/A

68333 SEMIČ, SLOVENIJA

Tel., fax: 068/56-200



PRODAJNI PROGRAM

Vakuumske črpalke:

- ✱ rotacijske vakuumske črpalke in pribor - eno in dvostopenjske, od 1 do 1200 m³/h
- ✱ Roots vakuumske črpalke od 150 do 13.000 m³/h
- ✱ črpalke z zapiralno loputo, eno in dvostopenjske, do 250 m³/h
- ✱ dvostopenjske membranske in ejektorske vakuumske črpalke
- ✱ difuzijske črpalke od 40 do 50.000 l/s
- ✱ turbomolekularne črpalke od 50 do 3.500 l/s in pribor
- ✱ sorpcijske črpalke, kriočrpalke, ionsko-getske in sublimacijske titanske črpalke

vakuumski črpalni sistemi:

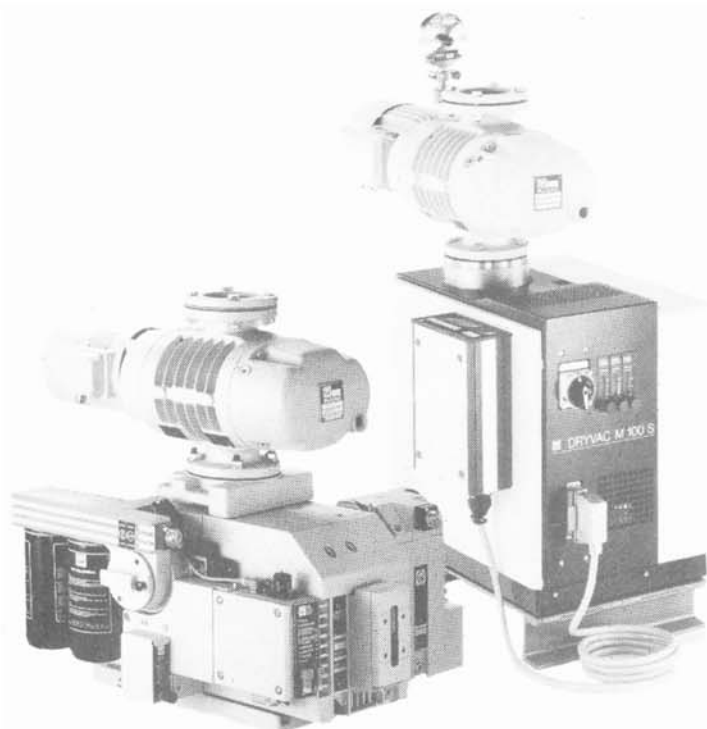
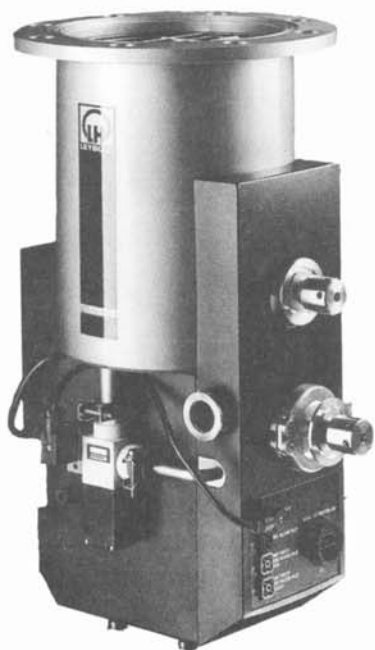
- za kemično in drugo industrijo

vakuumski ventili:

- pretočni ali kotni KF, ISO-K, ISO-F od 2 do 1.000 mm,
- loputni in UVV ventili

vakuumske prirobnice:

- serije KF, ISO-K, ISO-F in UHF, objemke in steklena okna



mehanske in električne prevodnice

merilniki vakuuma in kontrolni instrumenti:

- od 1.10⁻¹² do 2.000 mbar, absolutni ali merilniki delnih tlakov

procesni regulatorji

detektorji netesnosti (prepuščanja) in sistemi

- helijski, frigenjski detektorji

masni spektrometri in pribor

- od 1 do 200 ame

IZDELAVA STROJEV IN TEHNOLOGIJE ZA:

- ✱ **skupina UB** - trdi sloji, kondenzatorske in pakirne folije, naparevanje velikih površin, npr. steklo, naparevanje video in audio trakov, CD in video plošče, plošče za shranjevanje podatkov
- ✱ **skupina UC** - fina optika, očala (komponente - merjenje tankih plasti, elektronski topovi), LCD prikazalniki, okrasne tanke plasti, plasti za mikroelektroniko, naprave za izdelavo kristalov
- ✱ **skupina UM** - vakuumske indukcijske peči (tudi za vlivanje), vakuumska metalurgija

ZASTOPSTVO IN SERVIS

MEDIVAK

MEDIVAK d.o.o., Šolska ulica 21, 61230 Domžale
Tel.: (061) 713-060, Fax: (061) 713 060

PRODAJA

TEAM TRADE

Poštni naslov: TEAM TRADE,
61241 Kamnik, p.p. 43, Slovenija

Pisarna: 61000 LJUBLJANA
Cesta v Rožno dolino 42
Telefon (061) 274-123
Telefax (061) 274-125
Račun SDK 50140-601-85343

NDT - KONTROLA BREZ PORUŠITVE MATERIALA**OPTIČNA KONTROLA****- OLYMPUS, JAPONSKA**

- ❖ ogledala in povečala, endoskopi in fibroskopi, foto in TV dokumentacija ter TV kontrola cevi
- ❖ posebni prenosni aparati za optično kontrolo površine vseh vrst materialov s povečavo do 1000-krat
- ❖ metalurški in ostali mikroskopi

Kontrola s penetrantskimi tekočinami**- HELLING, ZRN**

- ❖ MET-L-CHEK rdeče-beli in fluorescentni penetranti
- ❖ STANDARD CHEK penetranti, SUPER CHEK penetranti za visoke temperature, BY LUX penetranti
- ❖ kontrolni etaloni in aparati, ročni, pol-avtomatski in avtomatizirani sistemi
- ❖ UV luči za fluorescentno metodo

Magnetna kontrola - HELLING, ZRN

- ❖ oprema za magnetiziranje, permanentni magneti, ročni elektromagneti, prenosne enote - do 4000 A
- ❖ standardna stacionarna oprema in izdelava opreme po naročilu ter popolnoma avtomatizirana oprema
- ❖ aparati za demagnetiziranje, kontrolni aparati in etaloni
- ❖ sredstva za kontrolo: prahovi in suspenzije raznih barv in velikosti, UV luči za fluorescentno metodo

Kontrola z vrtničastimi tokovi - ROHMANN, ZRN**in ultrazvočna kontrola - PANAMETRICS, ZDA/ZRN**

- ❖ prenosni aparati za kontrolo materialov, merilniki debelin materialov



- ❖ visokofrekvenčni prenosni in stacionarni aparati, popolnoma avtomatizirani linijski sistemi
- ❖ vse vrste sond in pribora

Radiografska kontrola - ANDREX, DANSKA, - HELLING, ZRN, - GRAETZ, ZRN

- ❖ prenosni RTG aparati do 300 kV, stacionarni RTG aparati do 450 kV
- ❖ aparati za gama-radiografijo IR 192, CO 60 in pribor, izotopska polnjenja IR 192, CO 60 in ostalo
- ❖ radiografski pribor, aparati za pregled RTG filmov - iluminatorji
- ❖ radiološka zaščita - dozimetri
- ❖ konstrukcija in izdelava foto-RTG laboratorijev v vozilih, zabojnikih in drugih prostorih

Industrijski RTG filmi in kemikalije**- RAZLIČNI PROIZVAJALCI****Kontrola netesnosti / prepuščanja****- LEYBOLD, ZRN, - HELLING, ZRN**

- ❖ helijevi, freonski in ultrazvočni detektorji
- ❖ s fluorescentnimi tekočinami

Analize materialov**- SPECTRO, ZRN, - LEYBOLD, ZRN**

- ❖ spektralne analize raznih vrst materialov:
 - optično emisijski spektrometri
 - rentgensko fluorescenčni spektrometri
- ❖ masni spektrometri za analizo raznih vrst plinov
- ❖ aparati za analizo tekočin in plinov
- ❖ pribor

Druge vrste NDT kontrole - HELLING, ZRN, - MES, HOČE, - TEMPIL DIVISION, ZDA

- trdote, hrapavosti, izolacije, vlažnosti, kontrola kvalitete in namazanosti ležajev
- debelin in kvalitete premazov ter zaščit na kovinah
- temperature - TEMPILSTIK in digitalni merilniki - DRUGI MERILNIKI

TEAM TRADE d.o.o.

Poštni naslov: TEAM TRADE, 61241 Kamnik, p.p. 43, Slovenija

 Pisarna: 61000 LJUBLJANA
 Cesta v Rožno dolino 42
 Telefon (061) 274-123
 Telefax (061) 274-125
 Račun SDK 50140-601-85343

PERKIN ELMER

PERKIN ELMER je vodilni svetovni proizvajalec opreme za vse aplikacije kemijske analitike. Njihove vrhunske aparature poznajo in uporabljajo v laboratorijih skoraj vseh slovenskih tovarn s področja kemije, farmacije in prehranske industrije, ter v vseh pomembnejših zavodih in raziskovalnih institucijah.

KemoAnalitika, d.o.o. je ekskluzivni zastopnik in distributor firme PERKIN ELMER v Sloveniji. Mnogi strokovnjaki nas že dobro poznate, saj imamo v Sloveniji veliko zvestih in zadovoljnih uporabnikov naše opreme in servisnih storitev. Vse tiste, s katerimi pa se doslej še nismo imeli priložnosti seznaniti, pa vabimo, da nas pokličete in radi se bomo dogovorili za razgovor in predstavitev najsodobnejše opreme.

Dovolite, da vas opozorimo na nekaj pomembnih novosti v našem poslovanju:

- sistemska in tehnična podpora z našimi lastnimi slovenskimi strokovnjaki
- zaradi novih pogojev poslovanja smo uspeli znižati cene skoraj vsem aparatom, rezervnim delom in potrošnemu materialu
- vsa podpora pri uvoznih in drugih formalnostih, prodaja za tolarje



KemoAnalitika

družba z omejeno odgovornostjo

R.D. V/24, 61000 Ljubljana

telefon 061/261 957

telefaks 061/261 537

VAKUUMSKA PLOSKOVNA IZOLACIJA

Pregled omejitev teoretične in tehnološke narave

Vinko Nemanič, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61000 Ljubljana

FLAT VACUUM INSULATION PANEL - technical and technological prospects and limitations

Abstract

In this article, theoretical aspects and technological possibilities for realisation of vacuum panel insulation (VPI) are given. Three main contributions to heat transfer are compared: radiation, conductivity and convection of residual atmosphere. From this analysis it can be seen that VPI as novel insulating element would find application in devices, where their energy efficiency is mainly determined by heat flow through the walls. From practical and technological point of view, VPI is high-tech product, which can be realized with common procedure steps, used in high vacuum practice. Further comparison regarding economic benefits against blown foams, nowadays widely used in insulating industry, can be made when environmental costs of both alternatives are also compared.

Povzetek

V članku so predstavljene ocene o teoretičnih vidikih in tehnoloških možnostih realizacije vakuumske ploskovne izolacije (VPI). Analiza prispevkov sevanja, kondukcije in konvekcije kaže, da bi bil panel z visoko izolativnostjo izredno zanimiv element v napravah, kjer pomeni neželen prehod toplote skozi stene glavno izgubo energije. S tehnološkega vidika je VPI zahteven izdelek, a s postopki izdelave in priprave materialov, kakršne poznamo v zahtevnejših vejah vakuumske tehnike, izvedljiv. Ocena cenovne konkurenčnosti bo možna po določenem času, ki bo tem krajši, čim prej bo upoštevana ekološka cena današnjih okolju neprijaznih izolacijskih pen, ki vsebujejo fluorove in klorove ogljikovodike.

1 Uvod

Vakuumska ploskovna izolacija je sestavljena iz dveh tankih, po robu varjenih kovinskih sten, mestoma podprtih z distančniki, ki preprečujejo porušitev strukture zaradi atmosferskega tlaka. Ploskovno jo imenujemo zato, ker je v dveh smereh razsežna, v tretji pa razmeroma tanka, določena z višino podporja. Načelno razlog, zakaj se doslej še ni uveljavila in celo še ni precizno teoretično obdelana, je iskati v uporabi cenejših pen. Te so že povzročile nemajhno ekološko škodo. Pomislek, ali je struktura tehnološko izvedljiva za sprejemljivo ceno, je lahko osnovan le na dovolj velikem številu poskusov in analizi prispevkov k ceni. Vakuumska znanost in tehnika sta v zadnjih desetletjih napredovali do stopnje, da lahko izdelujemo visoko-vakuumske elemente (npr. barvne TV elektronke) po zmerni ceni, če gre seveda za velikoserijske izdelke.

2 Princip delovanja

Dewarjeve posode so že skoraj stoletje standarden del laboratorijske opreme, uporabljene kot kriostati, termostati ipd. Trdnost in masa uporabljenega stekla omejujeta velikost posod na nekaj litrov koristnega volumna.

V kriotehniko se uporabljajo večje, kovinske posode, kjer je za nasutje uporabljen perlit, ali pa sta steni prosti, sevalni del pa je zmanjšan z večslojnim reflek-

torjem, t.i. superizolacijo, ob dodatnem učinku črpanja hladne stene na kriotemperaturah. Tako steklene kot kovinske posode so cilindrične ali okrogle oblike, da vzdržijo tlačne obremenitve. Podpore in povezave med zunanjo in notranjo steno so vgrajene v strukturi le pri velikih posodah.

Ploskovna vakuumska izolacija je po zasnovi možna na večjih razsežnostih, saj je število podpor na enoto površine izbrano ne glede na velikost strukture. Omejitve nastopijo pri tehnologiji črpanja, kar bo razvidno iz kasnejše analize. Same podpore so neizbežni toplotni most, zato se okolica podpore dodatno spremeni v pogledu sevanja. Izvedba in analiza vplivov podporja sta obdelani razmeroma slabo.

3 Prispevki sevanja, konvekcije in prevajanja - ocene!

Toplotni tok med dvema telesoma na različnih temperaturah je za predpostavljene hipotetični vakuum poznan. Izveden je iz Stefanovega zakona za črno telo, korigiran za sivo telo s specifično emisivnostjo, za telo s spektralno odvisno emisivnostjo pa z ustreznim integralom po intervalu, ki ga obravnavamo.

V področju sobnih temperatur $T = 300$ K, kjer želimo preučevati lastnosti vakuumske ploskovne izolacije (VPI), je vrh sevanja črnega telesa pri $10 \mu\text{m}$, kar izračunamo iz Wienovega zakona. Emisivnost materialov v tem področju dolgovalovnega IR sevanja je človeku razmeroma malo poznana, zaznavamo ga s čutili za toploto. Sklepanje na IR emisivnost iz vedenja v vidnem delu je pogosto napačna; steklo ima v vidnem delu prepustnost blizu 1, odbojnost $\epsilon \sim 0,04$ za pravokotni vpad valovanja, absorpcijo smemo zanemariti. Pri $10 \mu\text{m}$ je steklo skoraj črno telo: $\epsilon = 0,85$, tako da večji del valovanja absorbira.

Zanimivo je še vedenje raznih kovin, ki so v vidnem delu spektra lahko močno reflektivne, v IR bistveno manj, za nekatere velja obratno. Za razlago teh pojavov bi bilo potrebno osvetliti mehanizme interakcije EM valovanja z elektroni z najšibkejšimi vezmi v trdi snovi, kar presega okvir tega pregleda. Že pri enovalentnih kovinah naletijo teoretiki na skromno ujemanje teoretičnih napovedi z izmerjenimi vrednostmi. Večvalentne kovine in zlitine kažejo toliko anomalij, da so najpomembnejši podatki eksperimentalni. Ti pa se dostikrat med seboj razlikujejo zaradi podvrženosti površine staranju (oksidacija, redukcija, sprememba valence, ipd.), pomemben faktor je hrapavost površine. Podatki so v literaturi zato za isti material lahko zelo različni /1, 6/.

Za oceno jakosti mehanizma sevanja med dvema stenama z enako emisivnostjo ϵ v bližini sobne temperature uporabimo Stefanovo formulo:

$$j = \sigma \frac{\epsilon}{(2-\epsilon)} (T_2^4 - T_1^4), \quad (1)$$

iz katere dobimo za deleže sevanja naslednje vrednosti:

Tabela 1: Jakost toplotnega sevanega toka med stenama z enako emisivnostjo ϵ

ϵ	$k[W/m^2K]$	material
1	6.12	črno telo
0.85	4.5	steklo
0.22	0.71	nerj. jeklo
0.1	0.3	el. por. nerj. jeklo
0.06	0.18	baker
0.01	0.03	srebro

Najmanjše vrednosti ima srebro na gladki površini stekla, kar srečamo pri klasični stekleni Dewarjevi posodi. Priprava srebrne tanke plasti na steklu je cenena in poznana že stoletja, je stabilna in primerna za vakuumsko procesiranje. Odbojna ostane pri visokem vakuumu praktično neomejeno dolgo časa.

4 Konvekcija

Prevajanje po plinu med stenama z različno temperaturo je v viskoznem področju pretoka skoraj neodvisno od tlaka. Šele pri tlaku, ko se spremeni režim pretoka od viskoznega k molekularnemu, je padec prevodnosti skokovit, nakar z nadaljnjim redčenjem v molekularnem režimu linearno pada s tlakom. Za praktične namene je prispevek prevajanja plina k deležu sevanja pod tlakom 10^{-5} mbar zanemarljiv, kar dobimo tudi iz formule za prevodnost pri nizkih tlakih, /2/:

$$\lambda_{mol} = \frac{\bar{c}}{2} \frac{C_{mol}}{RT} \frac{\alpha_E d}{(2 - \alpha_E)} \times p \quad (2)$$

\bar{c} je srednja hitrost, C_{mol} je specifična toplota, R je splošna plinska konstanta, T je temperatura, α_E je akomodacijski koeficient, d pa je razdalja med stenama; za konkretni izračun je ta 0.5 cm. Če vstavimo ustrezne vrednosti pri temperaturi 300 K, dobimo proporcionalnostni faktor, s katerim je moč izraziti linearno odvisnost prevodnosti od tlaka p za molekularni režim pretoka. Dobljene vrednosti so seveda dokaj odvisne od lastnosti površine, kar se skriva v α_E , a za oceno vstavimo vrednosti iz tabel, /2/.

Prispevek konvekcije k prevajanju celotne strukture je pri tlaku 10^{-5} mbar enak 2.10^{-5} W/m²K in je tako v primerjavi s sevanjem zanemarljiv.

5 Prevajanje-kondukcija

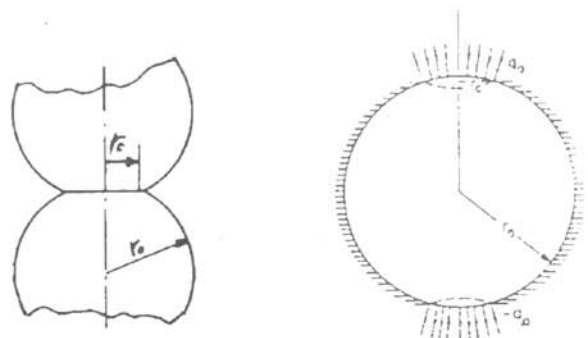
Prevajanje preko trdne snovi je v predlagani strukturi pomemben, a slabo raziskan prispevek. Po analogiji toplotnega toka z električnim, rešujemo enake enačbe. Pri obravnavanju električnega prevajanja naletimo celo na dodatne težave zaradi iskrenja, hladne emisije in gretja spojnih mest. Osnovni cilj optimiziranja električnih kontaktov je največkrat zmanjševanje upornosti.

Raziskave toplotne prevodnosti podpora pa so v našem primeru namenjene doseganju čim manjših vrednosti. Zastavlja se vprašanje, katere strukture z zadostno mehansko trdnostjo imajo najmanjšo prevodnost? Za izračun je prikladen model točkasto dotikajočih se kroglic ali valjčkov.

Po analogiji z električnim je toplotni tok dveh dotikajočih se krogel z radijem r_0 enak produktu premera stične ploskve $2r_c$ in specifične toplotne prevodnosti materiala λ_m .

$$k_i = 2r_c \lambda_m \quad (3)$$

Prispevek same krogle je na isti skali zanemarljiv. Od tod izraz za upornost zožitve (angl. constriction resistance). Rezultat dobimo s preprostim izračunom prevodnosti z integracijo po presekih krogle. Singularnost v točkastem kontaktu odpravimo z integracijo do nekega minimalnega radija, ki ga lahko izračunamo iz podatkov o materialu in sili na kontakt. Vrednost integrala pri r_0 zaradi neprimerljivo majhne vrednosti zanemarimo. Tokovnice na sliki 1 so prikazane za primer izolirane krogle. Približek je za kroglo iz materiala z nizko emisivnostjo, ki se nahaja vakuumu, dokaj točen.



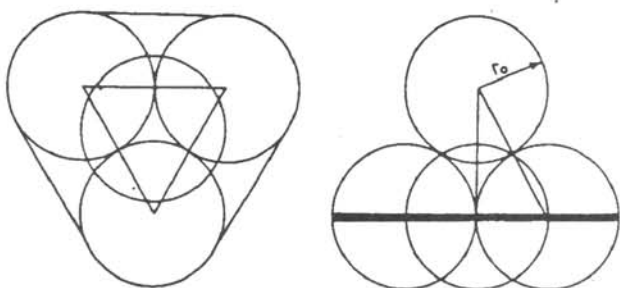
Slika 1. Prevajanje skozi točkasti kontakt dotikajočih se elastičnih krogel

Velikost stične ploskve, oziroma r_c , je moč izračunati za model elastičnih krogel po enačbi, do katere je po teoretični analizi prišel že Hertz, /3/:

$$r_c = \sqrt[3]{\frac{3(1 - \mu^2) Fr_0}{4E}} \quad (4)$$

E je elastični, μ Poissonov modul, F je sila in r_0 radij krogle.

Pri dotiku dveh krogel ni mogoče rešiti stabilnosti stičnega mesta. Od enostavnejših možnosti minimalnega števila kroglic s stabilno konfiguracijo naredimo oceno za tri objete kroglice in na njih ležečo četrto (mikroizsek gosto zloženih plasti ploskovno centrirane kocke), slika 2. Za primer kroglic z r_0 dobimo višino podpore $2r_0 + \frac{2r_0\sqrt{6}}{3}$. Razmik sten na najbolj oddaljenem mestu med podporami ocenimo na $2r_0$, kar še ne pokvari prečne prevodnosti strukture pri črpanju oz. razplinjevanju. Z razporeditvijo podpor v heksagonalno mrežo je pri razdalja α enaka do vseh šestih sosedov, obremenitev podpor pa dobimo iz števila podpor na enoto ploskve, saj je tlak poznan. Izračun velikosti stične ploskve je po formuli (4) zdaj možen. Upoštevati je treba, da se normalna sila razporedi na tri stična mesta, podpor pa je toliko kot osnovnih heksagonalnih celic s stranico α .



Slika 2. Najmanjši stabilni izsek gosto zloženih krogel predstavljajo tri objete kroglice, na katerih sedi četrta

V tabeli 2 je pregled vrednosti k za različne premere kroglic r_0 in različne razdalje α med podporami. Izračun je narejen za steklene kroglice, ki imajo pri veliki vrednosti elastičnega modula $E = 8 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ majhno specifično prevodnost $\lambda_m \sim 0,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Zanimarjen je prispevek sevanja med kroglicami, kot tudi termični in mehanski vpliv podpore na steno.

Tabela 2: Velikost toplotnega toka v odvisnosti od velikosti celice α in r_0

α [mm]	r_0 [mm]	k [W/m ² K]
50	5	0.142
50	2.5	0.13
50	1	0.96
30	2.5	0.195
30	1	0.14

Izbira stekla za izdelavo kroglic ni naključna, saj je treba med materiali, ki jih smemo vgraditi v visoki vakuum, izbrati tistega, ki ima najmanjšo vrednost produkta iz enačbe (3). Če primerjamo vrednosti k za enako velike kroglice iz različnih materialov, vidimo,

da je smiselno izbrati tistega z najmanjšo prevodnostjo λ_m , ki nastopa v produktu kot faktor, elastični in Poissonov modul pa nastopata v enačbi (4) oz (3) pod tretjim korenem. Primerjajmo med seboj relativne vrednosti k za navadno steklo, visokoglinično keramiko in legirano jeklo; vrednost $k_{\text{steklo}} = 1$, tabela 3.

Tabela 3: Relativne vrednosti toplotne prevodnosti kontakta iz parov krogel iz treh materialov pri enakih pogojih

material	λ_m [W/mK]	E [10 ¹⁰ N/m ²]	k_{rel}
steklo	0.8	8	1
keramika	2	0	1.6
jeklo	45	20	41

Izdelava podporja s še manjšo prevodnostjo od dveh monoplasti, ki smo jih vzeli za zgled, je iz dosedanje analize možna z zlaganjem "monoplasti" opisanega modela krogel, vendar ne kot nasutje v ves črpalni volumen. Ta princip se izkaže problematičen pri črpanju posode večjih xy razsežnosti. Analiza nasutij je obdelana za nizkotemperaturno področje v /3,4/.

Zanimajo nas torej diskretni distančniki s kompleksnejšo strukturo. Pri prevajanju skozi točkaste kontakte pri izbrani kompromisni razdalji α , določeni eksperimentalno za dano folijo izbrane debeline, je sila na distančnik določena, oceniti pa želimo velikost prevajanja skozi stabilne "monoplasti". V enačbi (4) je velikost stične ploskve sorazmerna s tretjim korenem iz sile. Razdelitev na n kontaktnih točk ima tako za posledico večje prevajanje zaradi nelinearno povečane skupne stične ploskve, rešen mora biti tudi problem stabilnosti.

Predložene so enostavnejše možnosti sestave distančnikov iz:

- krogel, ki so v x - y ravnini sprijete med seboj
- valjev, ki so zloženi v isti smeri
- valjev, zloženih v plasteh z izmenično orientacijo
- votlih krogel ali valjev v zlogih iz opisanih primerov.

Pri naštetih možnostih je dosegljive meje toplotne prevodnosti možno izračunati v podobnih mejah točnosti kot v /4/. Primer, s katerim imamo opravka, se od citiranega razlikuje po znatno večjih tlakih na kontaktno mesto, zaradi česar je razlika med polnimi in votlimi kroglicami ali valji zanemarljiva. Razmerje debeline stene proti radiju sme biti za naš primer namreč iz trdnostnih razlogov le med 1 in 0.1, to je v področju, ko je razlika dejansko minimalna.

6 Drugi principi izdelave distančnikov

Stebričaste ali porozne strukture z dovolj majhnim povprečnim presekom so lahko alternativa za že predložene modele, če so vakuumsko kompatibilne, torej

nimajo zaprtih volumnov, se ne razplinjujejo in se smejo segreti na nekaj sto stopinj celzija. Prevodnost takšnih struktur je dovolj majhna zaradi dolgih prevodnih poti, bolj kot zaradi samih zožitev (konstrukcij). Zaradi trdnostnih zahtev vlaknasti materiali ne ustrezajo, od penasto ekspanziranih materialov ostanejo v izboru le anorganski materiali s kontrolirano poroznostjo, ki ne sme prerasti na mikroskali do stopnje, da jih je praktično nemogoče izčrpati. Podatki za prevodnost primernih steklenih materialov v vakuumu niso določljivi računsko, zato se je treba nasloniti na merjene vrednosti. Za dokaj približno oceno prevodnosti, neupoštevaje IR sevanje v notranjosti, je za stekleno penjeno strukturo z gostoto $0,7 \text{ g/cm}^3$, to je cca. $1/4$ gostote stekla, pričakovati prevodnosti $\lambda \sim 0,2 \text{ W/mK}$. Pri heksagonalni razporeditvi podpor višine 10 mm s površino vsake 50 mm^2 na razdalji $\alpha = 30 \text{ mm}$ lahko pričakujemo prispevek $h \text{ k} \sim 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Omenimo še možnost nasutja primerno pripravljenega materiala v ves črpani volumen VPI, kar srečamo pri današnjih rezervoarjih ohlajenih tekočih plinov. Bolj kot pri vzdrževanju primerne vakuuma nastopi tehnološki problem pri prvem črpanju. Zaradi slabe prevodnosti nasutja za pline je vakuumsko procesiranje dolgotrajno, odpade pa tudi možnost sorpcije med samo uporabo, kar izrabljamo v hladnih rezervoarjih.

7 Tehnološke možnosti realizacije VPI

Prvi pogoj za vzdrževanje visokega vakuuma, ki omogoča ohranitev lastnosti VPI daljše časovno obdobje, je pravilna izbira in priprava materialov in postopkov izdelave. Med temi je bistvena izvedba spojev in kontrola tesnosti. Laboratorijske možnosti izdelave VPI se razlikujejo od industrijskih, zato se bomo ustavili le pri izvedbi testnih vzorcev. Ti smejo biti priključeni na črpalni sistem s črpalno cevko, ki zahteva daljše pregrevanje in črpanje, brez katerih bi bili vzorci neuporabni za dolgotrajnejše preizkušanje. Vsakdo, ki se ukvarja z vakuuskimi spoji, se zaveda, da je dolžina varjenega spoja nekaj decimetrov (ali celo metrov), s tesnostjo boljšo od $10^{-10} \text{ mbar l/s}$, rešen tehnološki izziv. VPI je zanimiva v dimenzijah m^2 in več, torej je za kvadrat s površino 1 m^2 potrebno 4 m zvara. Laboratorijski vzorec s površino $0,1 \text{ m}^2$ pa ima $\sim 1,3 \text{ m}$ zvara. Med tehnikami varjenja nerjavne pločevine debeline med 0.1 in 0.2 mm so v vakuumski praksi pogosto uporabljene: mikroplazemsko, lasersko in točkasto kolutno varjenje. Varjenje v zaščitni atmosferi zagotavlja manjšo možnost pojavljanja vključkov in neoksidirano površino okolice zvara.

Priključitev vzorca VPI na črpalni sistem je možna z bakreno cevko, ki omogoča enostavno hladno varjenje po procesiranju. Metoda je poznana iz tehnologije izdelave specialnih elektronk, ki zahtevajo UVV tesnost.

Kontrolo tesnosti lahko na laboratorijskih vzorcih opravimo pred procesiranjem s helijevim leak detektorjem do področja $10^{-10} \text{ mbar l/s}$. Vzorci s takšno tesnostjo omogočajo nadaljnje postopke, ne zagotavljajo trajnosti, ki bi bila sprejemljiva za potencialnega uporabnika. Problematika spojev za področje, ki ga s

helijevim leak detektorjem ne pokrivamo, je poznana. Na srečo pa so spoji, ki puščajo pod to mejo, redki. Dovoljeno puščanje laboratorijskega vzorca s površino $0,1 \text{ m}^2$ in zahtevano trajnostjo 5 let, to je npr. poslabšanje vakuuma od 10^{-5} mbar do 10^{-3} mbar , je v področju $10^{-12} \text{ mbar.l/s}$.

Desorpcijo s sten in podporja lahko zmanjšamo le s primernim čiščenjem pred vgradnjo in ustreznim vakuuskim procesiranjem. Vakuumske elektronke so značilen primer visokovakuumskih komponent, kjer so vakuumske zahteve primerljive z zahtevami pri VPI. Globinsko degazacijo sestavnih delov opravimo v postopku žarjenja v vodiku ali vakuumu, površinsko pa s pregrevanjem VPI med črpanjem. Ocena za čas črpanja pri temperaturi 400°C je nekaj ur pri primerno dimenzionirani črpalni povezavi.

Standardna metoda znižanja tlaka residualnih plinov je uporaba primernih getrov, ki pa utegne biti pri VPI težavna. Getre lahko aktiviramo šele po pregrevanju, možnosti aktivacije pa sta dve: radiofrekvenčno ali uporovno. Prva možnost zaradi kovinske stene ne pride v poštev, uporovno segrevanje zahteva visokotokovne prevodnice. Možnost sorpcije, ki jo lahko uporabimo pri krio vakuumski izolaciji, za VPI na sobni temperaturi ni uporabna.

Industrijska izdelava VPI zahteva natančnejšo analizo stroškov, od cene materialov do optimalnih postopkov procesiranja. Stroške je treba opravičiti s prednostmi, ki jih VPI prinaša v primerjavi z drugimi vrstami izolacij. Izposojene napovedi /5/ kažejo, da bi bila VPI z vsemi prednostmi sprejemljiva alternativa za okolju neprijazne materiale. Napravimo primerjavo med karakteristikami poznanih izolacijskih materialov in njihovo potrebno nadomestno debelino d_n , ki ustreza VPI debeline 0.5 cm z ocenjeno vrednostjo $k = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, tabela 4. Vrednost za k v tej tabeli je nekajkrat večja od teoretično dosegljive meje za pravokotni prehod toplote. Ne smemo pa seveda zamolčati, da robni pojavi, ki so pri vakuumskih izolacijah dokaj pomembni, niso upoštevani. Njihov prispevek postane z večanjem ploskve relativno manjši, dodatno pa ga zmanjšamo s prekrivanjem izolacijskih ploskev, kar uporabljajo tudi sicer pri vseh vrstah izolacijskih elementov.

Tabela 4: Toplotne prevodnosti znanih izolacijskih materialov in potrebne debeline za doseganje $k = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, kakršno ima po oceni VPI

material	$\lambda_m [\text{W/mK}]$	$d_n [\text{cm}]$
pluta	0.04-0.05	20-25
steklena volna	0.035-0.07	17.5-35
volna	0.04-0.06	20-30
penasti poliuretan	0.02	10
stiropor	0.042	21
vak. superizolacija	$\sim 10^{-5}$	$\sim 0,05$

8 Sklep

Lastnosti vakuumske ploskovne izolacije nakazujejo, da bi ob sprejemljivi ceni našla uporabo v mnogih napravah, kjer je prehod toplote skozi stene glavni vzrok energijskih izgub. Pomisleki, ki se javljajo ob analizi tehničnih oz. tehnoloških možnostih za sprejemljivo ceno, so seveda upravičeni. Poznamo pa mnogo izdelkov, ki so bili pred desetletji dosegljivi za visoko ceno, a so danes v množični proizvodnji poceni. Ob upoštevanju ekološkega momenta je VPI izredno sprejemljiva alternativa za organske pene, ki vsebujejo kloro-fluorove spojine.

9 Literatura:

- /1/ W. Obert: *Advances in Cryog. Eng.*, Vol. 25, 1982, str. 293
- /2/ M. Wutz, H. Adam, W. Walcher: *Theory and Practice of Vacuum Technology*, Fridr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/ Wiesbaden, 1989
- /3/ Von B. Kluge, R. Knoener: *Heat transfer in packed glass spheres at low temperatures*, *Experimentelle Technik der Physik* 31; 2, 1983, str. 169-178
- /4/ C. K. Chan, C. L. Tien: *Conductance of Packed Spheres in Vacuum*, *Transactions of the ASME*, Aug. 1973, str. 302-308
- /5/ T. F. Potter, D. K. Benson: *Non CFC Vacuum Alternatives for Energy-Efficient Insulation of Household Refrigerators: Design and Use*, Proc. 42 nd Int. Appliance Technical Conf., Madison, Wisconsin, May, 1991
- /6/ B. O. Seraphine: *Topics in Applied Physics: Solar Energy Conversion*, Vol. 31, Springer-Verlag, Berlin, 1979

POSVETOVANJA

44. posvetovanje o metalurgiji in kovinskih gradivih in 1. posvetovanje o materialih, Portorož, 6-8. okt. 1993

Posvetovanji organizirajo Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Slovensko društvo za materiale, Slovensko kemijsko društvo - sekciji za polimere in keramiko in Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije. Plenarnim predavanjem vabljenih predavateljev bo sledilo delo v treh sekcijah:

- a) kovinski materiali,
- b) keramika in polimeri ter
- c) vakuumske tehnologije.

Sicer pa bodo obravnavane naslednje teme:

- sinteza sodobnih kovinskih, polimernih, keramičnih in kompozitnih materialov
- razvoj modernih tehnologij proizvodnje
- kakovost
- matematično modeliranje in računalniška simulacija procesov in tehnologij
- korozija in propad gradiv
- sodobne termične obdelave
- karakterizacija materialov
- vakuumska metalurgija
- tanke plasti in površine
- tribologija
- varstvo okolja
- druga področja uporabe gradiv

Delovna jezika na posvetovanju bosta slovenski in angleški. Dela, uvrščena v program, bodo objavljena v reviji *Kovine, zlitine, tehnologije*. V času posvetovanja bo organizirana tudi razstava, na kateri se bodo predstavila slovenska in tuja podjetja, proizvajalci in uporabniki materialov, gradiv in opreme.

Dodatne informacije dobite pri
dr. Moniki Jenko,
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije,
Lepi pot 11, Ljubljana,
tel: (061) 151 161, fax: (061) 213 780.

4. evropska vakuumska konferenca, Uppsala, 13-17. jun. 1994

Konferenco organizira švedsko vakuumsko društvo. Delo konference bo potekalo v naslednjih sekcijah:

- uporabna znanost o površinah
- elektronski materiali in procesiranje
- nanotehnologije
- znanost o površinah
- tanke plasti
- vakuumska znanost in tehnologije.

Delovni jezik bo angleški. Skrajni rok za oddajo abstraktov je 15.12.1993. Dela, sprejeta v program, bodo objavljena v reviji *Vacuum*. Več informacij dobite pri

dr. Lars Westerberg, The Svedberg Laboratory,
Box 533, S-751 21 Uppsala, Sweden,
tel: (46) 18 18 30 60, fax: (46) 18 18 38 33,
E-mail: WESTERBERG@TSL.UU.SE

4. seminar "Trde zaščitne prevleke" JOSTiN-93, 25.11.1993, Ljubljana

Seminar organizirajo Institut "Jožef Stefan", Smelt International, Gospodarska zbornica Slovenije in Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije. Program seminarja bo naslednji:

- pregled trdih prevlek in njihova uporabnost
- trde prevleke titanovega nitrida (TiN) v serijski proizvodnji
- nove vrste trdih prevlek - TiCN, CrN, TiAlN, DLC
- pravilna priprava orodij in strojnih delov za oplemenitenje
- oplemenitenje orodij tipa OCR 12, OSIKRO, MERILO (pod 220°C)
- karbidne trdine in kermeti.

Več informacij o seminarju dobite pri
prof. dr. Borisu Navinšek, Inštitut "Jožef Stefan",
Jamova 39, 61111 Ljubljana,
tel: (061)159 199, fax: 161 029, 273 677

KRIOSTATI IN VAKUUMSKA TEHNIKA

Andrej Pregelj, Miran Mozetič in Alojz Paulin*,

Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61000 Ljubljana

*Tehniška fakulteta Maribor, Smetanova 17, 62000 Maribor

CRYOSTATS AND VACUUM TECHNIQUE

Abstract

An extremely good vacuum thermal insulation is an indispensable condition for liquefying and preservation of the liquid nature of gases. Cryostats are vessels for experiments to be performed at low constant temperatures, at which even helium evaporates from hardly perceptible. According to their use, they are of different size and shape. A good insulation is attained by the vacuum coat, thermal shields around the internal vessel and by piping having a minimal thermal conductivity. Besides conductivity also other material characteristics such as emissivity factor, thermal expansion etc. are of great importance. This paper presents various cryostat realisations differing in construction and manufacturing technology.

Povzetek

Toplotna izolacija z vakuumom je neobhoden pripomoček za utekočinjanje in ohranjanje kapljevinske faze permanentnih plinov. Vakuumski kriostati so posode, iz katerih celo helij (vrelišče pri 4,2 K) izhlapeva komaj opazno; služijo kot okolje za poskuse, ki morajo potekati na konstantni nizki temperaturi. Glede namena in uporabe obstajajo naprave različnih velikosti in oblik. Dobra izolacija je dosežena z vakuumskim plaščem, s sevalnimi ščiti okrog osrednje posode in z dovodnimi cevmi, ki naj imajo čim manjšo toplotno prevodnost. Poleg prevodnosti so pomembne še druge lastnosti materialov, kot npr. koeficient sevanja, razteznost itd. Prispevek predstavlja značilne izvedbe kriostatov s konstrukcijsko tehnološkega vidika.

1 UVOD

Kriotehnika uporablja za doseganje nizkih temperatur različne fizikalne principe, hkrati pa s svojimi vrhunskimi tehnološkimi rešitvami pomaga drugim sodobnim panogam, ki potrebujejo hladno okolje. Glavna področja njene uporabe so:

- doseganje čim nižjih temperatur (fizikalne metode)
- utekočinjanje plinov (hladilni stroji)
- shranjevanje in transport utekočinjenih plinov

- vzdrževanje nizkih temperatur za proizvodne in eksperimentalne namene (kriostati)

Za izvajanje omenjenih nalog rabijo najrazličnejše kriogenske naprave. Med njimi so kriostati bistveno povezani z vakuumsko tehniko, kajti samo ta omogoča izvedbo izolacije, ki - v povezavi s še drugimi prijemi - zagotavlja vzdrževanje nizkih temperatur.

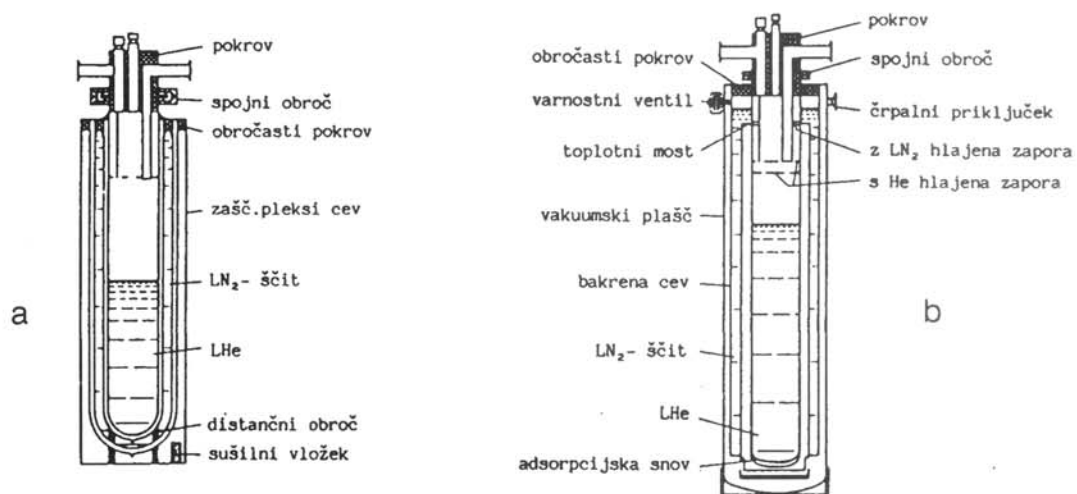
Izdelava kvalitetne krio naprave je tem zahtevnejša, za čim nižje temperature je namenjena. Tako so npr. kriostati za temperature nad 77K s sodobnimi tehnologijami povsem obvladljivi, pri izdelavi aparatov za nižje temperaturno območje (od nekaj K do 77K) pa je smiselno poleg obstoječega znanja iskati še novih rešitev, kajti izvedbene domisljice različnih proizvajalcev kažejo, da razvoj tu še ni povsem zaključen. Še veliko bolj je to izraženo pri gradnji naprav za temperature pod 1K, kjer si napredovanja brez visokih tehnologij in raziskovalnega dela sploh ne da zamisliti.

V tem prispevku bomo predstavili pregled obstoječih kriostatov, pomen oz. potrebnost vakuumov za njih delovanje ter nekaj primerov izvedb, s poudarkom na tehnološko konstrukcijskih zahtevah.

2 VRSTE KRIOSTATOV

Najrazličnejše obstoječe kriostate lahko razporedimo v skupine, npr.:

- glede na uporabljeni hladilni medij in po višini delovne temperature
- glede na velikost koristne prostornine, gabaritne dimenzije in po širini ustja



Slika 1. Steklen (a) in kovinski kriostat (b)

Prispevek je bil predstavljen na 1. srečanju vakuumistov Slovenije in Hrvaške v Zagrebu.

- po namenu uporabe
- glede na princip delovanja itd.

Med naštetimi je za splošno poznavanje kriostatov najpomembnejši zadnji način opredeljevanja. Poznani so torej:

A) Potopni kriostati

To so v bistvu dewar posode, tj. toplotno dobro izolirane shrambe za utekočinjene pline. Lahko so:

- steklene
- kovinske, povsem zvarjene (sl.1 in sl.3)
- kovinske z razstavljenim dnom
- kovinske z izrastkom v dnu, v katerem se nahaja vzorec, ki je lahko v vakuumu pritrjen na hlajen nosilec ali pa je direktno potopljen v helij; obstajajo tudi variante z oknom za opazovanje vzorca.

Pri teh kriostatih je temperatura določena z vreliščem uporabljenega utekočinjenega plina, torej imamo predvsem dve možnosti: 4,2K pri tekočem heliju (LHe) in 77K pri tekočem dušiku (LN₂).

B) Kriostati na uparjanje z nastavljivo temperaturo

Pri tovrstnih kriostatih lahko dosegamo temperature pod ali nad vreliščem uporabljenega hladilnega plina.

Ohlajanje pod vrelišče dosežemo tako, da znižujemo tlak nad utekočinjenim helijem oziroma dušikom. Konstrukcijsko so podobni dewar posodam, le da imajo prostor nad tekočo fazo obvezno zaprt in vgrajen priključek za vakuumsko črpalko ter merilnik tlaka.

Za zvišanje temperature nad vrelišče moramo dovesti zunanjo toploto v podstavek vzorca; to lahko storimo na dva načina:

- a) z vgradnjo lokalnega grelnika v nosilec vzorca; pri tem mora biti nosilec dobro toplotno izoliran od drugih delov kriostata
- b) z dovajanjem par krio-tekočine v okolico vzorca. Tlak teh par, ki ga lahko nastavljamo med 10⁻⁴ in 1000 mbar, ustvarja kondukcijski most med vzorcem in toplejšimi zunanji deli kriostata. Dosegljive so vse temperature med 2K in 300K. Ločimo dva tipa tovrstnih kriostatov; to so:
 - taki, pri katerih helijeva para prihaja v okolico vzorca iznad tekoče faze in
 - tisti, pri katerih je tekoči helij iz osrednje posode napeljan po kapilari v okolico vzorca in se tam uparja (slika 2). Dobra lastnost obojih je, da vzorca ni treba segrevati na nosilcu in je zato predmet temperaturno neodvisen od podlage.

C) Posebni kriostati

- a) Kriostati s plinskim hladilnim strojem (G. Mc Mahon, Stirling), ki delajo brez utekočinjenega plina z zaprtim plinskim tokokrogom; pokrivajo temperaturno območje 10 do 300K
- b) Kriostati s kombinacijo potopnega in uparjevalnega tipa (1K-300K)

c) Kriostati, običajno helijevi, za superprevodne (S.P.) magnetne, ki imajo vgrajeno S.P. tuljavo in električni priključek zanj

d) Kriostati na helijev izotop z atomsko maso 3 (0,01-300K),

e) Kriostati, prilagojeni za specialna raziskovalna področja.

3 VAKUUMSKE IN TEHNOLOŠKE ZAHTEVE

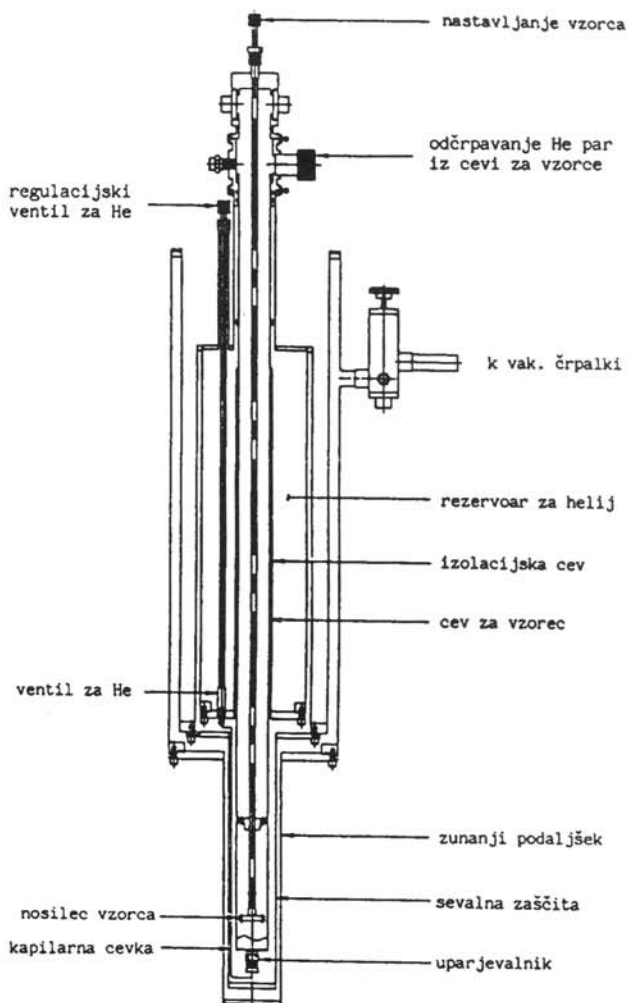
Kriostatske posode so sestavljene iz enega ali dveh koncentričnih rezervoarjev, ki vsebujeta tekoči dušik in helij; nahajata se v evakuiranem prostoru, ki povsem onemogoči direktno kondukcijo toplote na notranje hladne površine. Posodi sta medsebojno in na zunanji plašč povezani s cevmi za natakanje utekočinjenega plina in za izhajanje njegovih par. Te cevi povzročijo veliko toplotno obremenitev krioposode in hkrati kondenzacijo vlage na zunanjih priključkih. Da bi učinke prevodnosti zmanjšali, se za konstrukcijo priporočajo dolge cevi s čim tanjšo steno, ne prevelikega premera, in to iz materiala, ki ima čim manjšo toplotno prevodnost (npr. nerjavno jeklo). Za opore in distančnike med stenami posod se uporabljajo elementi s čim bolj točkovnim dotikom (npr. steklene kroglice).

Pri helijevih kriostatih plašč tekočega dušika razdeli vakuumski prostor v dva, znotraj povezana dela. Posoda za tekoči dušik in pogosto še po en ali dva toplotna reflektorja rabijo za preprečevanje sevalne obremenitve He-rezervoarja. Ker po Stefan-Boltzmannovemu zakonu velja sorazmerje med sevalnim tokom in 4. potenco absolutne temperature, je npr. sevanje LN₂-plašča pri 77K občutno manjše od sevanja enake površine pri sobni temperaturi 300K. Zato se z vsakim sevalnim ščitom zmanjša toplotna obremenitev helijevih posode. Druge vrste izolacija kriostatov in pretočnih cevi je večplastna, tki. multilayer superinsulation. Notranja posoda je ovita 30-60 krat z Al-folijo oz. s plastično folijo, ki je prekrita s kovinsko tanko plastjo; ovoji zrcalnih površin so medsebojno ločeni z distančnim trakom. Pri helijevih kriostatih se ta tip izolacije uporablja predvsem v predelu med dušikovim rezervoarjem in zunanjo steno naprave. Pri velikih shranjevalnikih (več m³) za utekočinjene pline je vakuumski plašč pogosto zasut s perlitnim granulatom.

Tlak v vakuumskem prostoru naj ne bi bil v nobenem primeru višji od 10⁻⁴ mbar. Pri sobni temperaturi so tedaj proste poti molekul ~100 cm, kar je več, kot so značilne razdalje med hladnimi in toplimi stenami večine krio naprav. To je tipično področje molekularnih tokov, kjer dominirajo trki molekul med stenami vakuumskega plašča; če je tlak še za dekadno ali dve nižji, lahko prevajanje toplote še toliko bolj zanemarimo. Ker konvekcije ni, ostane edini možni prenosnik energije: sevanje. Le-tega zmanjšujemo z zrcalnimi ščiti, ki z gladkostjo površin pri izbranih materialih najbolj vplivajo na zvečanje refleksije (oziroma na zmanjšanje emisijskega koeficienta).

Ugotavljamo, da je pri gradnji kriostatov nujno potrebno dobro poznavanje materialov in tehnoloških postopkov, poleg tega pa še vakuumske tehnike in prenosa toplote. Navajamo nekaj znanih izkušenj in ugotovitev:

- Najpogostejši gradbeni materiali za kovinske kriostate so: aluminij, nerjavno jeklo in baker
- Tesnost posod dosegamo s kvalitetnim spajanjem; navadno je to varjenje TIG ali mikroplazma; pri razstavljivih elementih pa pridejo v poštev tesnila iz elastomerov za normalne in iz indija za kriotemperature
- Materiali se morajo dobro variti
- Gladkost. Že osnovni, izhodiščni material (pločevina) ne sme biti hrapav, po obdelavah in varjenju pa sestavne dele dodatno poliramo in tudi elektro-poliramo; bakreni deli kvalitetnih kriostatov so pred tem še kromani
- Običajni so vsi vakuumsko tehnološki prijemi, kot npr.: čistoča, detekcija netesnosti sestavnih delov že v vmesnih fazah izdelave, skrbna montaža itd.
- Doseganje toplotnega stika (termično sidranje) je izvedeno z masivnimi bakrenimi pletenicami in vijačenjem; uporabljajo se tudi specialne toplotno prevodne paste, predvsem za zagotavljanje kvalitetnega stika temperaturnih senzorjev z vzorcem

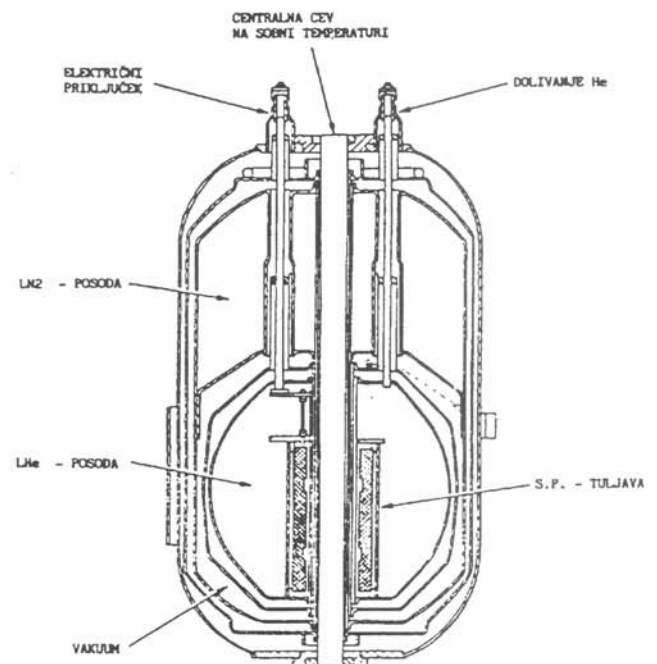


Slika 2. Helijev kriostat z razstavljivim podaljšanim dnom

- Za morebitno obnovo vakuuma je večina kriostatov in tudi drugih krio naprav opremljena na zunanji steni z ventilom za ponovno izčrpavanje
- Zaradi nevarnosti prehitrega uparjanja je v zunanji steni poleg črpalnega priključka vgrajen skoraj vedno tudi varnostni ventil (0,2-0,4 bar)
- Za oceno toplotnih tokov je potrebno narediti vsaj približne preračune, ki opozorijo projektanta na prenekatero pomembno podrobnost.

4 PRIMERI KRIOSTATOV

A) Primera na sliki 1 sta enostavni dvojni dewar posodi; v notranjo, napolnjeno s helijem, potopimo vzorec. Na vrhu sta pokriti, da se izboljša izolacija, hkrati pa pokrov rabi za nameščanje vzorca, za priklop odsesavanja, za polnjenje s svežim He in za vgraditev morebitnih električnih prevodnic. Prednosti steklene izvedbe sta možnost opazovanja in cenenost, slabost pa krhkost in prepustnost za He. Pri kovinski varianti je vgrajen tudi varnostni ventil in priključek za ponovno evakuiranje zunanjega plašča.



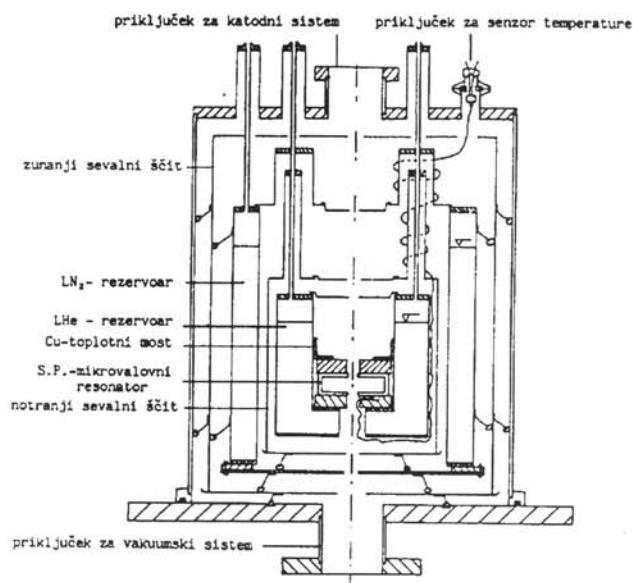
Slika 3. Helijev kriostat iz aluminija firme Varian

B) Slika 2 prikazuje uparjevalni kriostat iz nerjavnega jekla s sestavljivim podaljšanim dnom. Pri tej izvedbi prihaja helij iz osrednje posode preko dozirnega ventila in kapilare do uparjevalnika, ki se nahaja v bližini vzorca. Vzorec je nameščen v posebni cevi na drogu za pozicioniranje; oblijavajo ga pare vplinenega helija katerih tlak lahko z nastavljivim odčrpavanjem vzdržujemo na poljubnem nivoju med 10^{-4} in 1000 mbar. Tako lahko zagotovimo vzorcju katerokoli temperaturo med 2 in 300K.

C) Kriostat za superprevodno tuljavo (slika 3) je proizvod firme Varian v ZDA. Izdelan je povsem iz aluminija; vsi spoji so varjeni. Notranje posode so medsebojno fiksirane z vrvicami iz umetne snovi, tako da kot toplotni mostovi nastopajo samo cevi za natanje. Skozi sredino ima v navpični smeri speljano odprto cev, v kateri S.P. tuljava ustvarja zelo močno magnetno polje. Navitje sestavlja več manjših, različno orientiranih tuljavic, katerih priključki so združeni na posebni vtičnici v tekočem heliju. Naprava rabi za analizo kemičnih snovi z jedrsko magnetno resonanco (NMR); vzorci se namestijo v sredino cevi. Hladni

rezervoar sprejme ca 25 l tekočega helija. Za občasno izčrpavanje je na stranski steni vgrajen priključek z zatičnim čepom.

D) Helijev kriostat za eksperimentiranje s superprevodnim mikrovalovnim resonatorjem je v fazi priprave projekta na IEVT. Izdelan bo iz nerjavnega jekla iz pločevin debeline 0,5 do 3 mm, ki bodo varjene in potem elektropolirane. Debelejši sta le zgornja in spodnja zunanja plošča, ki imata vakuumske prirobnice za priklop izvira elektronov in dinamičnega vakuumskega črpalnega sistema.



Slika 4. Konstrukcija helijevega kriostata za eksperimentiranje s superprevodnim mikrovalovnim resonatorjem.

5 SKLEP

Opisali smo glavne vrste kriostatov in se dotaknili nekaterih problemov, ki jih je potrebno upoštevati pri gradnji krio naprav. V okviru nastajanja projekta Herkriostata za S.P. resonator smo se z njimi tudi praktično srečali ter zbrali obilo podatkov o kovinah, plinih, tekočinah, ki so načrtovalcu kriogenških naprav nujno potrebni, a presegajo okvir tega prispevka.

6 LITERATURA

- /1/ R. B. Scott: Cryogenic Engineering, Met.-Chem. Inc., Boulder 1963,
- /2/ R. Borron: Cryogenics Systems, McGraw Hill, N.Y. 1981,
- /3/ LH-tehnični prospekt: Cryogenics HV 250/12, 10/81,
- /4/ A. Pregelj: Doseganje nizkih temperatur, seminar 1991,
- /5/ M. N. Jirmanus: Introduction to laboratory cryogenics, Janis R. C. Inc., 1990,
- /6/ Varian: General instructions for handling liquid helium, VXR-Series Magnet Installation and Maintenance, 1987, USA,
- /7/ A. J. Croft: Cryogenic Laboratory Equipment, Plenum Press, N. York, London, 1970.

NOVA KNJIGA

Vakuumska tehnika za srednješolske predavatelje, urednik J. Gasperič,
Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, junij 1993, 113 str., 84 slik

Knjigo lahko naročite na naslov: DVT Slovenije, Teslova 30, 61111 Ljubljana,
ali po telefonu (061) 263 461 (dr. Bojan Jenko, Andrej Pregelj)

VAKUUMSKO SUŠENJE LESA V PRAKSI

Željko Gorišek, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Rožna dolina cesta VIII/34, 61000 Ljubljana

Vacuum drying of wood in practical application

Abstract

The basic characteristics of wood drying in vacuum are described and the methods of processing introduced in woodworking industry are presented. With assessing the drying time, energy consumption and drying quality, the aim of vacuum drying to practical application is discussed.

Povzetek

Opisane so osnove sušenja lesa v vakuumu in predstavljeni načini, ki so se uveljavili v lesnoindustrijski praksi. Smotnost uvajanja tega načina sušenja je ocenjena z vidika časa sušenja, porabe energije in kvalitete osušenega materiala.

1 Uvod

Vakuumska tehnika ni nova metoda v lesni industriji, saj se je že uveljavila pri oplemenjevanju lesa, globinskem barvanju, impregnaciji in stabilizaciji lesa. Hitro se razvijajo tudi najrazličnejši načini sušenja v vakuumu, kar kaže na smotnost takšnega načina sušenja.

Pri sušenju lesa se uporabljajo tlaki, ki jih uvrščamo v področje grobega vakuuma (od 2700 Pa do 10000 Pa), ki ga je mogoče doseči s "hidravličnimi črpalkami". V literaturi ga srečamo tudi pod nazivom podtlakno sušenje.

2 Osnove sušenja v vakuumu

V primerjavi z industrijsko najbolj razširjenim normalnotemperaturnim konvekcijskim komorskim sušenjem lesa ima vakuumski način dve pomembni prednosti /1/: sušenje se izvaja pri nižjih in zato prizanesljivejših temperaturah, podtlak pa ugodno vpliva tudi na pretok vode v lesu.

Pri znižanem tlaku se les suši z notranjim izparevanjem pri zelo nizkih temperaturah, kar je pomembno zlasti za temperaturno občutljive lesne vrste.

Nižji tlak pospešuje tudi gibanje higroskopske vode v lesu, saj je difuzijski koeficient nekajkrat večji kot pri normalnem zračnem tlaku (tab. 1) /2/.

Tabela 1 - Difuzijski koeficient vezane vode v odvisnosti od tlaka.

Tlak [kPa]	8	10	20	40	60	80	100
Dif.koef. [m^2/s]	1,8	1,2	0,78	0,50	0,41	0,39	0,36

Zaradi nižjega tlaka vre voda pri nižji temperaturi, to je pri temperaturi, pri kateri je skupni tlak enak

nasičenemu tlaku vodne pare. Temperaturi uparjanja vode ustreza točno določen tlak nasičenja in obratno. V tem stanju je voda v ravnovesju s svojo paro, zato odvisnost temperature od tlaka izrazimo s Clausius-Clapeyronovo enačbo:

$$dp / dT = dh / T dv$$

S poenostavitvijo dobimo:

$$d(\ln p) / d(1/T) = - q_i / R$$

V zgornjih enačbah pomeni:

T	- temperatura	[K]
p	- tlak	[Pa]
h	- entalpija	[J/mol]
V	- volumen	[m^3]
q_i	- izparilna topota	[J/mol]
R	- plinska konstanta	[8,314 J/mol K]

Osnovni problem sušenja v vakuumu je slaba konvekcija toplote in težavno segrevanje lesa. Do danes se je skušalo uveljaviti več postopkov /3, 4, 5, 6/, ki na različne načine rešujejo težavo prenosa toplote:

- zmanjšani toplotni tok se nadomesti z večjo hitrostjo sušilnega medija
- uvaja se kontaktno segrevanje s pomočjo grelnih plošč
- segrevanje se izvaja pri normalnem tlaku, aktivna faza sušenja pa pri podtlaku
- proučuje se vakuumsko sušenje v kombinaciji z visokofrekvenčnim.

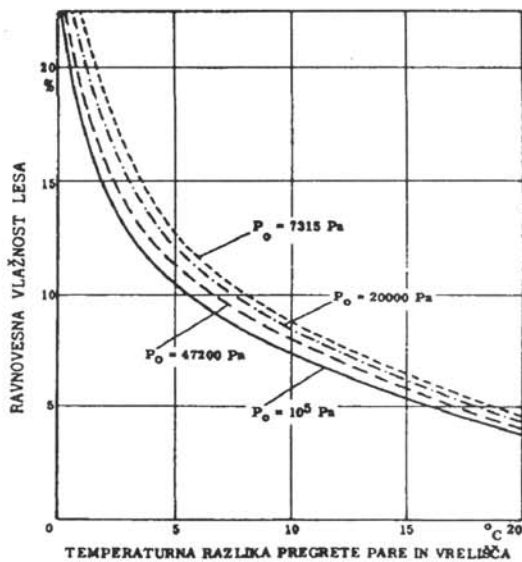
3 Potek konvekcijskega sušenja s konstantnim podtlakom

Segrevanje ima nalogo ogreti sušilno komoro in pregreti les do najugodnejših razmer za izvajanje sušenja. Prenos toplote opravlja tok pare, ki se na lesu kondenzira in odda latentno izparilno toploto. Tako je segrevanje zelo pospešeno in se konča, ko se temperatura lesa dvigne na temperaturo izparevanja. Vlažen les se zaradi visoke toplotne prevodnosti hitro segreje tudi v notranjosti.

Hitrost sušenja je med prvo fazo konstantna. Temperatura površine lesa je enaka vrelišču vode, hitrost izparevanja pa je omejena s količino toplote, ki jo pregreta para odda površini. Trajanje prve faze sušenja je odvisno od intenzivnosti kapilarnega gibanja proste vode in se zaključuje, ko je dotok proste vode na površino manjši od ekvivalentne količine toplote, potrebne za njeno uparitev.

Presežek toplote zvišuje temperaturo površine lesa, ki se osuši pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS). Dosežena je kritična točka, ki prevesi sušenje v drugo fazo. Kapilarno gibanje proste vode obstaja v manjši meri le še v notranjosti lesnega tkiva, proti površini pa prevladuje mnogo počasnejši difuzijski tok. S sušenjem pod TNCS se pojavi tudi neugodno anizotropno krčenje, ki generira notranje napetosti. Če le-te prekoračijo trdnost lesnega tkiva, pride do razpok.

Ravnovesna vlažnost (to je vlažnost, ki bi jo les zaradi svoje higroskopnosti dosegel po daljšem uravnovešanju v konstantni klimi) je odvisna le od temperaturne razlike med pregreto paro in vreliščem, absolutni tlak pa z znižanjem le nekoliko dvigne ravnovesno vlažnost (sl. 1) [7]. Površina doseže temperaturo pare in se hkrati osuši na ravnovesno vlažnost. Hitrost sušenja je odvisna od difuzivnosti in toplotne prevodnosti lesa. Ostrina sušenja je odvisna od ravnovesne vlažnosti klime, ki se tako uravnava s stopnjo pregretja pare.



Slika 1. Lesna ravnovesna vlažnost v odvisnosti od pregretja pare pri različnih tlakih

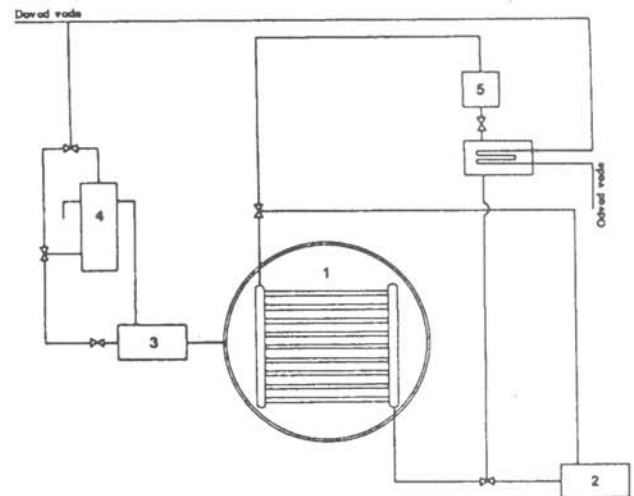
4 Potek sušenja s kontaktnim segrevanjem z grelnimi ploščami

Pri kontaktnem vakuumskem sušenju se potrebna toplota prenaša na les preko grelnih plošč, ki se z lesnimi elementi izmenično naložijo v zložek.

Grelni plošče so ogrevane z vročo vodo, redkeje tudi z električnim tokom. Plošče so prepletene s cevmi in prekrte s pločevino, ali pa so v celoti izdelane iz aluminijastih profilov. Izparjena voda iz lesa se kondenzira na hladnih ploščah, ki so nameščene vzdolž komore. Kondenzat se nabira na dnu komore in prek posebnega regulacijskega ventila izteka iz sušilnice.

Da bi se dosegel boljši učinek sušenja, se v nekaterih sistemih po segrevanju periodično, vendar zelo kratkotrajno, dovaja v grelni plošče tudi hladna voda, ki

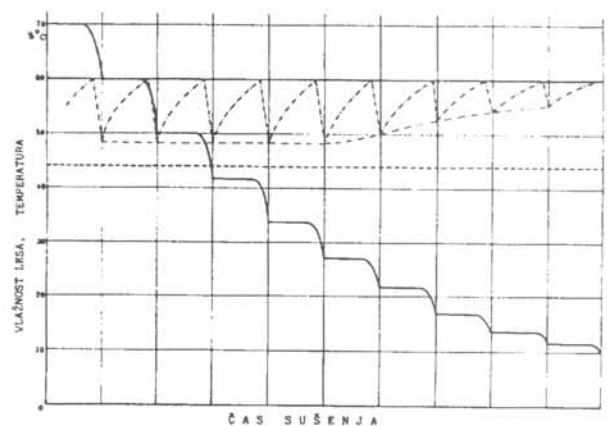
ohladi površino lesa. Temperaturni gradient se obrne v notranjost, kamor je zaradi intenzivnega sušenja s površine obrnjen tudi vlažnostni gradient, razmere za sušenje pa so tako najugodnejše. Shematski prikaz postrojenja je prikazan na sliki 2.



Slika 2. Shematski prikaz postrojenja za kontaktno vakuumsko sušenje s kratkotrajnimi fazami hlajenja površine lesa. 1 - sušilni valj, 2 - kotel, 3 - vakuumsko črpalko, 4 - zbiralnik, 5 - zbiralnik hladilne vode

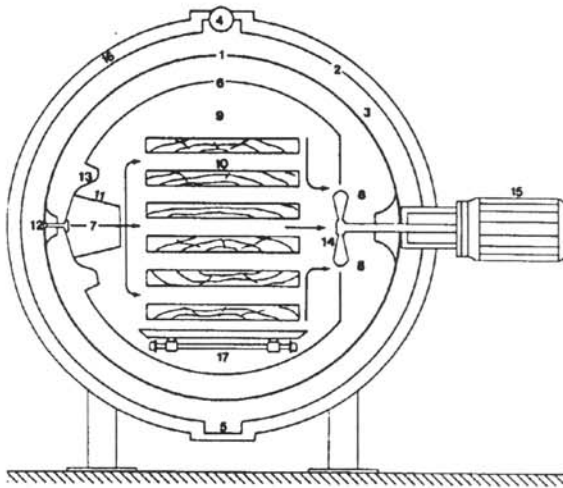
5 Diskontinuirano konvekcijsko sušenje

Konvekcijsko vakuumsko sušenje je lahko diskontinuirano, pri katerem se izmenjujeta fazi segrevanja in vakuumiranja. Segrevanje, med katerim je možno tudi navlaževanje, poteka pri normalnem zračnem tlaku, tako je zadovoljivo rešen prenos toplote. Les se pregreva na enak način kot pri konvencionalnem normalnotemperaturnem sušenju, le temperature so nižje. Izparevanje vode pospeši faza evakuiranja, ki je dejansko edina aktivna, medtem ko je segrevanje ta čas prekinjeno. Zaradi izparevanja vode s površine lesa se le-ta ohlaja, v notranjosti pa je temperatura konstantna. Zaradi enako usmerjenega temperaturnega in vlažnostnega gradienta so pogoji sušenja zelo ugodni.

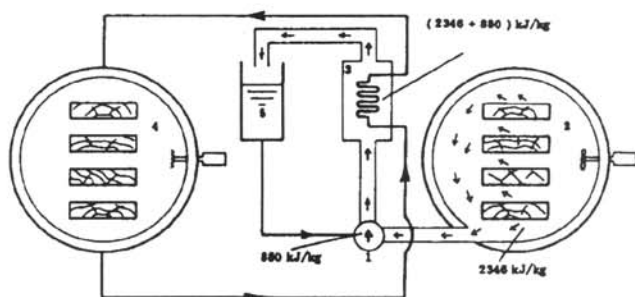


Slika 3. Potek diskontinuiranega vakuumskega sušenja: (----) - vlažnost lesa, (- - -) - vrelišče, (- · - · -) - temperatura lesa

Evakuiranje se prekine, ko se les ohladi pod temperaturo vrelišča in se izparevanje močno zavre. V sušilnem valju se vzpostavi normalni tlak in ponovi faza sergevanja (sl. 3). Za diskontinuirano konvekcijsko vakuumsko sušenje je shema sušilnega valja prikazana na sliki 4.



Slika 4. Presek sušilnega valja konvekcijske vakuumске sušilnice. 1 - glavna stena valjastega sušilnika, 2 - kovinski plašč, 3 - medprostor, v katerem kroži vroča voda, 4 - dovodni zbirnik, 5 - povratni zbirnik, 6 - kovinska pregrada, 7 - vstop ogretega zraka v zložaj, 8 - izstop uporabljenega zraka, 9 - notranjost sušilne komore, 10 - zložaj lesa, 11 - usmerjevalnik zraka, 12 - os za premikanje usmerjevalnika zraka, 13 - pregibna membrana, 14 - ventilator, 15 - motor ventilatorja, 16 - termična izolacija, 17 - voziček



Slika 5. Shema delovanja in prihranek energije pri povratnem izkoriščanju toplote

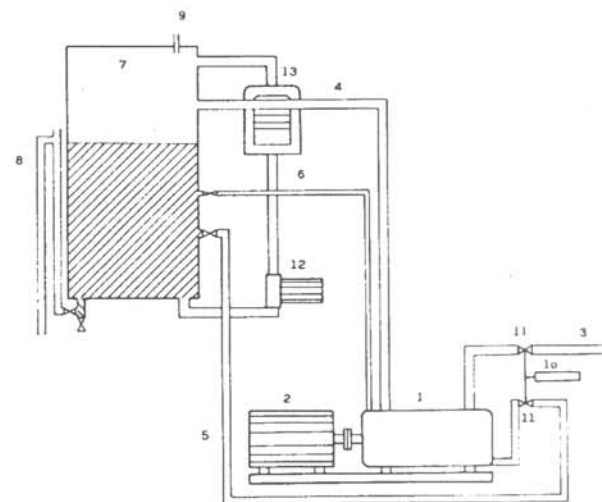
Učinkovitost glede porabne energije pri konvekcijskem diskontinuiranem vakuumskem sušenju je možno povečati z izkoriščanjem odpadne povratne toplotne (rekuperacija). Sušilno napravo sestavljata dva valja, ki delujeta ciklično v nasprotnih fazah in imata skupno vakuumsko črpalko in izmenjevalnik

toplote (sl. 5). Iz valja, ki je v fazi evakuiranja, se vodi para v toplotni izmenjevalnik, kjer se kondenzira in segreva valj, ki je v fazi segrevanja. Ko se les v prvem valju zaradi izparevanja ohladi pod temperaturo vrelišča, se fazi v obeh valjih zamenjata.

6 Viskokofrekvenčni vakuumski postopek

Visokofrekvenčni vakuumski postopek izkorišča visokofrekvenčne valove za prenos energije na les in omogoča sušenje pri kontinuiranem evakuiranju. Les se brez razmikanja naloži na kovinske plošče, ki hkrati rabijo tudi kot elektrode. Vлага se izloča skozi vakuumsko črpalko in serijo vodnih kondenzatorjev.

Podtlak se v sušilnem valju doseže s hidravlično vakuumsko črpalko. Doseženi tlaki ustrezajo temperaturi vrelišča vode od 25°C do 45°C. Povezava hidravlične črpalke, elektropnevmatske skupine in oljnega zbirnika je prikazana na sliki 6.



Slika 6. Povezava in krogotok vakuumске črpalke. 1 - vakuumška črpalka, 2 - elektromotor, 3 - izhodna cev iz sušilnega valja, 4 - odtok olja in vodne pare v zbirnik, 5 - dotok olja v črpalko, 6 - mazanje tesnil črpalke, 7 - zbirnik, 8 - sifon za odstranjevanje kondenzirane vode, 9 - odprtina za izhod zraka in vodne pare, 10 - pnevmatski bat, 11 - ventil, 12 - črpalka tokokroga olja skozi hladilno napravo, 13 - hladilna naprava.

7 Časi sušenja in poraba energije

Primerjava časov vakuumskega sušenja v praksi in izračunanih časov normalnotemperaturnega konvekcijskega sušenja kaže na učinkovito sušenje v vakuumu, saj je v povprečju za 30 do 40 % hitrejše. Zlasti je opazna večja prednost vakuumskega sušenja pri debelejših sortimentih problematičnejših lesnih vrst. Deklarirani podatki proizvajalcev so iz komercialnih razlogov za prakso nerealni, saj bi bili časi pri

tanjših sortimentih do dvakrat, pri debelejših pa tudi več kot petkrat krajši od časov konvencionalnega sušenja.

Specifična poraba energije na kg izločene vode je pri kontaktnem vakuumskem sušenju za 35 do 55 % večja kot v normalnotemperaturnih konvekcijskih sušilnicah /8/. Bolj vzpodbuden je podatek za diskontinuirano sušenje z rekuperacijo, pri katerem je poraba manjša še za 15 do 25 % oz. skupaj za 40 do 85 %. Manjša poraba energije je bila izmerjena tudi pri vakuumskem postopku v pregreti pari; pri sušenju iglavcev je specifična poraba na 1 kg izločene vode 0,5 do 0,8 kWh, pri hrastovini pa 1,49 kWh.

8 Sklep

Pri vakuumskem sušenju gre v principu za sušenje v pregreti pari, le da je zaradi podtlaka temperatura znižana, zato je to sušenje mnogo bolj prizanesljivo, kar je pomembno zlasti za sušenje lesnih vrst, ki ne prenesejo višjih temperatur (hrast, javor). Kontinuirano vakuumsko sušenje je zlasti primerno za debelejša sortimente gostejših iglavcev, medtem ko se za občutljive drevesne vrste odsvetuje diskontinuirano vakuumsko sušenje. Važen moment je tudi dejstvo, da sušenje poteka pri znatno zmanjšani prisotnosti kisika, kar vsekakor zmanjšuje možnost obarvanja. Sušenje v vakuumu znižuje temperaturo destilacije, zato se izparljivi deli smol izločijo, ostanki pa kristalizirajo, kar preprečuje kasnejše iztekanje smole.

Časi sušenja so daljši od proklamiranih, kar nas navdaja s pomislekom, če so sušilnice v praksi maksimalno izkoriščene. Vendar pa so časi še vedno dovolj kratki, da omogočajo fleksibilno proizvodnjo zlasti zato, ker je vakuumsko sušenje primerno za vse drevesne vrste.

Velika hiba, če jo smemo tako imenovati, je majhna kapaciteta (3 do 20 m³ oz. do 40 m³ v tandemu), ki pa se v zadnjem času izboljšuje, saj se gradijo komore tudi s kapaciteto do 120 m³. Vakuumsko sušenje trenutno še ne velja kot alternativa, temveč le kot koristna in fleksibilna dopolnitev.

V vakuumu je težavno tudi sušenje zelo vlažnega lesa, zato se priporoča, da začetna vlažnost ne bi preseгла 50 %.

Investicijski stroški (po m³ neto prostornine) so precej visoki, zlasti za konvekcijske sušilnice, ki imajo poleg vseh elementov klasične sušilnice še dodatni agregat za evakuiranje. Prav tako je treba računati na visoke stroške vzdrževanja grelnih plošč in nenehnega kontroliranja ter odpravljanja korozije.

9 Literatura

- /1/ L. Bollmann, Leitfaden der Schnittholztrocknung. Rielasinger, 1985, p. 90
- /2/ B. Pagnozzi, Die trocknung gesägten Holzes im Vakuumverfahren am Vergleich mit den traditionellen Ventilationssystemen, Mespell Broschure Nr. 2, 1977
- /3/ S. G. Mastera, Die Vakuumtrocknung von Holz, Holz und Kunststoffverarbeitung, 11 (1979) 929-930
- /4/ J. Strubing, Vakuumtrocknung von Schnittholz, Holz und Kunststoffverarbeitung, 5 (1979) 450-451
- /5/ T. Trubswetter, Die Vakuumtrocknung - Diskussion einiger Fragen zur Anwendbarkeit in der Praxis, Holz und Kunststoffverarbeitung, 11 (1979) 926-927
- /6/ R. A. Haris, M. A. Taras, Comparison of moisture content distribution, stress distribution and shrinkage of red oak lumber dried by radiofrequency/vacuum drying process and a conventional kiln, Forest Products Journal, 34(1), 44-54
- /7/ D. Noack, Sonderverfahren der Holz-trocknung: Vakuumtrocknung, Holzwirtschaftliches Jahrbuch No. 15. DRW - Verlags - GMBH, Stuttgart, 1965, 171-183
- /8/ A. Teischinger, Die technische Holz-trocknung heute, Internationaler Holzmarkt, 72 (3), 1981, 5-6

NOVA KNJIGA

Vakuumaska tehnika za srednješolske predavatelje, urednik J. Gasperič,
Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, junij 1993, 113 str., 84 slik

Knjigo lahko naročite na naslov: DVT Slovenije, Teslova 30, 61111 Ljubljana,
ali po telefonu (061) 263 461 (dr. Bojan Jenko, Andrej Pregelj)

SPOJI STEKLA S KOVINO V VAKUUMSKI TEHNIKI

Alenka Šventner-Kosmos in Smiljan Jerič, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61111 Ljubljana

GLASS TO METAL SEALS IN VACUUM TECHNIQUE

ABSTRACT

The glass to metal seal enables vacuum tight permanent seal. A bond between glass and metal is formed by interaction on the contact surface, and can be direct or formed by an oxide layer. According to the grade of the matching between the expansion of the metal and glass, the matched and unmatched seals are known. Matching between the expansion of metal and glass avoids stresses in the seal. Stresses in seals are influenced also by the cooling rate from working conditions to the room temperature. Glass to metal seals, working techniques, and properties of matched and unmatched seals are presented.

POVZETEK

Ena od možnosti za permanentno spajanje v vakuumski tehniki je spoj med steklom in kovino. Ta vez je posledica interakcije na kontaktni površini in je lahko direktna ali pa poteka preko oksida. Glede na stopnjo ujemanja temperaturnih raztezkov kovine in stekla poznamo usklajene in neusklajene spoje. Ujemanje temperaturnih raztezkov prepreči napetosti v spoju. Na napetosti vpliva tudi hitrost ohlajanja s temperature izdelave spoja na sobno temperaturo. V članku je podan pregled spojev stekla s kovino, naštetih so postopki izdelave in opisane značilnosti usklajenih in neusklajenih spojev.

1 UVOD

Vakuumski sistemi so pogosto sestavljeni iz različnih komponent, ki se razlikujejo po materialu in obliki. Komponente med seboj povežemo z ustreznimi vakuumskimi spoji. Glede na trajnost lahko spoje delimo na /1/:

- trajne (permanentne)
- semipermanentne
- razstavljive

K permanentnim spojem spadajo tudi spoji stekla s kovino.

2 Spoji stekla s kovino

Spoje stekla in zlate folije so poznali že stari Egipčani /2/. Prvi vakuumsko tesni spoji platinske žice in mehkega stekla so se pojavili na začetku 19. stoletja. Bili so osnova za razvoj Edisonove žarnice, prvih elektronk, tudi rentgenskih. Uporaba spoja se je razširila v industriji žarnic, elektronk, polprevodniških elementov in vakuumskih naprav. Platino so zamenjale druge kovine, največkrat posebne vrste jekel (FeNi, FeNiCo, FeNiCr) v kombinaciji z ustreznimi stekli.

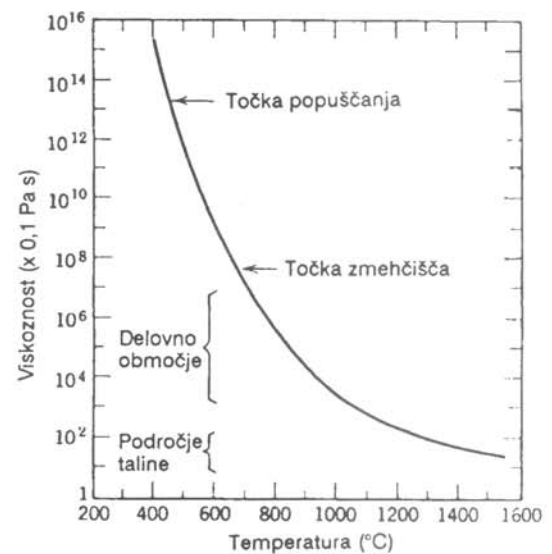
Da bi dobili vakuumsko tesen spoj stekla s kovino, morajo biti izpolnjeni naslednji pogoji /1/:

1. Dobra adhezija med kovinsko površino in steklom
2. Temperaturna razteznostna koeficienta stekla in kovine se morata ujemat, ali pa moramo uporabiti plastične in elastične lastnosti nekaterih kovin

3. Kontrolirati moramo proces hlajenja, da čimbolj zmanjšamo napetosti v spoju
4. Izbrati moramo obliko spoja, ki zagotavlja minimalne in nenevarno orientirane napetosti

Dobro vez med steklom in kovino dobimo samo, če na kontaktni površini pride do interakcije. Marsikje ta mehanizem še ni teoretično razložen. Eksperimentalni rezultati potrjujejo, da je adhezija stekla s kovino posledica direktne vezi ali pa vezi preko oksida.

Pri direktni vezi stekla s kovino nimamo vmesne prehodne plasti. Tak spoj je lahko vakuumsko tesen, vendar vez navadno ni močna. Spoji stekla s kovino so mehansko trdnjši, če je med njima plast oksida. Slednja vsebuje mešanico nižjih oksidov na površini kovine do višjih, ki se topijo v steklu. Zanesljivost spoja določa debelina (100-1000 Å) in vrsta oksida ter enakomernost plasti.

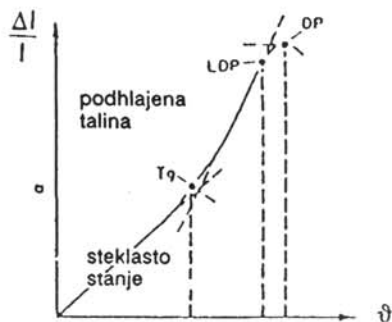


Slika 1. Temperaturna odvisnost viskoznosti pri trdem steklu /3/

3 Ekspanzijsko ujemanje

Glede na ujemanje temperaturnih raztezkov stekla in kovine razlikujemo:

- a) **usklajene spoje:** sestavljeni so iz komponent, ki imajo enake toplotne raztezke
- b) **neusklajene spoje:** različne raztezke kompenziramo s plastično deformacijo kovine ali z velikimi tlačnimi napetostmi, ki delujejo na steklo.



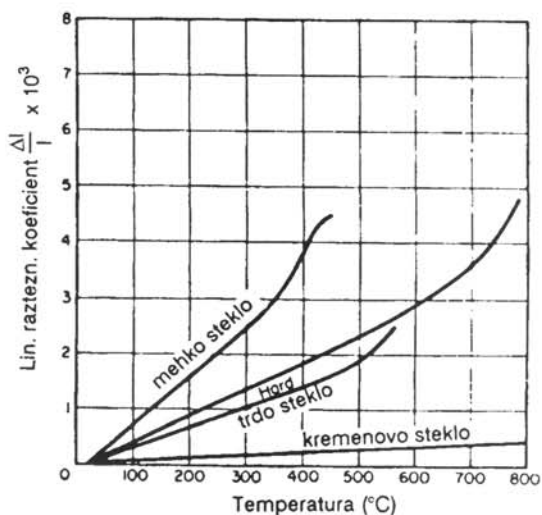
Slika 2. Relativni temperaturni raztezek stekla, T_g , DP in LDP [1]

T_g temp. prehoda iz stanja podhlajene tekočine v steklasto stanje

LDP, DP deformacijska temp.

$\Delta l/l = \alpha \cdot T$ relativni raztezek

$\Delta l/l \cdot 1/\Delta T =$ termični razt. coef

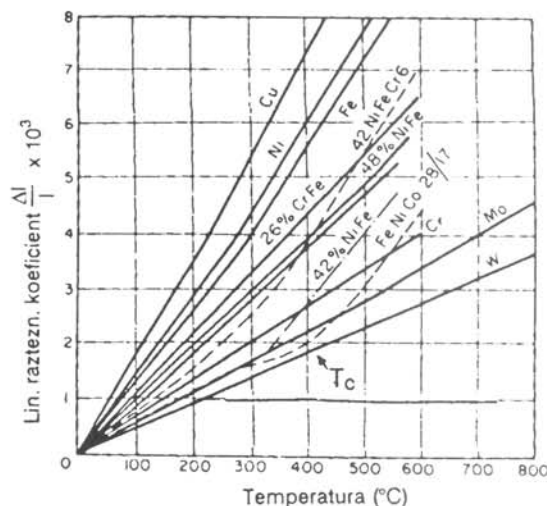


Slika 3. Raztezek mehkih, trdih in kremenovega stekla v odvisnosti od temperature [1]

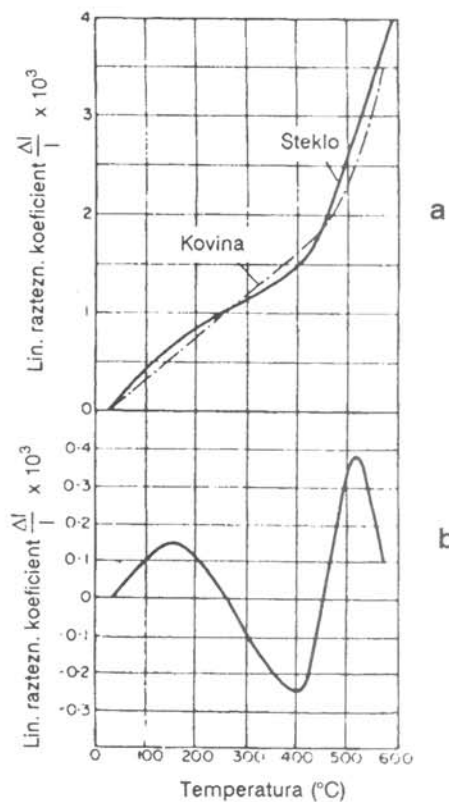
Mehka stekla: temperaturni razteznostni koeficient $> 60 \cdot 10^{-7} K$

Trda stekla: temperaturni razteznostni koeficient $< 60 \cdot 10^{-7} K$ [4]

V posameznih primerih kovino pred spajanjem s steklom prevlečemo s plastjo druge kovine, da dobimo spoje z bolj usklajenimi raztezki. Na sliki 1 je prikazana temperaturna odvisnost viskoznosti za trdo steklo, ki je ena od osnov za oblikovanje stekla [3]. V področju taline je viskoznost 5-50 Pa.s, v delovnem območju pa je večja: 10^3 - 10^7 Pa.s, v območju popuščanja je še večja: $10^{11,5}$ - $10^{12,5}$ Pa.s. Viskoznost je primarna lastnost, ki določa temperaturno območje obdelave in popuščanja notranjih napetosti stekla. Praktične operativne točke določimo z merjenjem viskoznosti (slika 1). Najbolj pogosto definiramo točko popuščanja: to je temperatura, pri kateri se notranja napetost bistveno zmanjša v 15 minutah (ekvivalentna viskoznost je $10^{12,6}$ Pa.s) in točko zmečkaišča, ki je pri viskoznosti $10^{6,6}$ Pa.s.



Slika 4. Termični raztezki kovin in zlitin, uporabnih za spoje s steklom [1] (T_c - Curiejeva temp., t.j. temp. prehoda iz feromagnetnega v paramagnetno stanje)



Slika 5. a) Precej dobro usklajeni dilataciji za steklo in kovino omogočata spoj, b) Razlike v raztezkih med gradnikoma spoja [1]

Pri termičnih raztezkih kovin in stekel ne primerjamo le posameznih vrednosti, ampak celotno dilatacijsko karakteristiko. Do upogibne točke T (transformacijska temp.) je raztezek stekel linearno odvisen od temperature (sliki 2 in 3).

Pri višjih temperaturah raztezek narašča hitreje. Pri čistih kovinah razteznost s temperaturo linearno narašča, pri nekaterih zlitinah je do upogibne točke linearen (T_c Curiejeva temp.), nad njo pa narašča hitreje (slika 4).

Potek razlike med raztezki kovine in stekla najbolje predstavimo s krivuljami (slika 5), ki jih dobimo iz dilatacijskih. Različen potek raztezkov povzroča napetosti in njihovo prehajanje iz tlačnih v natezne med ohlajanjem od temperature spajanja na sobno temperaturo; za steklo je najbolje, da je ves čas tlačno obremenjeno.

4 Kontrola ohlajanja, popuščanje

Hitrost ohlajanja zelo vpliva na trdnost spoja stekla s kovino. Pri visokih temperaturah relativno nizka viskoznost stekla ne omogoča razvoja napetosti. Pri hlajenju viskoznost močno naraste in ne more priti do izravnanja napetosti, nastalih zaradi razlik v skrčkih posameznih delov. Posledica so napetosti, ki med ohlajanjem spremenijo vrsto in velikost. Take prehodne napetosti so lahko velike, vendar ne smejo presegati meje, pri kateri steklo počni ali pa popusti vez med steklom in kovino. Končne napetosti v spoju morajo biti tlačne in čim manjše.

tip stekla	debelina (mm)	t* (min)	hitrosti hlajenja
trda stekla	< 3	10	od 600°C max. 15°C/min (za perfektno popuščanje 1°C/min.)
	3-12	10-20	3°C/min do 300°C, nato naravno hlajenje
mehka stekla	< 2	10	od 500°C 10 - 15°C/min
	2-10	10-20	3°C/min do 250°C, nato naravno hlajenje

* zadrževalni čas pri temperaturi popuščanja

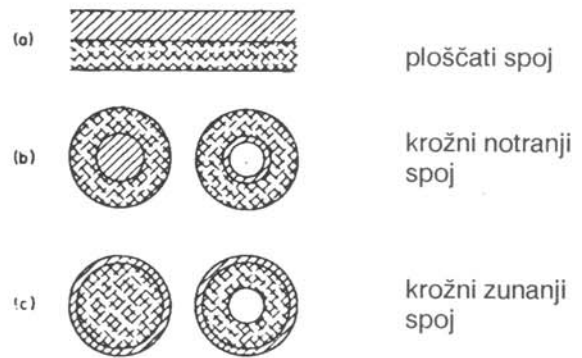
Mehka stekla:
soda-apno-silikatna stekla
Pb-alkalno-silikatna stekla

Trda stekla:
Al-borosilikatna
borosilikatna /5/

5 Oblike spojev

Oblika lahko odločilno vpliva na lastnosti spoja. Osnovne geometrijske oblike so: a) ploščati spoj, b) krožni notranji spoj, c) krožni zunanji spoj (slika 6). Celoten spoj je sestavljen iz enega ali več takih elementov.

Pri ploščatem spoju (a) je kontaktna površina med steklom in kovino ravnina. Notranji spoj (b) ima kovino znotraj stekla, zunanji (c) pa zunaj.



Slika 6. Osnovne oblike spojev stekla s kovino /1/

6 Izdelava spoja

Postopki pri izdelavi spoja steklo-kovina obsegajo:

- pripravo kovinskih delov (oblikovanje, čiščenje, razplinjevanje, oksidacija)
- pripravo steklenih delov (rezanje, oblikovanje, čiščenje)
- spajanje kovine s steklom
- dokončanje spoja (čiščenje).

Material za kovinske dele oblikujemo in končno mehansko (peskanje) ter kemično obdelamo površino. Kovinske dele razplinimo v vakuumu ali v vodiku, da spoj ne vsebuje mehurčkov.

Da bi dobili močno vez in tesen spoj, mora največ kovin imeti oksidirano površino. V ta namen kovinske dele segrejemo v plamenu gorilnika, v peči ali z električnim gretjem. Temperaturo, čase segrevanja in atmosfero izberemo za vsak primer posebej.

Koristno je, če spoj izdelamo v dveh stopnjah: najprej oksidiramo kovino, nato pa naredimo spoj. To storimo posebno pri kovinah, kjer je hitrost oksidacije kritična in jo težko kontroliramo.

Da bi se izognili vključkom v spoju, moramo steklene dele pred spajanjem zadovoljivo očistiti. Ostanke anorganskih materialov na steklu ne zgorijo v plamenu, ampak ostanejo vgrajeni v njem. To lahko povzroči lokalne napetosti v spoju.

Za segrevanje kovinskih in steklenih delov med spajanjem, predgretjem in popuščanjem uporabljamo plamenske ali električne postopke.

Plamenske tehnike uporabljamo pri ročno izdelanih spojih in pri spojih z visoko stopnjo avtomatizacije pri obdelavi. Električno uporabno gretje lahko uporabljamo le v primerih, kjer oblika kovine omogoča enakomerno gretje. Uporabljamo tudi indukcijsko gretje, pri katerem kovinski del segreje tudi steklo. Ko postane mehko, se oblikuje s pihanjem, centrifugalno ali z gravitacijo.

7 Neuskklajeni spoji

Pri spajanju kovin in stekel, ki imajo preveč različne raztezne koeficiente za kvaliteten usklajen spoj, lahko uporabimo specialne tehnike. Napetosti, ki se razvijejo v ekspanzijsko neuskklajenih spojih, zmanjšamo bodisi z deformacijo (elastično ali plastično) kovine ali pa tako, da so vse nastale napetosti v steklu tlačne (kompresijske). Prva vrsta spojev so Housekeeperjevi, druga pa tlačni.

7.1 Housekeeperjevi spoji

Naredimo jih lahko s katerokoli vrsto stekla, če le materiali ustrezajo naslednjim pogojem:

1. Raztezek kovinskega dela mora biti večji od razteška stekla, kar omogoča tlačne napetosti na površino steklo-kovina.
2. Kovina mora biti dovolj mehka in tanka, da se lahko plastično deformira in tako sledi dimenzijskim spremembam med ohlajanjem spoja.
3. Kovina mora tvoriti močno vez s steklom.
4. Oblika in dimenzije spoja morajo biti zasnovane tako, da zagotavljajo veliko kontaktno površino med kovino in steklom. Izogibati se moramo nateznim napetostim v kateremkoli delu spoja.

Kovine, ki ustrezajo tem pogojem so baker, platina, jeklo in molibden.

7.2 Tlačni spoji stekla s kovinami

Slabo ujemanje med raztezkoma stekla in kovine lahko v nekaterih primerih premostimo z oblikovanjem spoja, ki na steklo deluje samo s tlačnimi silami. Različni tlačni spoji so predstavljeni na sliki 7.

Poznamo naslednje kombinacije tlačnih spojev stekla s kovino /2/:

1. Temperaturni raztezni koeficient α_1 zunanega kovinskega obroča ali dela ohišja je enak koeficientu stekla α_2 (ta dva tvorita usklajen spoj) in je večji od koeficienta prevodnice α_3 :

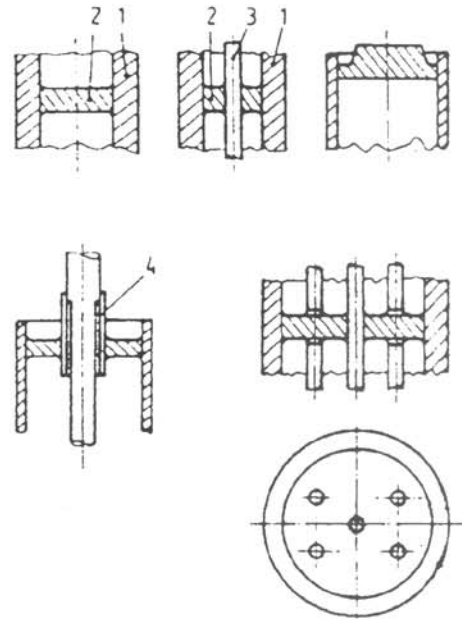
$$\alpha_1 = \alpha_2 > \alpha_3$$

2. Temperaturni raztezni koeficient zunanega kovinskega obroča ali dela ohišja α_1 je večji od koeficienta stekla α_2 , ki pa je enak koeficientu prevodnice α_3 . Prevodnica in steklo tvorita usklajen spoj:

$$\alpha_1 > \alpha_2 = \alpha_3$$

3. Temperaturni raztezni koeficient obroča ali ohišja α_1 je enak koeficientu prevodnice α_3 , vendar večji od koeficienta stekla α_2 :

$$\alpha_1 = \alpha_3 > \alpha_2$$



Slika 7. Shematski prikaz različnih oblik tlačnih spojev (1 - zunanji kovinski obroč, 2 - steklo, 3 - prevodnica, 4 - kovinska cev) /2/

Tehnologijo izdelave tlačnih spojev stekla s kovino smo pri razvoju in proizvodnji subminiaturnih hermetičnih relejev, tenziometrov in prevodnic osvojili tudi na IEVT. Taki spoji so mehansko odporni. Prenesejo velike tokovne obremenitve in temperaturne šoke, vendar le, kadar je temperaturna obremenitev usmerjena od prevodnice navzven. Kadar ta pogoj ni izpolnjen, se pojavijo razpoke ob prevodnici in pride do porušitve spoja.

8 Sklep

Spoji stekla s kovino so ena od možnosti za permanentno spajanje komponent v vakuumski tehniki. Pri izdelavi takega spoja moramo med drugim upoštevati stopnjo usklajenosti toplotnih raztezkov obeh gradnikov. Glede na to razlikujemo usklajene in neuskklajene spoje. Poskrbeti moramo za primerno popuščanje in obliko spojev.

9 Literatura

- /1/ A. Roth, Vacuum Sealing Techniques, Pergamon Press, Oxford, 1966
- /2/ M. Jenko, Zbornik predavanj simpozija o elektronskih sestavnih delih na materialih, SD-86, Otočec 1986, 327-330
- /3/ W. D. Kingery, Introduction to Ceramics, John Wiley and Sons, New York, London, Sidney, 1967, 572-573
- /4/ Zbornik predavanj: Osnove vakuumske tehnike, urednik dr. J. Gasperič, založilo DVTS, Ljubljana 1984
- /5/ W. H. Kohl, Handbook of Materials and Techniques for Vacuum Devices, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1967, 10

IZVIRI ATOMARNEGA VODIKA

Miran Mozetič, Miha Kveder, Andrej Pregelj in Matjaž Drobnič*,
 Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61000 Ljubljana,
 *Inštitut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61000 Ljubljana

Atomic hydrogen sources

Abstract

Recently developed atomic hydrogen sources based on electron impact dissociation of molecular hydrogen are described. A source is a cylindrical vessel made of glass with a low recombination coefficient. Free electrons are produced and accelerated by an inductively coupled RF generator with the maximum output power of 700 W. The degree of the dissociation of hydrogen molecules and the flow of hydrogen atoms at the output throttle of the source are controlled by the effective pumping speed, the input flow of molecular hydrogen, and the output power of the RF generator. The flow of atomic hydrogen is measured with catalytic probes. The flow up to 10^{19} atoms per second was obtained.

Povzetek

Opisujemo izvire atomarnega vodika, ki temeljijo na disociaciji molekul vodika pri trkih z elektroni. Izvir je cev, narejena iz stekla z nizkim rekombinacijskim koeficientom. Proste elektrone produciramo in pospešimo z induktivno vezanim RF generatorjem z maksimalno izhodno močjo 700 W. Stopnjo disociiranosti in pretok atomarnega vodika na izhodu izvira kontroliramo z učinkovito črpalno hitrostjo, vpustom molekularnega vodika in izhodno močjo RF generatorja. Pretok atomarnega vodika merimo s katalitičnimi sondami. Dosegli smo pretoke do 10^{19} atomov na sekundo.

1 UVOD

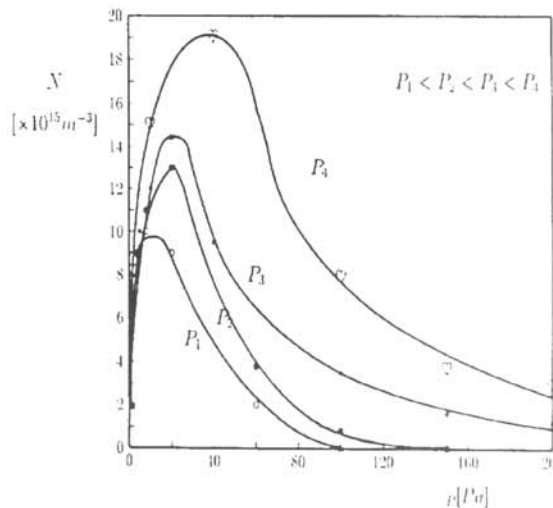
Pri sodobnih vakuumskih tehnologijah se pogosto srečamo z izviri najrazličnejših delcev, ki jih uporabljamo za obdelavo površin. Delci so lahko nabiti ali električno nevtralni, počasni (termični) ali hitri (pospešeni), lahki ali težki. Edina skupna lastnost teh delcev je, da jih težko pridobimo proste v zadostnih koncentracijah. Pričujoči članek na kratko opiše izvire atomarnega vodika, ki smo jih razvili na IEVT.

2 VODIKOVA PLAZMA

Za izvire delcev se po večini uporablja plazma. Vrsta plinske mešanice in način vzbujanja plazme sta odvisna od specifičnih potreb. Za izvir atomarnega vodika smo vzeli RF vodikovo plazmo. V stekleno komoro premera 4 cm vpuščamo vodik iz jeklenke. Okrog komore je ovita tuljava, ki je priključena na RF generator s frekvenco 27,12 MHz in največjo izhodno močjo 700 W. Moč, ki jo dovajamo plazmi, lahko razmeroma dobro kontroliramo s številom ovojev tuljave.

V razelektritveni komori dobimo šibko ionizirano vodikovo plazmo s temperaturo elektronov okoli $5 \cdot 10^4$ K (povprečna kinetična energija reda nekaj eV). Gostota plazme je odvisna predvsem od tlaka plina in izhodne moči RF generatorja. Parametre plazme merimo z dvojno električno sondo /1/. Slika 1 prikazuje odvisnost gostote plazme od tlaka pri različni moči RF generatorja.

Opazimo, da je gostota plazme razmeroma majhna, največ $10^{16}/m^3$, kar prinese stopnjo ioniziranosti (razmerje med gostoto ionov in gostoto nevtralnih delcev) reda 10^{-6} . Takšna plazma zanesljivo ni najboljša za izvir nabitih delcev, je pa izredno primerna za izvir nevtralnih atomov vodika. Gostota atomov vodika v takšni plazmi je namreč bistveno večja od gostote ionov. Tako smo dosegli stopnjo disociiranosti (razmerje med gostoto atomov in gostoto vseh delcev) 60% in to v razmeroma širokem območju tlakov /2/.



Slika 1. Gostota plazme v izviru atomarnega vodika.

Poskusimo razložiti visoko stopnjo disociiranosti v tako redki plazmi. Tabela 1 prikazuje nekatere procese, ki potekajo v vodikovi plazmi pri trkih elektronov s težkimi delci. Energijski prag za disociacijo je 8.5 eV, za ionizacijo atoma vodika pa 13.6 eV. Razlika je razmeroma majhna. Tudi ob upoštevanju dejstva, da je visokoenergijski "rep" elektronske porazdelitve v plazmi eksponenten, bi pričakovali razmerje med stopnjo disociiranosti in stopnjo ioniziranosti kvečjemu 10^2 , nikakor pa ne 10^5 ali 10^6 , kot jo dejansko izmerimo. Za ravnovesno koncentracijo delcev v nizkotlačni plazmi je namreč zelo pomembna rekombinacija delcev na površini komore, v kateri plazmo generiramo. Kakršnakoli površina že je, med plazmo in steno posode je vedno padec potenciala (ki skrbi za to, da je gostota toka elektronov na steno enaka gostoti toka pozitivnih ionov), ali z drugimi besedami, na površini je vedno dovolj elektronov, ki čakajo na rekombinacijo s pozitivni ioni.

Prispevek je bil predstavljen na 1. srečanju vakuumistov Slovenije in Hrvaške v Zagrebu.

Tabela 1. Nekatere reakcije v vodikovi plazmi /3/

reakcija	energ. prag [eV]	maks. presek [10^{-16}cm^2]
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2^+ + 2e$	15.4	1.1
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{H} + 2e$	18.0	0.005
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{H}^+ + 3e$	46	0.005
$\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{H} + e$	12.4	3-16
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H} + \text{H} + e$	8.5	0.6
$\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}$	0	100
$\text{H} + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e$	13.6	0.65
$\text{H} + e \rightarrow \text{H}^* (2P) + e$	10.2	0.7
$\text{H}^* + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e$	3.3	15
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2^* + e$	10.3	0.2

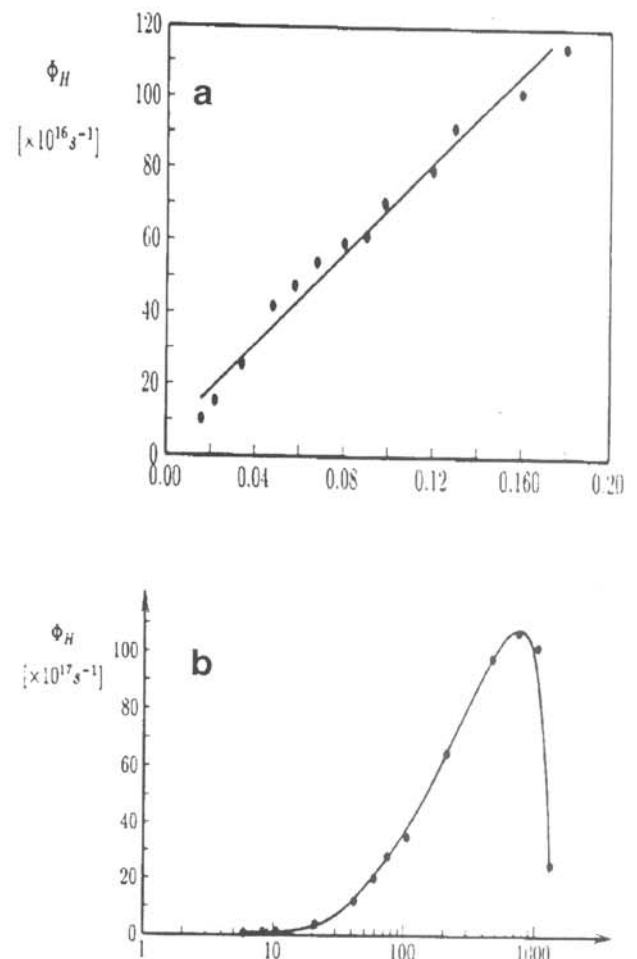
Atom vodika se rekombinira na steni z drugim atomom vodika. Pri tem pa je koncentracija atomov vodika na steni bistveno odvisna od vrste površine. Na površinah materialov, ki kemisorbirajo vodik, imamo v plazmi vedno (pre)nasičeno koncentracijo atomov vodika. Atomi, ki priletijo na takšno površino, se zato na njej z veliko verjetnostjo rekombinirajo. Nasprotno je rekombinacija na površinah materialov, ki ne kemisorbirajo vodika (stekla, keramike in večina kovinskih oksidov), malo verjeten proces, saj morata ob istem času na majhno površino pasti dva atoma vodika, da pride do rekombinacije. Izguba atomov vodika na stenah je torej močno odvisna od vrste materiala. Zaradi tega lahko v steklenih komorah pridobimo visoke koncentracije atomarnega vodika kljub razmeroma majhni gostoti plazme.

Na tem mestu takoj omenimo še to, da pri višjih tlakih vedno bolj prihajajo do izraza rekombinacije v plinu (trki tretjega reda). Zato v splošnem razmerje med stopnjo disociiranosti in stopnjo ioniziranosti z naraščajočim tlakom pada.

3 KARAKTERIZACIJA IZVIROV

Nizkotlačna šibko ionizirana RF plazma je torej primeren medij za razcep molekul vodika. S primernim pretokom plina skozi razelektrivno komoro nam lahko rabi kot izvir atomarnega vodika. Nabite delce, ki prav tako nastajajo v plazmi, so pa pri izviru nezaželeni, nevtraliziramo na izhodu razelektrivne komore. Iz komore dobimo tok atomarnega vodika, ki je odvisen od učinkovite črpalne hitrosti na ustju komore, prevodnosti dozirnega ventila in izhodne moči RF generatorja. Pretok atomarnega vodika merimo s katalitičnimi sondami. Slika 2 predstavlja rezultat meritev pretoka v dveh vakuumskih sistemih. V obeh primerih podajamo odvisnost pretoka atomarnega vodika od tlaka v komori, v kateri se nahaja katalitična sonda. V primeru (a) je bila učinkovita črpal-

na hitrost na ustju razelektrivne komore 60 l/s (sistem črpamo z difuzijsko črpalno), v drugem primeru (slika 2(b)) pa 2.2 l/s (sistem črpamo z rotacijsko črpalno).



Slika 2. Pretok atomov vodika iz dveh različnih izvirov

4 SKLEP

Opisali smo osnovne značilnosti RF vodikove plazme in razložili, kako jo lahko uporabimo kot stabilen izvir atomarnega vodika. Izdelali smo nekaj takšnih izvirov, ki so sedaj pripravljene za nadaljnjo rabo, npr. študij redukcije tankih plasti kovinskih oksidov ali kontrolirano vodičenje kovin.

5 LITERATURA

- 1/ J. D. Swift and M. J. R. Schwar, *Electrical Probes for Plasma Diagnostics*, Iliffe Books Ltd., London (1970)
- 2/ F. Breclj, M. Mozetič, M. Drobnič, K. Zupan and M. Murko-Jezovšek, *Vacuum*, 44 (1993) 459
- 3/ C. C. Goodyear and A. von Engel, *Proc. Phys. Soc.* 79 (1962), 732

POVRŠINSKA DIFUZIJA ATOMARNEGA VODIKA

Miha Kveder, Miran Mozetič, France Breclj in Matija Drobnič*,
 Institut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61000 Ljubljana,
 *Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61000 Ljubljana

SURFACE DIFFUSION OF ATOMIC HYDROGEN

Abstract

The use of hydrogen for discharge cleaning of metal surfaces has one important disadvantage. This is adsorption of atomic hydrogen on surfaces and subsequent surface diffusion, which causes a contamination of already clean surfaces. Adsorbed hydrogen changes electric and magnetic properties of some metals. That is why we have decided to take a closer look at the surface diffusion of adsorbed hydrogen atoms. For the evaluation of the diffusion rate we used a simple model. An infinite metal surface is divided into two parts. The first one is completely clean of atomic hydrogen, on the other there is known uniform initial concentration of adsorbed hydrogen atoms. Our simple model calculations expressed strong dependence of the diffusion rate on the temperature of the surface. The results for atomic hydrogen on copper surface showed that the rate of diffusion at the temperature 600 K is about 500 times larger than that at the temperature 300 K.

Povzetek

V zadnjih letih se v svetu vse bolj uveljavlja metoda obdelave kovinskih površin z vodikovo plazmo. Z atomarnim vodikom namreč uspešno odstranjujemo s površin kovin razne nečistoče, predvsem kovinske okside. Vendar po takšni obdelavi ostane na površini plast adsorbiranega vodika, ki se lahko difuzijsko prenese na prej čiste dele površin. Prav zato smo se odločili za študij hitrosti površinske difuzije adsorbiranih atomov vodika. Za izračun smo uporabili naslednji model: kovinska površina je neskončna in razdeljena na dve polravnini, od katerih je ena na začetku povsem čista, na drugi pa je neka znana začetna koncentracija adsorbiranih atomov. Izračun je pokazal, da je hitrost površinske difuzije najbolj odvisna od temperature površine. Rezultati za difuzijo adsorbiranega atomarnega vodika na bakreni površini kažejo, da je difuzija pri temperaturi 600 K približno tisočkrat hitrejša od tiste pri temperaturi 300 K.

1 Uvod

Adsorpcija vodika na kovinski površini je pomemben pojav v celi vrsti tehnoloških procesov. Adsorbirani vodik igra odločilno vlogo v mnogih katalitskih procesih, v metalurgiji je poznan kot povzročitelj krhkosti jekla (embrittlement of steel), v fuzijski tehnologiji pa povzroča probleme adsorbiran na notranjih površinah v tokamakih. Prav tako površinsko adsorbirani vodik spremeni električne in magnetne lastnosti kovin, npr. PdH je superprevodnik, medtem ko čisti paladij ni.

Prav zaradi teh neprijetnosti so naredili že vrsto študij o adsorbiranem vodikom na kovinskih površinah. Dobro so teoretično in eksperimentalno obdelana področja vezi kovina-vodik, nihajna stanja adsorbiranega vodika, rekonstrukcija površine zaradi adsorpcije, statistična mehanika različnih površinskih faz, akomodacija in desorpcija vodika na kovinski površini. V zadnjem času je bilo objavljenih tudi precej člankov in študij /1, 2, 3, 4, 5/ o površinski gibljivosti adsorbiranega vodika oz. o površinski difuziji. Le-ta pride do izraza na kovinskih površinah, ki mejijo na vakuum,

posebno, če so bile očiščene z atomarnim vodikom. Po obdelavi ostane na površini kovine tanka plast adsorbiranega vodika, ki se difuzijsko lahko prenese na povsem čiste dele kovinskih površin. To lahko povzroči že omenjene spremembe lastnosti kovin, v primeru bombardiranja površine z energijskimi delci pa tudi desorpcijo in povečanje tlaka v vakuumskem sistemu.

2 Difuzijski koeficient

Do adsorpcije molekul ali atomov na kovinski površini pride zaradi privlačnega interakcijskega potenciala med površino in delci plina. Ta je zaradi periodičnosti atomov v kristalni mreži podlage periodičen. Atomi plina, ki se na površini ujamejo v eno od jam tega potenciala, v njej niso stalno vezani. Lahko preskakujejo od ene do sosednje potencialne jame, oz. difundirajo po površini.

Vrednost difuzijskega koeficienta za površinsko difuzijo je /5/:

$$D = k \frac{l^2}{4}, \quad (1)$$

kjer je l razdalja med dvema sosednjima mestoma ve-

zave adsorbiranega atoma in $k = \frac{g\omega_a}{2\pi} \exp\left(-\frac{E_a^{ef}}{k_B T}\right)$

konstanta, ki določa število prehodov preko potencialne bariere na enoto časa. V izrazu za k je ω_a nihajna frekvenca adsorbiranega atoma v vezanem stanju, g število izhodnih kanalov na danem mestu vezave (= 4 za fcc (100) mrežo), T temperatura površine, k_B Boltzmannova konstanta in E_a^{ef} efektivna aktivacijska energija, potrebna za prehod atoma z enega na sosednje mesto vezave. V tej efektivni aktivacijski energiji je že upoštevan efektivni kvantnomehanski periodični potencial, ki ga čuti difundirajoči atom.

Ko vstavimo izraz za k v enačbo (1), dobimo naslednji izraz za odvisnost difuzijskega koeficienta od temperature:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a^{ef}}{k_B T}}. \quad (2)$$

Na takšen način izračunani difuzijski koeficienti se dobro ujemajo z izmerjenimi za vodikove atome na bakreni površini (fcc mreža, (100) mrežna ravnina) /4, 5/. Zato smo te podatke uporabili tudi v našem izračunu hitrosti površinske difuzije vodika na bakru.

3 Izračun

Pri površinski difuziji nas zanima predvsem časovni potek tega procesa. Kako hitro se na površini kovine spreminja koncentracija adsorbiranih atomov ali kako daleč difundira znaten del adsorbiranih atomov v določenem času, izračunamo iz splošne difuzijske enačbe.

Ker nam gre za časovni potek površinske difuzije, uporabimo splošno difuzijsko enačbo na neskončni ravnini. Tako nam ni treba iskati robnih pogojev in je za točno rešitev potreben le ustrezen začetni pogoj. Da je slika dogajanja pri površinski difuziji jasna, privzamemo naslednji, idealizirani začetni pogoj oz. začetno porazdelitev adsorbiranih atomov: začetna koncentracija n_0 je enaka in enakomerna po vsej polravnini $x < 0$ ter enaka nič na polravnini $x \geq 0$. Tak začetni pogoj je ugoden tudi zato, ker postane difuzijska enačba enodimenzionalna, odvisna le od spremenljivke x :

$$D \frac{\partial^2 n}{\partial^2 x} = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (3)$$

Tu je D koeficient površinske difuzije in n koncentracija adsorbiranih atomov.

Rešitve enačbe (3) nastavimo v obliki

$$n = \sum u_i(x) \exp(-k_i^2 Dt).$$

Ta nastavek vstavimo v enačbo (3) in dobimo: $D \sum u_i''(x) \exp(-k_i^2 Dt) = -\sum u_i(x) D k_i^2 \exp(-k_i^2 Dt)$. Po krajšanju in prenosu členov prek enačaja nam ostane amplitudna enačba $u_i''(x) + k_i^2 u_i(x) = 0$, katere splošna rešitev je $u_i(x) = A_i \cos(k_i x) + B_i \sin(k_i x)$ /6/. Ker nimamo robnih pogojev, ki bi določili diskretne vrednosti konstante k_i , privzamemo, da se k zvezno spreminja od 0 do neskončno in vsota v nastavku za reševanje difuzijske enačbe preide v integral:

$$n(x,t) = \int_{-\infty}^{\infty} [A(k) \cos(kx) + B(k) \sin(kx)] e^{-k^2 Dt} dk \quad (4)$$

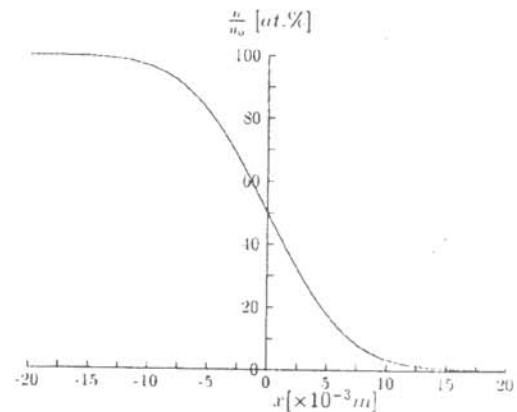
Za določitev konstant $A(k)$, $B(k)$ in k uporabimo prej opisani začetni pogoj, ki ga matematično opišemo z Heavyside-ovo funkcijo:

$$n(x,t=0) = n_0 [1 - H(x)] = n_0 f(x) \quad (5)$$

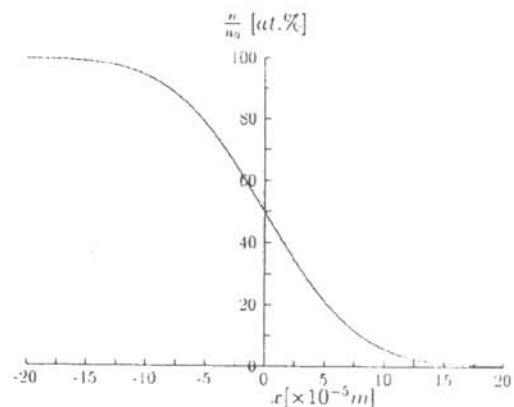
V tej enačbi je $H(x)$ Heavyside-ova funkcija oz. $f(x)$ funkcija, ki opisuje začetno porazdelitev. Od tu dalje iskanje končne rešitve zahteva mnogo integriranja in uvajanja novih spremenljivk. Zato tu zapišimo le končni rezultat:

$$\begin{aligned} n(x > 0, t) &= n_0 - n_0 \left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right) \right] = \\ &= n_0 \left[\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Funkcija $\Phi\left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right)$ je znana "error function" in je tabelirana v več knjigah /6/. Tako lahko rešitve za dani difuzijski koeficient D na poljubnem kraju $x > 0$ in času t poiščemo v tabelah. Ker nas zanima časovni potek površinske difuzije in ker ne poznamo začetne površinske gostote adsorbiranih atomov n_0 , raje računamo z razmerjem trenutne gostote z začetno, ki nam lepo opiše večanje koncentracije atomarnega vodika pri $x > 0$.



Slika 1. Profil površinske koncentracije atomov vodika na fazni meji po času 10^5 sekund, temperatura 300 K, difuzijski koeficient $1,95 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$.



Slika 2. Profil površinske koncentracije atomov vodika na fazni meji po času 10^5 sekund, temperatura 600 K, difuzijski koeficient $1,45 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

4 Numerični rezultati

Na slikah 1. in 2. so upodobljeni po enačbi (6) računalniško izračunani rezultati za potek površinske difuzije. Narisana je krajevna odvisnost površinske gostote vodikovih atomov po določenem času. Izračun za sliko 1 je bil narejen za difuzijski koeficient $1,95 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ pri temperaturi 300 K /5/ in za razmerje trenutne proti začetni površinski gostoti $n(x > 0, t) / n_0$. Enak

izračun je bil opravljen za sliko 2, kjer smo uporabili difuzijski koeficient $1,45 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pri temperaturi 600 K/5/.

Rezultati kažejo, da je hitrost difuzije močno odvisna od temperature površine. Pri temperaturi 600 K je kar tisočkrat večja kot pri 300 K. Glede na preprostost uporabljenega modela in neupoštevanje odvisnosti difuzijskega koeficienta od površinske koncentracije adsorbiranega vodika lahko rečemo, da je površinska difuzija hitra in znatna.

Zaradi temperaturne odvisnosti koeficienta površinske difuzije (2) lahko napovemo še mnogo hitrejšo difuzijo pri močno povečanih temperaturah (nad 600 K). Pri

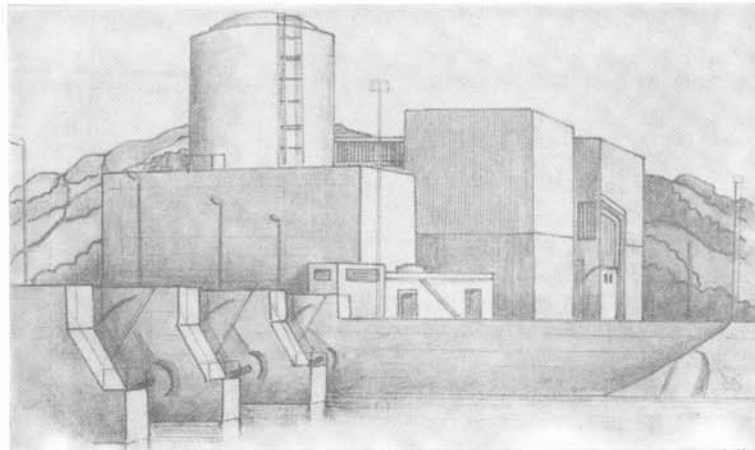
nižjih temperaturah (pod 300 K) koeficient D hitro pada, zato je onesnaževanje površine z adsorbiranimi atomi zelo počasno in skoraj zanemarljivo za čase do nekaj let.

5 Literatura

- /1/ J. C. Tully, G. H. Gilmer, M. Shugard, J. Chem. Phys. 71 (1979), 1630.
- /2/ G. Wahnstroem, J. Chem. Phys. 89 (1988), 6996.
- /3/ S. Efrima, H. Metiu, J. Chem. Phys. 69 (1978), 2286.
- /4/ J. G. Lauderdale, D. G. Truhlar, Surf. Sci. 164 (1985), 558.
- /5/ S. M. Valone, A. F. Voter, J. D. Doll, Surf. Sci. 155 (1985) 687.
- /6/ Ivan Vidav, Višja matematika II, DZS, 2. izdaja 1979.



nuklearna elektrarna krško, p. o.
 vrbina 12
 68270 krško
 slovenija
 telefon: 0608 21 621
 telefax: 0608 21 528
 telegram: 35748 nuelkr si



Nuklearna elektrarna Krško je opremljena z Westinghousovim lahkovodnim tlačnim reaktorjem (PWR) toplotne moči 1880 MW. Njena projektirana moč na generatorju je 664 MW.

V desetih letih komercialnega obratovanja je elektrarna oddala v omrežje več kot 41 TWh električne energije.

Varno in zanesljivo obratovanje elektrarne ostaja temeljni cilj NE Krško.

I-V KARAKTERISTIKE Ag/n-Si(111) SCHOTTKY-JEVE BARIERE NANESENE PO METODI CURKA IONIZIRANIH SKUPKOV, CIS

Bruno Cviki*, Tomo Mrdjen, Matjaž Koželj in Miran Kramberger**,

Institut "J. Stefan", Univerza v Ljubljani, Jamova 39, 61000 Ljubljana, Slovenija

*Tehniška fakulteta, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 62000 Maribor, Slovenija

** Iskra SEMICON, d.d., Gabrsko 12, 61320 Trbovlje, Slovenija

I-V characteristics of the Ag/n-Si(111) Schottky barrier deposited by the ionized cluster beam method, IBC

Abstract

An expression for the current density of tunneling electrons at the metal-semiconductor contact, i.e. in the reverse direction of an I-V Schottky diode characteristic has been derived. The derivation is based upon the assumption that the ionized donors charge density is a linear decreasing function of the distance from the semiconductor surface, the depth denoted by x_1 whereafter remains constant throughout the depleted region. The parameter x_1 is defined as an effective range of the ionized metal donors within the interior of the semiconductor and depends upon the particular metal deposition method. The results of the derivation offer the basis for the understanding the reverse current I-V characteristics of the Ag/n-Si(111) Schottky diodes deposited by the ionized cluster beam, IBC, deposition method.

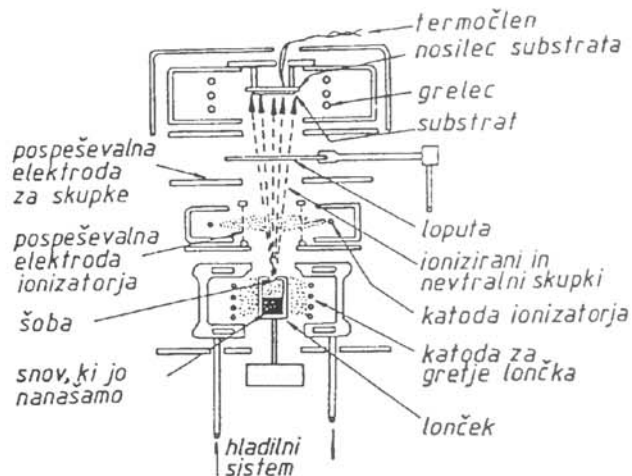
Povzetek

Izpeljan je izraz za gostoto toka elektronov za primer tuneliranja elektronov ob stiku kovina/polprevodnik, to je v zaporni smeri I-V karakteristike Schottkyjevih diod. Izpeljava temelji na predpostavki, da pojem gostota negibljivih enkrat ioniziranih nosilcev naboja linearno do globine x_1 , nakar je do konca osiromašenega področja konstantna. Parameter x_1 je definiran kot efektivni doseg ionov kovine v notranjost polprevodnika in je odvisen od metode njenega nanašanja. Rezultati izračuna podajajo kvantitativno osnovo za razumevanje zaporne I-V karakteristike po metodi curka ioniziranih skupkov CIS nanosenih Ag/n-Si(111) Schottkyjevih diod.

1 UVOD

Dobro je poznano dejstvo [1,2], da je mogoče z metodo curka ioniziranih skupkov, CIS (slika 1), dobiti visokokvalitetne tanke plasti raznovrstnih snovi, kot so n.pr.: kovine, polprevodniki, termo-električni materiali, dielektriki, magnetni materiali in celo nekatere organske spojine. Postopek nanašanja tankih plasti poteka za vse omenjene snovi enako in ga je moč strniti na naslednji način: adiabatna ekspanzija, skozi ustrezno šobo v talilnem lončku uparjene snovi v območje visokega ali ultravisokega vakuumu, vodi do nastanka skupkov taljenca, to je grozdov nekaj sto ali tisoč med seboj spojenih atomov ali molekul. Le-ti na poti na ustrezno izbrano podlago potujejo najprej skozi ionizator, kjer so podvrženi prhanju z elektroni. V odvisnosti od eksperimentalnih pogojev se do približno 35% skupkov ionizira in le-te je nato pred samim vpadom na podlago moč pospešiti v statičnem električnem polju ter tako vplivati na njihovo translacijsko kinetično energijo. Poudariti gre, da k rasti tanke plasti, to je pojavu, ki je sicer še neraziskan, prispevajo

tako ionizirani kot nevtralni skupki, pri čemer obstajajo indicacije, da h kvaliteti po tej metodi nanosenih tankih plasti odločilno doprinaša predvsem ionizacija samih skupkov. Raznovrstni pojavi, ki nastopijo ob trku skupkov s površino podlage, so opisani v [1/ in [3/]. Med slednjimi so posebej svojevrstni in za področje praktične uporabe zlasti zanimivi tisti pojavi, ki nastopijo na vmesni plasti tedaj, ko se z metodo CIS (v odvisnosti od eksperimentalnih parametrov - pospeševalne napetosti U_a in toka ionizacije skupkov I_a) nanaša kovino na podlago izbranega polprevodnika. Tako dobljena sestava izkazuje večinoma usmereniške karakteristike in se imenuje Schottkyjeva dioda. Pod ustrezno eksperimentalno izbranimi pogoji nanaša lahko omenjeno usmereniško vedenje zamenja linearna tokovna I-V karakteristika, kar pomeni, da se sestava tokrat preobrazi v navadni (omski) upor. Pogoji nanosa in značilnosti izmerjenih odvisnosti tovrstnih I-V krivulj, slika 2, Ag/n-Si(111) Schottky-jevih diod, nanosenih po metodi CIS, so podrobneje opisani v [2/.

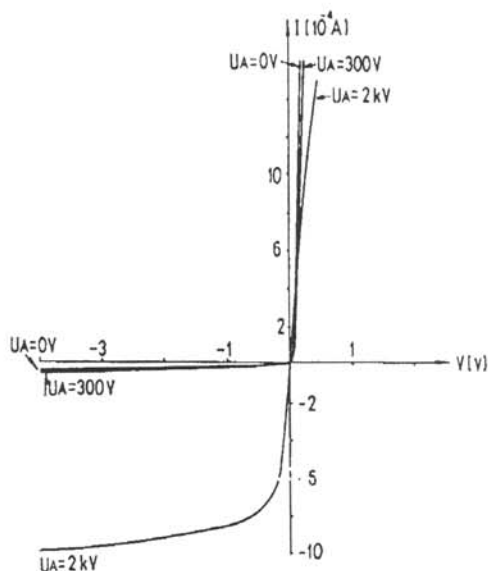


Slika 1. Shema vakuumskega sistema za nanašanje tankih plasti po metodi curka ioniziranih skupkov.

Pričujoči članek obravnava t.im. zaporno karakteristiko omenjenih diod za primer prve, v [2/ razdelane hipoteze, po kateri bi naj bila izrazita sprememba I-V v soodvisnosti (za različne vrednosti pospeševalne na-

petosti U_a ioniziranih skupkov), ki se predvsem odraža v njenem zapornem delu, posledica spremembe koncentracije Ag mikrodolcev v globino silicijeve rezine. V skladu s hipotezo predpostavimo tedaj, da je koncentracija Ag atomov funkcija njihovega povprečnega dosega (l_e -ta pa je odvisen od pospeševalne napetosti U_a), ki ga je moč dovolj dobro oceniti s standardnimi izračuni /4/. Srebrovi ioni s Si ne tvorijo silicidne spojine in zato je mogoče pričakovati, da lahko zapletena porazdelitev nehomogene prostorske koncentracije Ag^+ ionov v notranjosti Si rezine povzroči zožitve Schottkyjeve potencialne bariere in na takšen način vodi do povečane verjetnosti tuneliranja nosilcev nabojev (elektronov) skozi bariero.

V literaturi /5/ je poznano dejstvo, da se ionska implantacija dopantov Sb v rezino Si, pri čemer so dopanti umeščeni na določeni, od energije implantacije odvisni tanki planarni plasti, ki je vzporedna površini podlage, odraža v zožitvi (v zaporni smeri) Schottkyjeve potencialne bariere. Makroskopsko vzeto, se omenjeni pojav opiše kot navidezno zmanjšanje vrednosti višine bariere in to je bilo tudi eksperimentalno potrjeno /5/. Pri tem pojavu gre za nastanek močno povečane električne poljske gostote v tanki plasti implantiranih Sb donorjev pod površino Si, ki povzroči, da se Ni/n-Si (na površino Si nanosena tanka plast Ni) Schottkyjeva potencialna bariera z rastočo energijo implantacije (in torej z globino implantirane plasti Sb) zmanjšuje za največ približno 30% njene prvotne vrednosti.



Slika 2. Izmerjeni I-V diagrami Schottky-jevih diod Ag/n-Si(111) pri različnih vrednostih pospeševalne napetosti U_a (0V, 300 V, 2000 V)

V našem primeru gre pa za drugačne pojave. Poudariti gre, da tu ni mogoče govoriti o klasični implantaciji donorjev drugačne kemijske sestave v notranjost Si podlage, marveč se (domnevno) spremeni - v splošnem zelo zapletena - globinska porazdelitev Ag

ionov /1,3/, ki jo spremlja ustrezna sprememba odvisnosti vedenja I-V krivulj. Sestavi Ag/n-Si(111) Schottkyjeve diode kažejo zaporni tok, ki je funkcija pospeševalne napetosti U_p , Ag ionov, za katerega je značilno dvoje:

- a) nastanek pregiba (nezveznost odvoda toka v zaporni smeri I-V krivulje) in
- b) pregib se z rastočo pospeševalno napetostjo oddaljuje od koordinatnega izhodišča I-V diagrama - zaporni tok z rastočo napetostjo U_p narašča, slika 2.

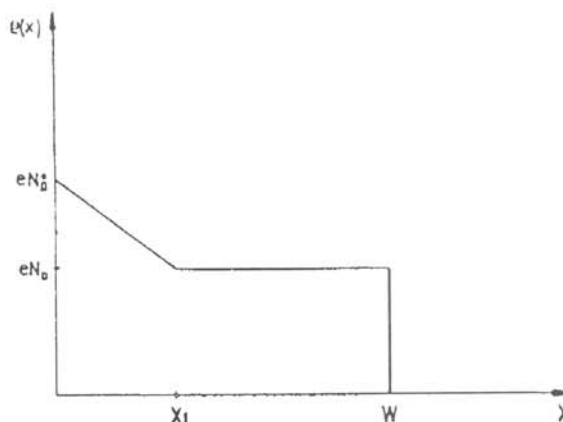
2 Ag/n-Si(111) SCHOTTKY-JEVA BARIERA PO METODI CIS

Augerjev spekter globinske sestave Ag/n-Si(111) Schottkyjeve diode za primer nanosa po metodi CIS, za vrednost $U_a = 600$ V in pa I-V diagram za različne vrednosti parametra pospeševalne napetosti ioniziranih Ag skupkov, slika 2, so prikazani v /2/. Za razliko od zgoraj opisanega eksperimenta /5/, doseženega z implantacijo ustreznih donorjev (t.j. Sb atomov) v rezino Si, v danem primeru: a) neposredno dodatno dopiranje ne nastopa in b) nehomogena koncentracija Ag atomov se po globini Si rezine spreminja in je v največji meri odvisna od vrednosti pospeševalne napetosti U_a .

V prvem približku je mogoče predpostaviti, da pojema koncentracija Ag atomov v rezini Si linearno z oddaljenostjo od površine in je na dani oddaljenosti homogena po celi plasti, ki je vzporedna površini podlage. Naj N_d označuje koncentracijo donorjev fosforja v rezini Si, N_{so} koncentracijo Ag ionov na površini, N_n pa koncentracijo vseh donorjev, ki se nahajajo v notranjosti rezine. V skladu s predpostavko velja (sl. 3):

$$N_n = (N_d - N_{so})x/x_1 + N_{so} \quad 0 \leq x \leq x_1 \quad (1)$$

$$N_n = N_d \quad x_1 \leq x \leq w$$



Slika 3. Gostota donorjev v notranjosti polprevodnika, zajeta v modelnem izračunu zaporne karakteristike Ag/n-Si(111) Schottkyjevih diod, nanosenih po metodi curka ioniziranih skupkov, CIS.

pri čemer pomeni označba w , kot je to običajno /6/, širino z elektroni osiromašenega področja polprevodnika, to je območja, kjer se nahaja presežni pozitivni naboj zaradi prisotnosti negibljivih, v kristalno mrežo vpetih ioniziranih donorjev. V izrazu (1), pomeni x_1 povprečni doseg Ag ionov v notranjost Si in je v največji meri odvisen od vrednosti pospeševalne napetosti ioniziranih skupkov U_a .

Gornji porazdelitvi presežnega naboja ustrezni vrednosti električnega potenciala V in odgovarjajoče električne poljske jakosti E se izračuna iz običajnega izraza $\text{div } D = r(x)$, ($D = \epsilon_s E$, $\epsilon_s = \epsilon \epsilon_0$ in $r(x) = eN_n$), zapisanega v eni razsežnosti. Pogoji, ki jim morata zadostiti oba iskana izraza, so:

$$V(x) = \begin{cases} V_1(x) & 0 \leq x \leq x_1 \\ V_2(x) & x_1 \leq x \leq w \\ V_s & w \leq x \end{cases}$$

pri čemer je V_s (= konstanta) vrednost električnega potenciala v notranjosti polprevodnika, daleč od površine. Zahtevamo, da sta tako potencial kot električna poljska gostota (normalna komponenta) v točki $x = x_1$ zvezna,

$$V_1(x_1) = V_2(x_1)$$

$$E_1(x < x_1) = E_2(x > x_1) \text{ za } x = x_1 \quad (2)$$

Potencial se tedaj lahko zapiše v obliki:

$$V_1(x) = -\frac{e(N_d - N_{so})}{2\epsilon_s} \left[\frac{x^3}{3x_1} + x_1x - \frac{x_1^2}{3} \right] + \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(wx - \frac{w^2}{2} \right) - \frac{eN_{so}}{2\epsilon_s} x^2 \quad 0 \leq x \leq x_1$$

$$V_2(x) = -\frac{eN_d}{2\epsilon_s} (x - w)^2 \quad x_1 \leq x \leq w \quad (3)$$

V zgornjih izrazih je privzeto, da je pozitivni naboj ioniziranih donorjev različnih kemijskih sestavin enak e . Odgovarjajoča vrednost električne poljske jakosti je tedaj podana z izrazoma:

$$E_1(x) = \frac{e}{\epsilon_s} \left\{ (N_d - N_{so}) \left(\frac{x^2}{2x_1} + \frac{x_1}{2} \right) - (N_d w - N_{so} x) \right\} \quad x \leq x \leq x_1$$

$$E_2(x) = \frac{e}{\epsilon_s} N_d (x - w) \quad x_1 \leq x \leq w$$

Gostoto zapornega toka, to je površinsko gostoto elektronov, ki teče iz kovine v polprevodnik, se izračuna s pomočjo propustnostnega koeficienta γ , izpeljanega v okviru WKB približka za primer kvantnomehanskega tuneliranja nosilcev naboja skozi potencialno bariero /7/. Propustnostni koeficient γ se za primer tuneliranja iz kovine v polprevodnik zapiše:

$$\gamma = \frac{2\pi}{h} \int_0^{x_2} [2m_0 (W_p - E_k)]^{1/2} dx \quad (4)$$

in gostota toka delcev skozi bariero je tedaj podana z izrazom,

$$J = J_v e^{-2\gamma} \quad (5)$$

V gornjih izrazih pomenijo W_p , E_k in J_v potencialno energijo elektronov, njihovo kinetično energijo ter gostoto vpadnega toka elektronov na mejo, m_0 maso elektrona in h Planckovo konstanto.

Lahko je pokazati, da se enačba (5) prevede na izračun v odvisnosti od pogojev a) $x_1 \leq x_2$ ali b) $x_1 \leq x_2$ naslednjega izraza za zaporni tok (t.j. tok v smeri kovina-polprevodnik), če le privzamemo za vpadno gostoto toka elektronov Maxwellsko porazdelitev:

$$J = \frac{4\pi k T m^* e}{h^3} \int_0^{q_b} e^{-E'/kT} e^{-(32\pi m^* q/h^2)^{1/2}} I(E', U) dE' \quad (6)$$

pri čemer je k Boltzmanova konstanta, T absolutna temperatura, q_b višina Schottkyjeve bariere, m^* efektivna masa elektrona v smeri $\langle 111 \rangle$ v siliciju in q naboj elektrona.

Funkcija $I(E', U)$ je definirana z izrazom:

a) $x_1 \leq x_2$ in $0 \leq x \leq x_2$

$$I(E', U) = \int_0^{x_1} \sqrt{V_1(x) + V_2(x_2)} dx + \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{V_2(x) + V_2(x_2)} dx \quad (7)$$

pri čemer je x_2 rešitev izraza (x_2 je definiran s pogojem $E_c(x_2) = E'$ in E_c je energija prevodnega pasu polprevodnika (slika 4),

$$V_2(x_2) = \xi - U - E'/q \quad (8)$$

in je implicitno odvisna od vrednosti zaporne napetosti med kovino in polprevodnikom U .

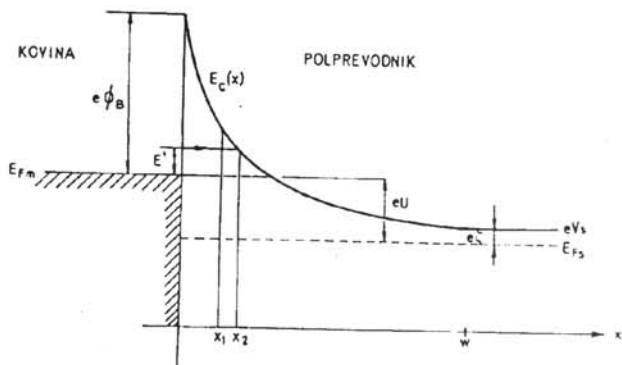
b) $x_1 \leq x_2$ in $0 \leq x \leq x_2$

$$I(E', U) = \int_0^{x_2} \sqrt{V_1(x) + V_1(x_2)} dx \quad (9)$$

toda sedaj je razdalja x_2 (ki je prav tako funkcija zaporne napetosti U) podana z rešitvijo izraza:

$$V_1(x_2) = \xi - U - E'/q \quad (10)$$

Integracija po energiji E poteka od Fermijevega nivoja v kovini, slika 4.



Slika 4. Shematska predstavitev energijskih razmer Schottky-jeve potencialne bariere, $e\phi_B$, nastale ob stiku kovina polprevodnik. E_C je energija spodnjega roba prevodnega pasu polprevodnika, x_1 je povprečni doseg Ag ionov v notranjosti rezine Si, U je zaporna napetost, eV_s je potencialna energija elektronov daleč v notranjosti polprevodnika, w podaja širino z elektroni osiromašenega področja in E' je kinetična energija v Si tunelirajočih elektronov kovine. E_{Fm} in E_{Fs} sta Fermijevi energiji Ag in Si.

V gornjih izrazih je potrebno poznati širino z elektroni osiromašenega območja v polprevodniku w . S pomočjo slike 4 je moč v ta namen izraziti naslednjo povezavo:

$$q\phi_B = \frac{eqx_1}{6\epsilon_s} (N_{so} - N_d) + \frac{eqN_d}{2\epsilon_s} w^2 + q\xi - qU, \quad (11)$$

pri čemer je izraz ξ definiran z

$$\xi = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{N_d}, \quad (12)$$

kjer je N_c efektivna gostota stanj v prevodnem pasu polprevodnika. Enačba (5) v povezavi z enačbo (10) je željeni izraz, ki podaja odvisnost gostote naboja srebrovih ionov N_{so} v polprevodniku na vrednost zapornega toka skozi Schottkyjevo diodo.

3 REZULTAT IN DISKUSIJA

Na sliki 2 predstavljene meritve I - V soodvisnosti za nekatere izmed po CIS metodi nanesenih diod kot funkcija pospeševalne napetosti skupkov, $U_a \neq 0$, kažejo značilno koleno v zaporni smeri. Jasno je razvidno, da postaja prelom tem bolj izrazit in odgovarjajoči zaporni tok tem večji, čim višja je pospeševalna napetost, to pa pomeni čim večji je povprečni doseg Ag^+ ionov v polprevodniku. Izračunani povprečni

doseg podaja za nekatere vrednosti vpadne energije Ag ionov tabela 1. Doseg je izrednoten pod predpostavko, da Ag ioni vpadajo pravokoto na površino 3 nm debele planarne plasti SiO_2 , ki se navadno stvori na rezini Si v prosti atmosferi tako, da lahko šele pri dovolj veliki vpadni energiji prodrejo v notranjost samega polprevodnika. Doseg v tabeli 1 podaja zgolj slednjo razdaljo.

Tabela 1

Energija (eV)	100	400	800	1000	2000	3000
Doseg (nm)	1.8	3.3	4.2	4.6	6.0	7.1

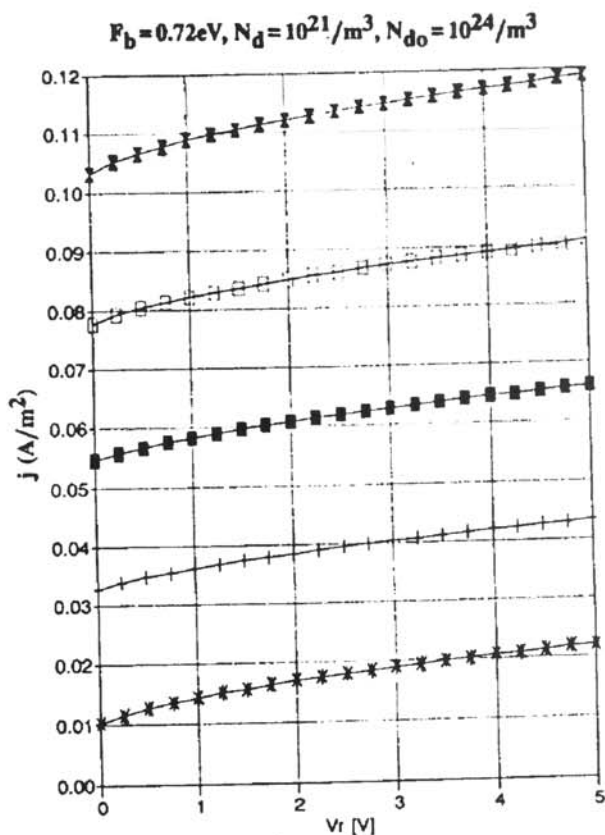
V izračunu, enačba (6), nastopa višina potencialne bariere ϕ_B , ki je 0.72 eV. Poudariti gre, da v zgoraj prikazani izpeljavi ostaja višina bariere ves čas konstantna, kajti poudarek predloženega pristopa je v ugotavljanju tistega mehanizma, ki vpliva na nastanek preloma s odgovarjajočim povečanjem toka v zapornem delu I-V karakteristike. Le-ta pa bo po pričakovanju bolj ali manj neodvisen od majhne spremembe višine potencialne bariere, torej pojava, ki se hkrati z omenjenim odvija sočasno. Iz omenjenega razloga je v izpeljavi opuščen vpliv zmanjšanje bariere zaradi dodatnega potenciala slike (image potential) /5,6/.

Iz enačbe (6) izračunana gostota zapornega toka J je podana na sliki 5. Vrednosti konstant, ki v izračunu nastopajo, so: $\epsilon = 12$, $N_d = 10^{21} m^{-3}$, $N_{so} = 10^{24} m^{-3}$, pri čemer je kot osnovni parameter x_1 zavzel vrednosti 2 nm, 10 nm, 18 nm, 26 nm in 34 nm. Vpliv omenjenih vrednosti na velikost izrednotenega zapornega toka je očiten in kaže kvantitativno ujemanje z eksperimentom. Jasno je razviden skok v okolici zaporne napetosti $V_r = 0$ in to pri vseh vrednostih parametra x_1 , pri čemer pa je skok bistveno večji za večje razdalje, slika 5. Opisano vedenje I-V krivulj je v največji meri funkcija začetne (površinske) koncentracije ioniziranih atomov kovine, N_{so} , ki lahko prodrejo v notranjost polprevodnika. Toda, vrednost izračunanega zapornega toka je za $x_1 = 2$ nm praktično skoraj konstanta, neodvisna od koncentracije N_{so} , za večje vrednosti efektivnega dosega pa so razlike med krivuljami zelo majhne. Zaznavne razlike se pojavijo šele, ko doseže koncentracija N_{so} vrednost okoli $10^{24}/m^{-3}$, slika 5. Rezultati opisanih preliminarne izračunavanj kažejo, da t.im. poslabšanje eksperimentalnih I-V karakteristik v zaporni smeri verjetno niso posledica zgolj nehomogenosti električnega polja, nastalih na robovih kovine na stiku s polprevodnikom (kar v praksi rešujejo s t.im. varnostnimi kolobarji - guard rings), marveč so povezane tudi s koncentracijo gostote donorjev (za n-Si) med površino in ustrežno globino znotraj polprevodnika.

Na osnovi opisanih rezultatov modelnega izračuna zaporne I-V karakteristike Ag/n-Si(111) Schottky-jeve diode še ni mogoče ponuditi sklepa, da utegne pri določenih vrednostih parametrov gostote naboja, kot ga podaja x_1 , postati zaporna karakteristika linearna. Kot je znano, izkazuje tedaj tovrstna sestava običajno

omsko upornost, katere vrednost je podana s strmino I-V karakteristike. Poudariti pa gre, da je v gornjem primeru, v nasprotju z razmišljanji podanimi v /5/, vpliv zmanjšanja efektivne potencialne bariere zanemarljiv in je torej limitni pojav omske upornosti v opisanem modelu prvenstveno prirejen ne toliko z zmanjševanjem same višine bariere, marveč z "degradacijo zaporne karakteristike", ki utegne biti odvisen, vsaj pri CIS metodi, od koncentracije nesilicidnih donorjev, kot je prikazano zgoraj.

Predstavljeni model zapornega toka skozi Schottkyjevo potencialno bariero, čeprav ustrezno popiše povečanje gostote toka s povečanim efektivnim dose-



Slika 5. Gostota toka skozi diodo v zaporni smeri v odvisnosti od zaporne napetosti za različne vrednosti parametra efektivnega dosega kovinskih donorjev v polprevodniku x_1 . Koncentracija donorjev pod površino je $N_{so} = 10^{24} / \text{m}^3$.

gom donorjev kovine v polprevodniku, je nedodelan v smislu, da je strmina gostote zapornega toka v odvisnosti od napetosti pri vseh vrednostih x_1 praktično konstantna, slika 5. Zdi se, da utegne vplivati na strmino predvsem ustrezna nehomogenost porazdelitve donorjev po notranjosti polprevodnika. Omejnjeni zapleteni pojav je potrebno preučiti posebej.

4 SKLEP

Izpeljan je izraz za gostoto toka elektronov za primer tuneliranja nosilcev nabojev na stiku iz kovine v notranjost polprevodnika, to je v zaporni smeri I-V karakteristike Schottkyjeve diode. Izračun temelji na predpostavki, da gostota negibljivih ioniziranih donorjev pod površino polprevodnika linearno pojema do globine x_1 in nato ostane konstantna vse do konca osiromašenega področja, katerega širina je definirana z razdaljo w od površine. Parameter x_1 je v izračunu definiran kot efektivni doseg ionov kovine v notranjost polprevodnika, merjeno od vmesne plasti (interface) ob stiku, ta pa zavisi od metode njenega nanašanja na izbrano podlago. Numerično iz vrednotena karakteristika izkazuje pri vrednosti zaporne napetosti $U = 0$ nezveznost, ki v največji meri je odvisna od efektivnega dosega in koncentracije ionov kovine na razdalji x_1 .

Rezultati izračuna podajajo osnovo za razumevanje I-V karakteristik po metodi curka ioniziranih skupkov CIS, nanosenih Ag/n-Si(111) Schottkyjevih diod, kjer kot eksperimentalni parameter nastopa vrednost pospeševalne napetosti ioniziranih skupkov srebra.

5 LITERATURA

- /1/ Toshinori Takagi, "Ionized-Cluster Beam Deposition and Epitaxy", Noyes Publications, ZDA, 1988, glej tudi T. Takagi, Vacuum, 36, (1986) 27
- /2/ B. Cvikl, Vakuuimist 13, 18 (1993)
- /3/ H. Hsieh and R. S. Averback, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Research B59/60, (1991) 203, glej tudi Phys. Rev. B42, (1990) 5365
- /4/ J. A. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark, The Stopping and Range of Ions in Solids, Pergamon Press, New York, 1985
- /5/ J. M. Shannon, Solid-State Electronics, 19, (1976) 537
- /6/ E. H. Rhoderick and R. H. Williams, Metal-Semiconductor Contacts, Clarendon Press, Oxford, 1988
- /7/ L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Quantum Mechanics, Pergamon Press, 1958, stran 157

LASTNOSTI PLAZME V PILOTSKI RF PLAZEMSKI NAPRAVI

Nikola Jelić, Milan Čerček, Tomaž Gyergyek¹, Miran Mozetič² in Mladen Stanojević

Institut "Jožef Stefan", Univerza v Ljubljani, Jamova 39, 61111 Ljubljana, Slovenija

¹Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 61111 Ljubljana, Slovenija

²Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61111 Ljubljana, Slovenija

Plasma properties in a pilot RF plasma device

Abstract

In the Plasma Physics Laboratory of the Jožef Stefan Institute in Ljubljana a construction of a plasma apparatus for the restoration and conservation of archeological artifacts by a low pressure hydrogen plasma was started in 1992. A pilot RF plasma device was built. So far some preliminary measurements in helium and hydrogen plasma were performed. Results of those measurements are presented in this paper.

Povzetek

V laboratoriju za fiziko plazme na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani smo v letu 1992 začeli izdelovati plazemsko napravo, ki bo namenjena za konzervacijo in restavracijo arheoloških izkopanin z vodikovo plazmo. Zgradili smo pilotsko RF plazemsko napravo. Doslej smo v njej opravili nekaj preliminarnih meritev z vodikovo in helijevo plazmo, katerih rezultate predstavljamo v tem sestavku.

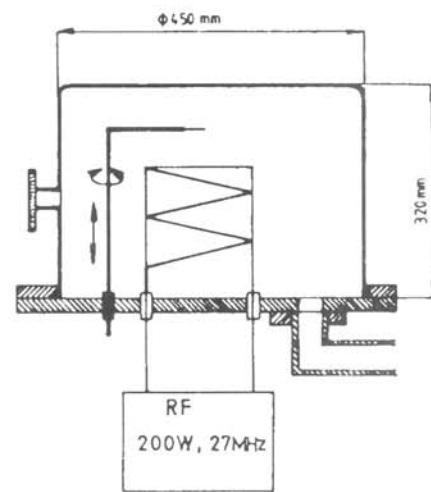
1 Uvod

Za redukcijo oksidov na arheoloških izkopaninah in njihovo konzervacijo se praviloma uporablja vodikovo plazmo, ki se ji lahko doda še druge pline. V laboratoriju za fiziko plazme na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani smo začeli graditi plazemsko napravo, ki bi bila uporabna v ta namen. Zaenkrat smo postavili pilotsko napravo. Zaradi finančnih omejitev smo uporabili le opremo, ki smo jo že imeli v laboratoriju. V sestavku so opisane nekatere lastnosti plazme v tej napravi.

2 Opis naprave

Za približno 50 litrsko vakuumsko posodo smo uporabili kar kuhinjski lonec iz nerjavečega jekla. Zaradi manjših stroškov je to pogost način konstrukcije laboratorijskih plazemskih naprav, zlasti v laboratorijih, kjer se ukvarjajo z osnovnimi raziskavami plazme (npr. /1/). Ta lonec je poveznjen na aluminijasto, 2 cm debelo prirobnico. Vsi skozi so napeljani skozi to prirobnico. Izjema je le okence na loncu (slika 1). Posodo izčrpamo z oljno difuzijsko črpalko (Edwards 300 l/s) in rotacijsko črpalko (Pfeiffer DUO12). Najnižji tlak, ki ga lahko dosežemo je 2×10^{-6} mbar, samo z rotacijsko črpalko pa dosežemo 2×10^{-2} mbar. V opisanih poskusih plazmo vzbujamo pri nekoliko višjem tlaku (~ 1 mbar), zato uporabljamo samo rotacijsko črpalko. Posodo najprej izčrpamo do 10^{-2} mbar,

nato pa vanjo spustimo plin. Doslej smo največ uporabljali helij in vodik. Dotok plina lahko spreminjamo z igelnim ventilom in tako nastavljamo tlak od 0.04 do 1 mbar.



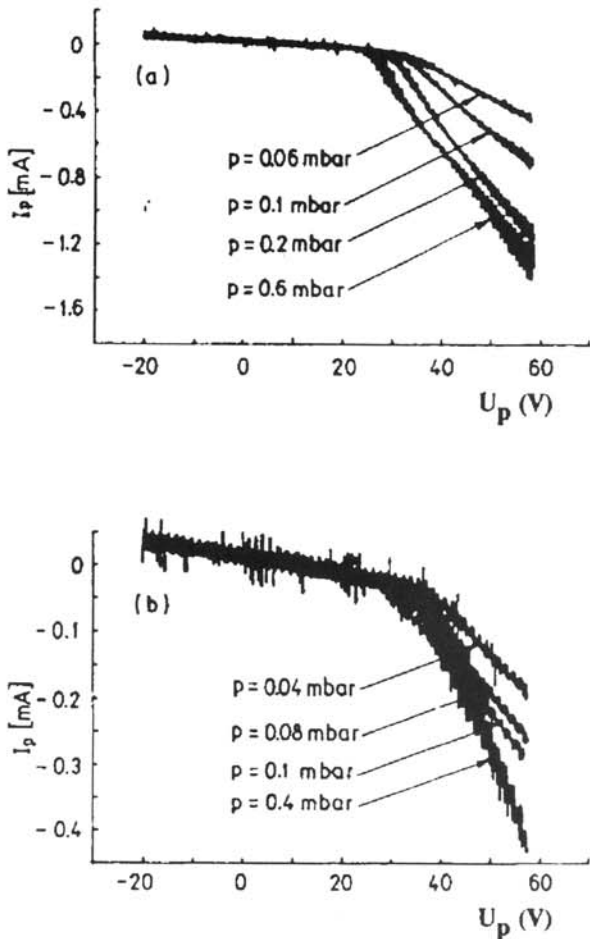
Slika 1. Shema pilotske vakuumske naprave. Kuhinjski lonec je iz nerjavečega jekla. Vsi skozi so napeljani skozi spodnjo aluminijasto prirobnico. Podane so tudi dimenzije posode v milimetrih.

Plazmo ustvarimo z induktivno RF razelektrivjo. V napravi je tuljava iz neizolirane bakrene žice. Tuljava ima 6 ovojev s premerom 13 cm ter razmik med sosednjima ovojem približno 2 cm. Tuljavo priključimo na RF generator z močjo 200 W in frekvenco 27 MHz.

3 Eksperimentalni rezultati

Plazemske parametre merimo s cilindrično Langmuirjevo sondo /4/. Nekaj primerov karakteristik v helijevi in vodikovi plazmi je prikazanih na sliki 2. Na karakteristiki je opazen visokofrekvenčni šum, ki ga povzroča radiofrekvenčni izvir plazme. Karakteristiko analiziramo z računalnikom. Visokofrekvenčni šum najprej odstranimo z računalniško proceduro, ki uporablja inverzno Fourierovo transformacijo Blackmanovega

Prispevek je bil predstavljen na 1. srečanju vakuumistov Slovenije in Hrvaške v Zagrebu.



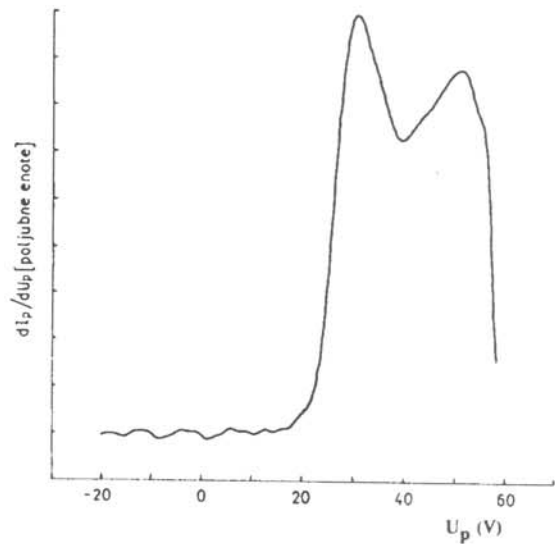
Slika 2. Nekaj primerov karakteristik cilindrične Langmuirjeve sonde v helijevi (a) in vodikovi (b) plazmi. Na karakteristiki opazimo visokofrekvenčni šum, ki ga pred kasnejšo obdelavo odstranimo z digitalnim filtrom. Šum je predvsem posledica RF proizvodnje plazme.

okna /5/. Plazemski potencial nato določimo iz numeričnega odvoda poglajene karakteristike. Plazemski potencial V_s je pri tisti napetosti na sondi, pri kateri ima odvod karakteristike ekstrem. Na sliki 3 je prikazan primer takšnega odvoda. Ko enkrat poznamo plazemski potencial, odčitamo vrednost toka I_0 na sondo pri plazemskem potencialu in nato izračunamo gostoto plazme n po enačbi:

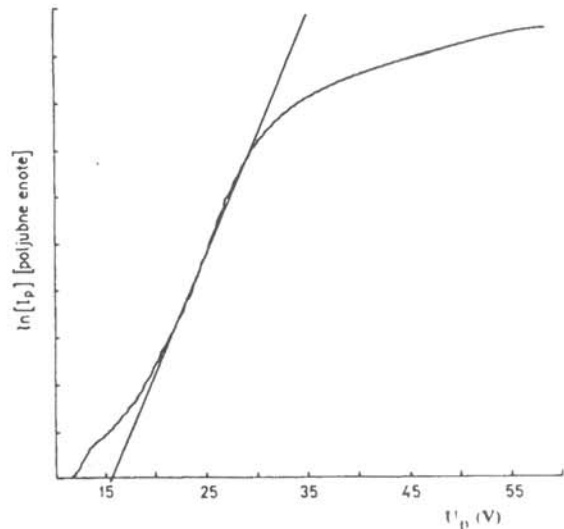
$$n = \frac{I_0}{e_0 A_p} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8 k T_e}} \quad (1)$$

Pri tem je e_0 osnovni naboj, A_p površina sonde, kT_e elektronska temperatura in m_e masa elektrona. Elektronsko temperaturo ugotovimo iz strmine premice, ki jo prilagajamo na prehodnem delu logaritmirane karakteristike /4/. Zgled je prikazan na sliki 4.

Na ta način smo izmerili gostoto plazme, plazemski potencial in elektronsko temperaturo v odvisnosti od tlaka plina za vodikovo in helijevo plazmo. Količina, ki nas najbolj zanima, je seveda gostota plazme. Ugotovimo, da je ta reda velikosti 10^{15} m^{-3} .



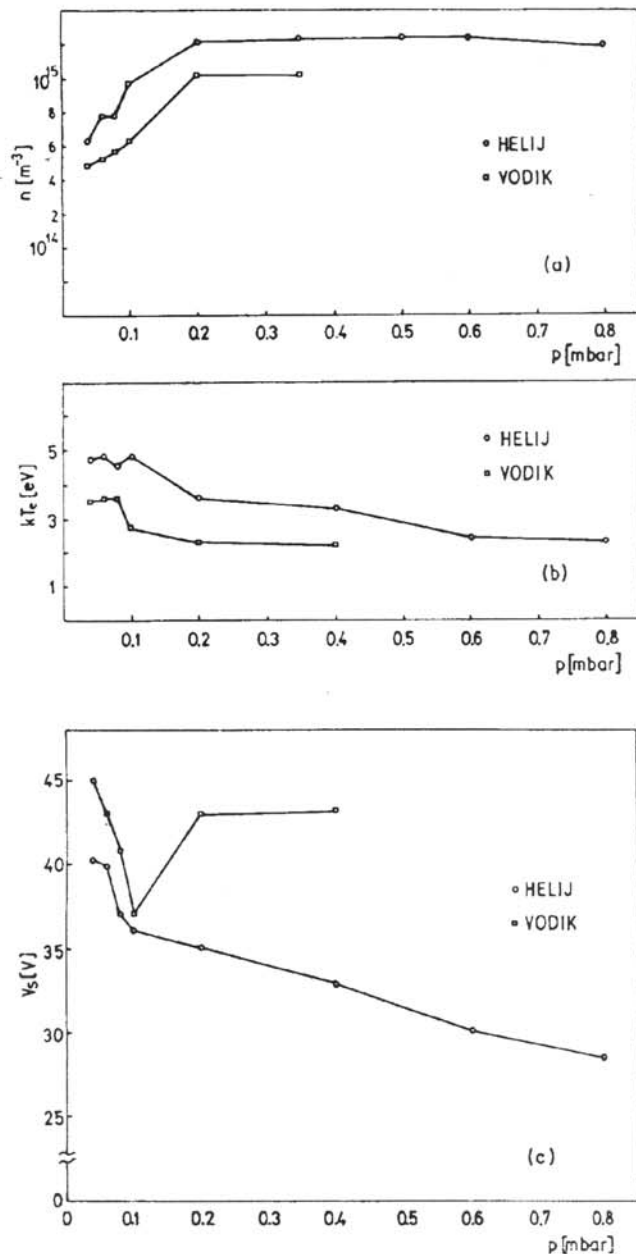
Slika 3. Zgled numeričnega odvoda poglajene karakteristike. Plazemski potencial V_s je pri napetosti, pri kateri ima odvod ekstrem.



Slika 4. Zgled logaritmirane poglajene karakteristike. Elektronska temperatura je obratno sorazmerna s strmino premice, ki jo prilagajamo z metodo najmanjših kvadratov prehodnemu delu karakteristike.

4 Sklep

S cilindrično Langmuirjevo sondo smo izmerili nekaj plazemskih parametrov v pilotski RF plazemski napravi. Diagnostika RF plazem je sicer področje, ki se prav v tem trenutku zelo hitro razvija (npr. /6/). Osnovni problem je odstraniti vpliv modulacije potencialne razlike med plazmo in sondo. Ta problem poskušajo rešiti na različne načine. Eden od teh je opisan v /6/. Ker imamo razmeroma šibak RF gene-



Slika 5. Odvisnost gostote plazme (a), elektronske temperature (b) in plazemskega potenciala (c) od tlaka plina za vodikovo in helijevo plazmo.

rator (200 W), se je pokazalo, da je karakteristiko Langmuirjeve sonde še vedno mogoče analizirati na običajen način /4/, če šum, ki ga povzroča RF izvir, poprej odstranimo z digitalnim filtrom. To potrjujejo tudi smiselne vrednosti izmerjenih plazemskih parametrov.

Na žalost pa je gostota plazme, ki jo dobimo v pilotski napravi, mnogo premajhna za naš osnovni namen, to je redukcija oksidov na arheoloških vzorcih. Za odstranjevanje kisika, klora in žvepla s kovinskih površin je najprimernejši atomarni vodik. Zaradi šibkega RF generatorja pa je stopnja disociacije vodika v naši napravi zelo nizka. Stopnjo disociacije merimo s katalitično sondo /7/. V naši plazmi pa te sonde tudi po več urah nismo uspeli aktivirati. V opisih RF plazemskih naprav, v katerih konservirajo arheološke najdbe /2,3/, nismo zasledili, da bi kje navajali kakšne izmerjene plazemske parametre. Vzrok za to je lahko tudi v tem, da za proizvodnjo plazme uporabljajo RF generatorje, katerih moč za red velikosti presega moč našega generatorja in so zaradi tega motnje tako velike, da ni več mogoča diagnostika s tako preprosto metodo, kot smo jo uporabili mi.

5 Literatura

- /1/ K. N. Leung, N. Hershkowitz and K. R. McKenzie, Phys. Fluids., 19, (1976), 1045-1053
- /2/ J. Patscheider and S. Veprek, Studies in conservation, 31, (1986), 29-37
- /3/ S. Veprek, J. Elmer, C. Eckmann and M. Jurčik, Journal of Electrochemical Society, 134, (1987), 2398-2405
- /4/ F. F. Chen in Plasma Diagnostic Techniques, ed. by R. H. Huddleston and S. L. Leonard, Academic Press, New York, (1965), 113-200
- /5/ M. H. Ackroyd, Digital Filters, Computers in Medicine Series, London Butterworths Publishers
- /6/ G. Neumann, U. Bänziger, M. Kammeyer and M. Lange, Rev. Sci. Instrum., 64, (1993), 19-25
- /7/ F. Breclj, M. Mozetič, K. Zupan and M. Drobnič, Vacuum, 44 (1993) 459