

# VAKUUMIST

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

LJUBLJANA, DECEMBER 96

LETNIK 16, ŠT. 4, 1996



## VSEBINA

- Elektrostatski elektronski spektrometer za merjenje Augerjevih spektrov v plinih (P. Pelicon, I. Čadež, M. Žitnik, Ž. Šmit)

---

- Elektronske lastnosti mejnih plasti v heterostrukturah ZnSe/GaAs(001): ključ do modrega laserja? (G. Bratina)

---

- Zaslони za katodne elektronke (II. del) (Lea Županc Mežnar)

---

- Kvantno računanje (I. Belič)

---

- Zgodovina raziskovanja luminiscentnih snovi (I. del) (Stanislav Južnič)

---

- NASVETI (J. Gasperič)

---

- DRUŠTVENE NOVICE

---

- OBVESTILA

---

Slika na naslovni strani: Spektrometer za merjenje atomskih spektrov plinastih tarč, ki so ga zgradili na Odseku za fiziko nizkih in srednjih energij na Institutu "Jožef Stefan". (Foto: ing. Marjan Smerke)

### Obvestilo

Naročnike Vakuumista prosimo, da čim prej poravnate naročnino za leto 1996.

Cena štirih števil, kolikor jih bo izšlo v letu, je 1000,00 tolarjev.

#### SPONZORJA VAKUUMISTA:

- **Ministrstvo za šolstvo in šport Slovenije**
- **Balzers PFEIFFER GmbH, Dunaj**

- VAKUUMIST
- Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije
- Glavni in odgovorni urednik: dr. Peter Panjan
- Uredniški odbor: mag. Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje vakuumске tehnike in sistemov), dr. Bojan Jenko, dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumске metalurgije), dr. Ingrid Milošev, mag. Miran Mozetič, mag. Vinko Nemanič, Marjan Olenik, dr. Boris Orel, mag. Andrej Pregelj, dr. Vasilij Prešern in dr. Anton Zalar
- Lektor: dr. Jože Gasperič
- Korektor: Tomo Bogataj
- Naslov: Uredništvo Vakuumista, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 1000 Ljubljana, tel. (061)123-13-41
- Številka žiro računa: Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, 50101-678-52240
- Grafična obdelava teksta: Jana Strušnik
- Tisk: PLANPRINT d.o.o. - Littera picta, Rožna dolina, c. IV/32-36, 1000 Ljubljana
- Naklada 400 izvodov



PFEIFFER  VACUUM

Pred vami so izbrane turbomolekularne črpalke, s katerimi lahko v tehnološkem postopku, kjer imate korozivne pline, nadomestite stare turbomolekularne črpalke.

Pfeiffer Vacuum Austria  
Diefenbachgasse 35  
A-1150 Wien  
telephone ++43/1 89417 0 4  
telefax ++43/1 894 17 04

Ali je vaša stara turbomolekularna črpalka, ki črpa korozivne pline, tik pred tem, da odpove? Predstavljamo vam pet modelov naših turbomolekularnih črpalk iz serije "C", ki pa so več kot samo zamenjava za vaše stare črpalke.

Lastnosti novih turbomolekularnih črpalk so:

- hitrosti črpanja od 210 do 2200 l/s
- velik pretok in varno črpanje agresivnih plinov, pri čemer prihranite stroške predčrpanja
- visoki vakuum brez ogljikovodikov
- površine, izpostavljene plinom, ščitijo pred korozijo
- končni tlak  $<10^{-10}$  mbar pri predtlaku 10 mbar
- možna je ekonomična uporaba membranskih predčrpalk

in kar je še več: **cena sistema, napajalnika in stroški delovanja so minimalni.**

Modeli iz serije Turbo "C" niso le "nadomestni deli", ampak so uporabni posoda, kjer črpamo korozivne pline.

Scan, d.o.o.  
Breg ob Kokri 7  
SI-4205 Preddvor  
Tel: +386 64 451 383  
Fax: +386 64 451 050



**MEDIVAK**

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

tel. fax : 00386 61 713060  
 mobitel : 0609 615 455  
 žiro račun : 50120-601-114647

## HITRA POMOČ V TEŽAVAH

### ODKRIVANJE NETESNOSTI

#### Helijski masni spektrometer UL 200

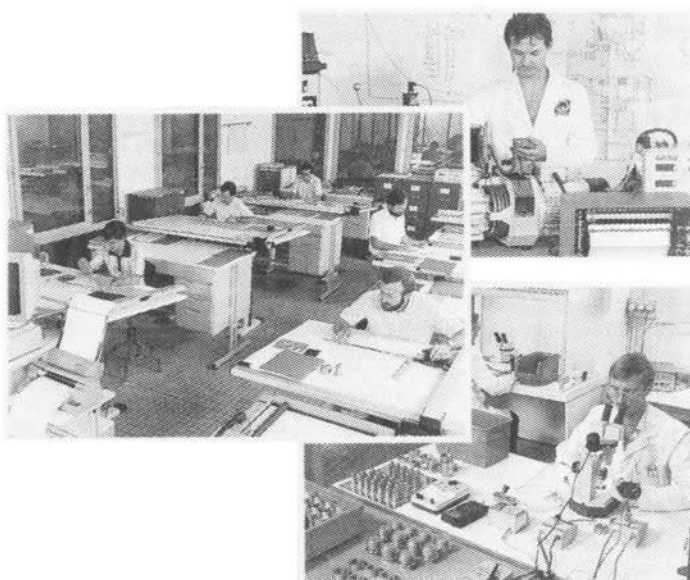
- vakuumski sistemi
- vakuumski agregati
- nizko- in visokotlačne posode
- ventili, spoji
- energijske postaje



#### IZPOSOJA VAKUUMSKIH ČRPALK LEYBOLD

❄️ *Srečno novo leto!* ❄️ ❄️ ❄️

## 24 URNI SERVIS



- vakuumskih črpalk
- analiznih aparatov
- odkrivanje netesnosti

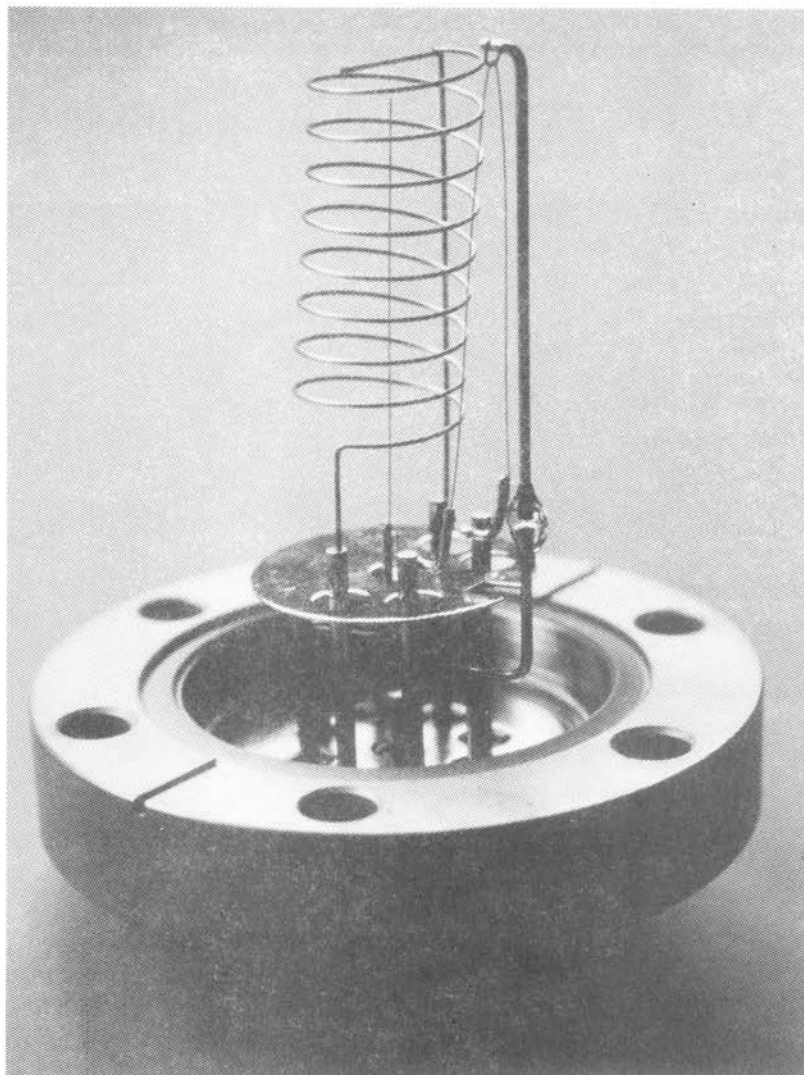
## IZOBRAŽEVANJE

S področja

**ODKRIVANJE NETESNOSTI  
 POPRAVILA ČRPALK**

Tečaje organiziramo na sedežu firme v Domžalah, če se prijavi najmanj 6 oseb.

# IIEVT



- VAKUUMSKI SISTEMI:
- VAKUUMSKE KOMPONENTE:

ročno ali računalniško krmiljeni  
črpalke, merilniki, ventili, spojke,  
komore in drugi elementi

## IIEVT

INŠTITUT  
ZA ELEKTRONIKO  
IN VAKUUMSKO  
TEHNIKO

TESLOVA ULICA 30, POB 2959, 1001 LJUBLJANA  
SLOVENIJA  
TEL.: (+386 61) 177 66 00 N.C.,  
FAX: (+386 61) 126 45 78

**MEDIVAK**

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

tel. fax : 00386 61 713060  
mobitel : 0609 615 455  
žiro račun : 50120-601-114647

**LEYBOLD****ZASTOPSTVO  
SERVIS  
SVETOVANJE**

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

**PRODAJNI PROGRAM "LEYBOLD"****Vakuumske črpalke**

- Rotacijske vakuumske črpalke s priborom
- Eno in dvostopenjske (1 do 1200 m<sup>3</sup>/h)
- Roots vakuumske črpalke - RUVAC (150 do 13000 m<sup>3</sup>/h)
- Membranske in ejektorske vakuumske črpalke - DIVAC 2,4 L
- Difuzijske črpalke (40 do 50.000 l/s)
- Turbomolekularne črpalke (50 do 4500 l/s)
- Sorpcijske črpalke, kriočrpalke, ionsko-getrske in sublimacijske titanske črpalke

**Vakuumski črpalni sistemi**

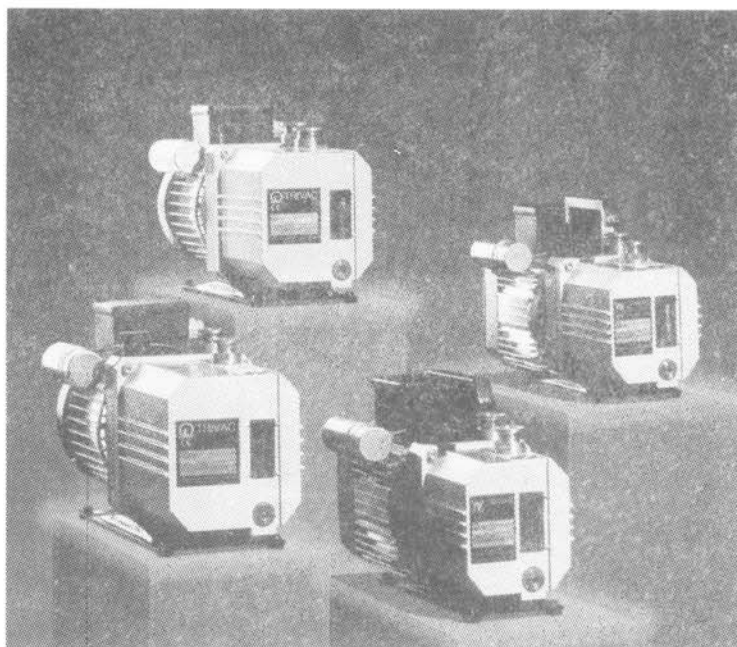
- za kemijsko in drugo industrijo

**Vakuumski ventili**

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

**Vakuumski elementi in priborice**

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

**Mehanske in električne prevodnice  
Merilniki vakuuma in kontrolni instr.**

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

**Procesni regulatorji****Detektorji netesnosti (puščanja)**

- Helijski in freonski detektorji

**Masni spektrometri s priborom**

Vakuumska olja, masti, rezervni deli



Izšel je nov prodajni katalog Leybolda,  
ki ga lahko naročite pri nas.

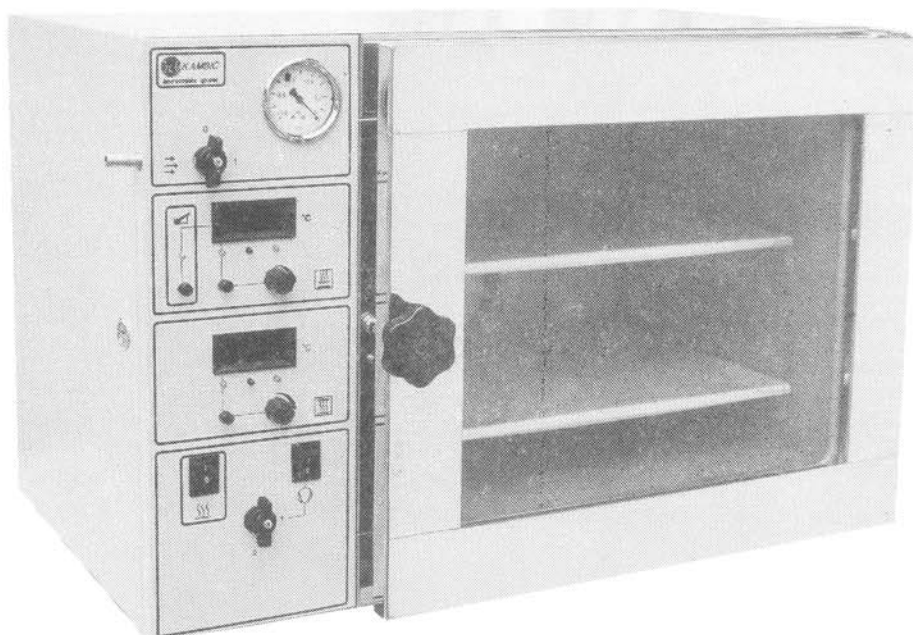




# Kambič

## Laboratorijska oprema

### Vakuumski sušilniki



### OLJA ZA VAKUUMSKE ČRPALKE

#### VAKUUM OIL K2

- najboljša olja za vse vrste rotacijskih vakuumskih črpalk

parni tlak:  $1 \times 10^{-4}$  mbar pri  $80^{\circ}\text{C}$   
viskoznost:  $15 \text{ mm}^2/\text{s}$  pri  $100^{\circ}\text{C}$

#### KADIFF OIL 33

- olje za difuzijske vakuumске črpalke

parni tlak:  $1 \times 10^{-8}$  mbar pri  $25^{\circ}\text{C}$   
viskoznost:  $254 \text{ mm}^2/\text{s}$  pri  $20^{\circ}\text{C}$   
embalaža: olje dobavljamo v plastenkah 1, 5, 10 litrov

#### KAMBIČ LABORATORIJSKA OPREMA

Anton Kambič, s.p., Semič 40  
8333 SEMIČ, SLOVENIJA  
Tel.: 068/67-006  
Tel., faks: 068/67-008



#### Proizvodni program:

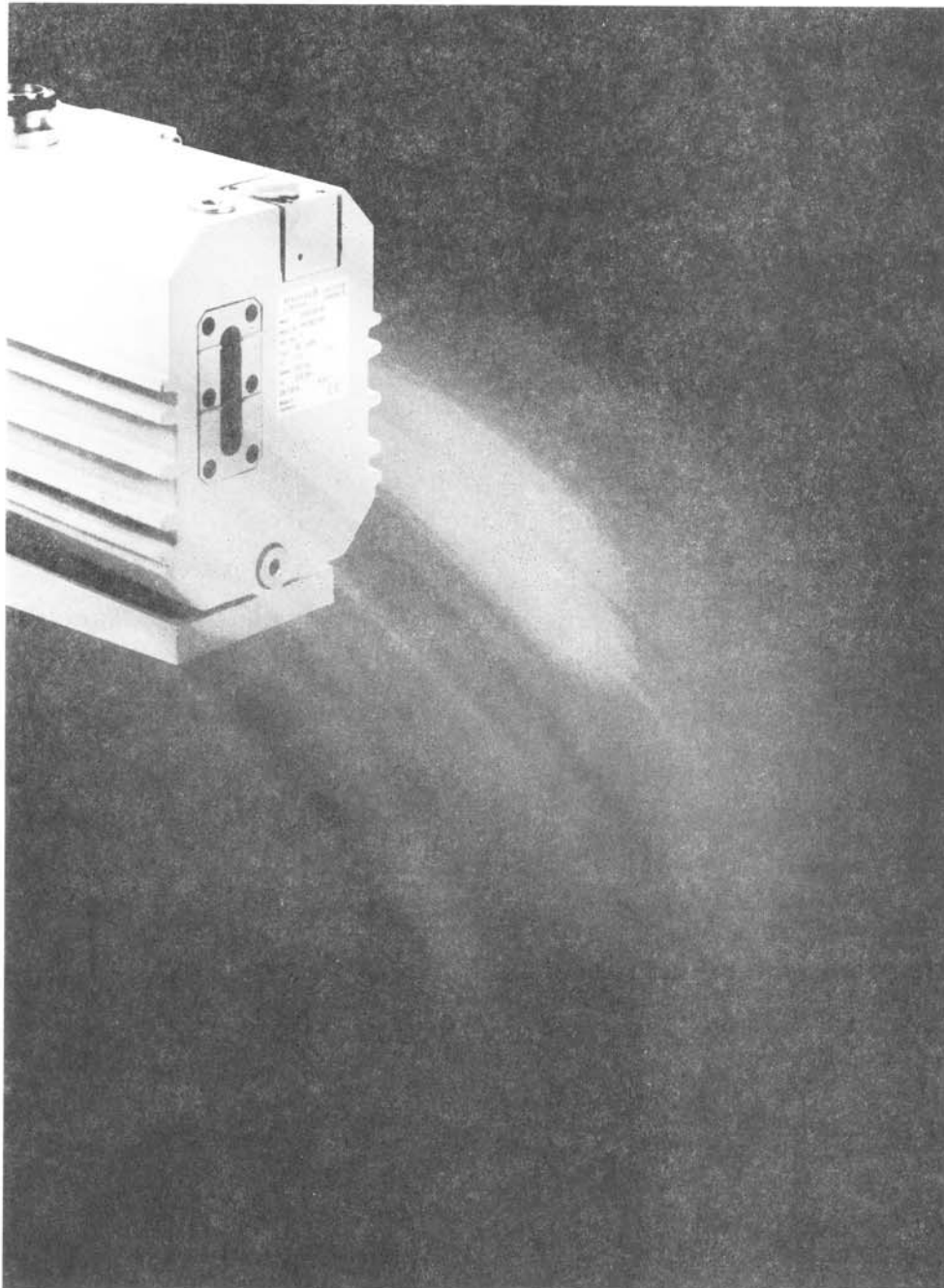
inkubatorji, sterilizatorji, sušilniki, sušilniki steklovine, destilatorji vode, mikropeskalniki, avtoklavi, liofilizatorji, keramični mlini, naprave za vakuumsko destilacijo odpadnih emulzij, vakuumski sušilniki, vodne kopeli, ejektorske vakuumске črpalke, olja za difuzijske in rotacijske vakuumске črpalke, rastlinske komore



**PFEIFFER**  **VACUUM**

Če najdete bolje tesnjeno rotacijsko črpalko,  
bomo brez oklevanja vzeli našo novo 010 M nazaj.

Pfeiffer Vacuum Austria  
Diefenbachgasse 35  
A-1150 Wien  
telephone ++43/1 894 17 04  
telefax ++43/1 894 17 04



To je obljuba!

Če v 99 dneh po obvestilu in vplačilu res najdete bolje tesnjeno rotacijsko črpalko, bomo našo novo DUO 010 M vzeli nazaj. Hermetično tesnjenje je rezultat popolnoma nove zasnove pogona. Ker rotorske osi ni, ni potrebe po tesnjenju te osi. Puščanje je zato izključeno, okvare pa minimizirane.

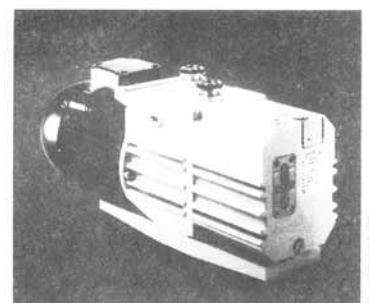
Druge prednosti so:

- velika hitrost črpanja pri majhnih črpalkah
- puščanje olja je izključeno
- vgrajen varnostni ventil

Nova DUO 010 M črpalka je torej okolju prijazna, primerna za ekonomične in zanesljive vakuumske sisteme.

Popolnoma smo prepričani, da se bo naš model M obnesel tako dobro, da ga boste želeli zadržati.

Scan, d.o.o.  
Breg ob Kokri 7  
SI-4205 Preddvor  
Tel: +386 64 451 383  
Fax: +386 64 451 050

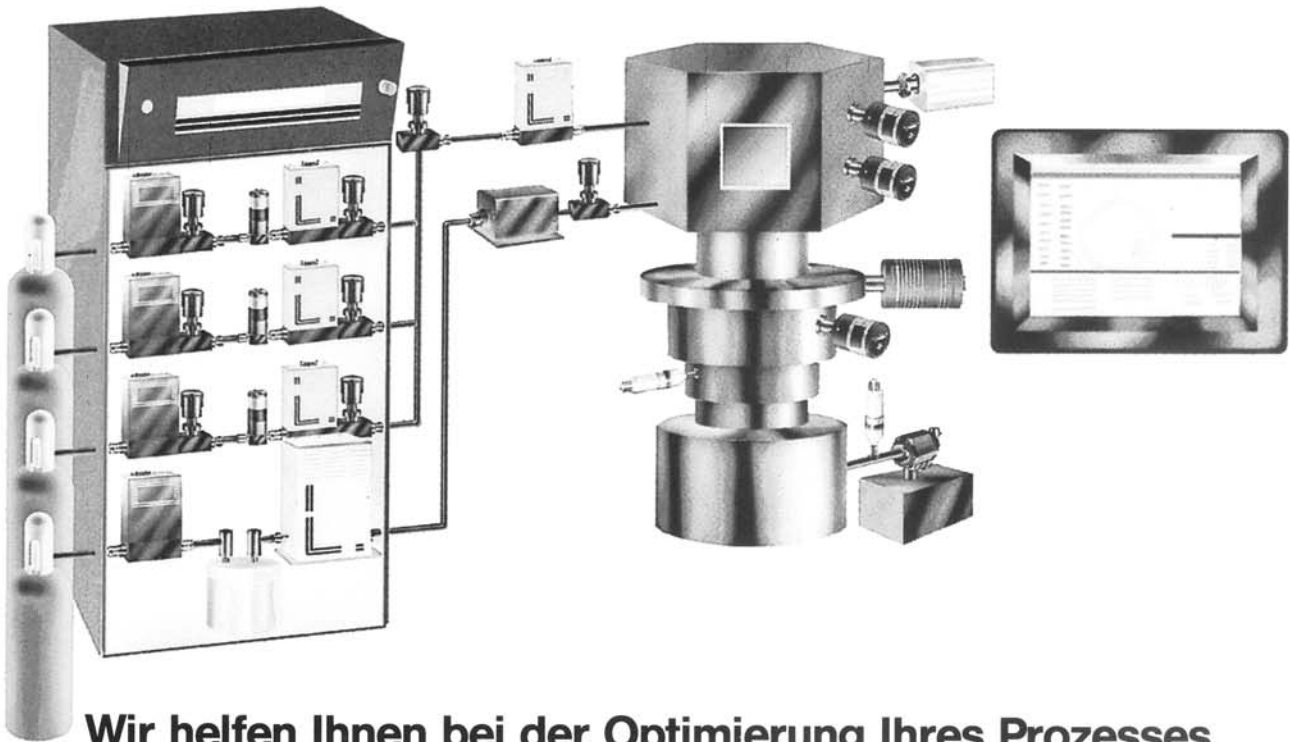


**SREČNO NOVO LETO!**





# MKS Around the World... Around the Process.



**Wir helfen Ihnen bei der Optimierung Ihres Prozesses**

#### **Druckmessung**

Gasartunabhängige, korrosionsfeste Kapazitätsmanometer höchster Genauigkeit und Zuverlässigkeit für Vakuum und Überdruck.

#### **Druckregelung**

Mikroprozessorgesteuerte, automatische Prozeßdruckregelung mittels motor-gesteuerter Drosselventile oder elektro-magnetischer Gaseinlaßventile.

#### **Service und Kalibrierdienst**

Weltweit vernetzte Service- und Kalibrierstationen mit hochqualifizierten Mitarbeitern garantieren optimale Unterstützung.

#### **Gasversorgung**

Digitale und analoge Gasflußregler. Auch Ganz-Metall-gedichtete für ultra-clean-Anwendungen, Gasmischsysteme, Massenflußregler für Dämpfe, Flüssigkeiten und unter Normalbedingungen feste Materialien.

#### **Gasanalyse**

Restgasanalyse mit PC-gesteuertem Kompakt-Massenspektrometer

#### **Kalibriersysteme**

Tragbare, fahrbare und stationäre Kalibriersysteme für Vakuum-, Überdruck- und Gasflußmeßgeräte. Kunden- bzw. applikationsspezifische Lösungen.



**MKS Instruments Deutschland GmbH, Schatzbogen 43, D-81829 München**

**Tel. (089) 42 00 08-0 · Fax (089) 42 41 06**

**ZASTOPSTVO  
SERVIS  
SVETOVANJE**

**MEDIVAK**

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

tel. fax : 00386 61 713060  
mobitel : 0609 615 455  
žiro račun : 50120-601-114647

# DR. NEMO

družba z omejeno odgovornostjo  
Proizvodnja, zastopstvo, tehnična podpora in svetovanje  
Štrekljeva 3, Ljubljana

tel. 061/ 125 03 15, 125 11 05, fax: 061/125 11 10

Mikrovalovni razklop  
Mikrovalovna hidroliza proteinov  
Mikrovalovna sinteza organskih spojin  
Mikrovalovno določanje hlapnih substanc  
Mikrovalovno sušenje in koncentriranje  
Mikrovalovna destilacija  
Mikrovalovni avtoklav

**MILESTONE**



M I C R O W A V E  
L A B O R A T O R Y S Y S T E M S

**GRASEBY**  
**SPECAC**

IR spektrometrija

**DANI**

Plinska kromatografija

## SREČNO NOVO LETO!

# ELEKTROSTATSKI ELEKTRONSKI SPEKTROMETER ZA MERJENJE AUGERJEVIH SPEKTROV V PLINIH

**Primož Pelicon, Iztok Čadež, Matjaž Žitnik in Žiga Šmit**, Institut "Jožef Stefan", Odsek za fiziko nizkih in srednjih energij, Jamova 39, P.O.B. 3000, SI-1001 Ljubljana, Slovenija

Electrostatic electron spectrometer for measurements of the Auger spectra in gases

## ABSTRACT

Electron spectrometer for gas-phase targets was built at the Dept. for low and medium energy physics of the "Jožef Stefan" Institute. The processes within the inner atomic shells, which are objects of the investigations, are briefly described. The electrons from interaction centre are focused by three-element electrostatic lens of rectangular shape and injected into planparallel electrostatic analyser. We present some details of the mechanical adjustment and working features of the spectrometer.

## POVZETEK

V prispevku je opisan spektrometer za merjenje elektronskih spektrov na plinastih tarčah, ki smo ga zgradili na Odseku za fiziko nizkih in srednjih energij Instituta "Jožef Stefan". Kratko so opisani opazovani procesi v notranjih atomskih lupinah in pomen njihovega raziskovanja. Pri izvedbi meritve fokusiramo elektrone iz interakcijskega prostora s tridelno elektrostatsko lečo iz pravokotnih cevi in usmerimo v planparalelni elektrostatski analizator z vpadnim kotom 30°. Prikazujemo postopek uravnave in delovanje spektrometra.

## 1 Uvod

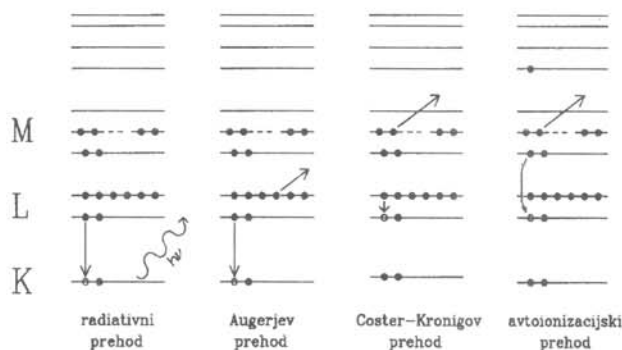
Dogajanje v atomu kot fizikalnem sistemu lahko danes zadovoljivo pojasnimo s spoznanji kvantne mehanike. Interakcija med delci v njem je coulombska, mase delcev v sistemu - elektronov in jeder - so znane. Lupinska struktura atoma je široko poznan fizikalni model, s katerim lahko kvalitativno pojasnimo večino procesov v atomu.

Raziskovanje procesov vzbujanja in razpadanja atomskih stanj je v preteklosti prispevalo k gradnji človekovih predstav o dogajanjih v svetu kvantnih delcev. Z rekonstrukcijo energij prehodov v vodikovem atomu je Bohr postavil enega izmed temeljev kvantne mehanike. Ko se je védenje o procesih v atomu širilo, so se vzporedno z njim rojevale analitske tehnike, ki so danes nepogrešljive pri strukturalni in kemijski analizi snovi. Danes so Augerjeva spektroskopija, rentgenska fluorescenca, fotoelektronska spektroskopija in še mnoge druge sorodne tehnike razširjene v znanosti in industriji. Učinkovitost teh tehnik je neposredno povezana s poznavanjem osnovnih podatkov o atomskih lastnostih, kot so energije prehodov, naravne širine stanj, preseki za vzbujanje itd.

Atom je sistem več teles. Že helijev atom, ki je sistem treh teles, dveh elektronov in helijevega jedra, je z danes razpoložljivimi matematičnimi orodji nemogoče eksaktno opisati. Sodobni teoretični modeli, ki temeljijo na približkih samousklajenega polja in perturbativne teorije več teles, zaradi tega odpovedujejo pri opisu kolektivnih procesov v večelektronskem atomu. Rezultati eksperimenta so v takih razmerah bolj zanesljivi od izračunov, hkrati pa usmerjajo in kritično presojo kakovost teoretičnih napovedi.

## 1.1 Razpad atomskega stanja z vrzeljo v notranji lupini

Močna motnja atoma lahko povzroči, da se v notranji atomski lupini pojavi vrzel. Elektron iz te lupine se pri tem lahko preseli v eno izmed višjih, še nezasedenih lupin, ali pa odleti iz atoma. Prvi pojav imenujemo ekscitacija, drugega pa ionizacija. Atomsko stanje z vrzeljo v notranji lupini je nestabilno. V nižjeenergijsko stanje lahko preide na več načinov (slika 1). Najverjetnejša sta prehod z izsevanjem fotona (radiativni) in prehod z izsevanjem elektrona (neradiativni). Proces, kjer se atom preuredi z izsevanjem več kot enega delca, so mnogo manj verjetni. Proces vzbuditve nestabilnega atomskega stanja in njegovega razpada lahko zadovoljivo obravnavamo kot dva neodvisna dogodka.



Slika 1: Najverjetnejši razpadi atomskih stanj z eno vrzeljo v notranji lupini

Pri razpadu enolukenskega stanja z izsevanjem elektrona aktivno sodelujeta dva elektrona: eden izmed njih zapolni vrzel v notranji lupini, drugi pa prevzame presežno energijo in izleti iz atoma (slika 1). V primeru Augerjevega prehoda sodelujeta elektrona iz zunanjih lupin. Pri Coster-Kronigovem prehodu začetno vrzel zapolni elektron iz iste lupine. Če stanje z vrzeljo v notranji atomski lupini vzbudimo z ekscitacijo elektrona v eno izmed višjih, še nezasedenih lupin, je atom v nestabilnem stanju električno nevtralen. Tudi v tem primeru se vrzel zapolni z izsevanjem fotona ali elektrona. Neradiativni proces, pri katerem eden izmed elektronov v vzbujenem atomu zapolni vrzel, drugi pa prevzame presežno energijo in izleti v kontinuum, imenujemo avtoionizacija.

Ko prepustimo atom motnji, se lahko zgodi, da poleg vrzeli v notranji lupini v atomu nastane še vrzel v eni izmed zunanjih lupin. Vrzel v notranji lupini se prav tako zapolni z izsevanjem fotona ali elektrona, le da so energije izsevanih delcev premaknjene. V bližini močnih diagramskih prehodov, ki izvirajo iz razpada enolukenskih stanj, opazimo v spektrih večje število šibkejših prehodov, pri katerih razpadajo atomska stanja z vrzeljo v notranji lupini in dodatno vrzeljo v eni

izmed zunanjih lupin. Zaradi značilne oblike izmerjenih spektrov te prehode označujemo z nazivom satelitski prehodi. Dodatna vrzel v eni izmed zunanjih lupin zaradi manjšega senčenja jedrskega naboja poveča vezavne energije enoelektronskih stanj. Zaradi tega najdemo v fotonjskih spektrih satelitske črte pri višjih energijah od diagramskih. V elektronskih spektrih, kjer izsevani elektron odleti v kontinuum iz enoelektronskega stanja s povečano vezavno energijo, se satelitske črte običajno nahajajo pri nižjih energijah, kot jih imajo diagramske črte.

Verjetnost, da se vrzel v notranji atomski lupini zapolni z radiativnim prehodom, podaja fluorescenčni pridelek. Ta je v lahkih atomih nizek in se veča z vrstnim številom. V lahkih atomih ( $Z < 30$ ) stanja z vrzeljo razpadajo pretežno z izsevanjem elektrona (Augerjev proces), v težjih pa pretežno z izsevanjem fotona iz rentgenskega dela elektromagnetnega spektra (radiativen proces). Ker je snov v vesolju sestavljena pretežno iz lahkih elementov, je v njem Augerjev proces dominanten način razpadanja lukenjskih atomskih stanj.

Energijske in kotne porazdelitve delcev, izsevanih v teh procesih, nam dajejo vpogled v dogajanje v atomu. Iz njih lahko določimo energijske nivoje atomskih stanj, njihove naravne širine, preseke za vzbujanje in drugo. S tem prispevamo poleg poglobljenega razumevanja atoma kot fizikalnega sistema istočasno tudi k povečanju učinkovitosti analitskih tehnik, ki temeljijo na poznavanju parametrov v atomskih procesih.

## 1.2 Eksperimentalne zahteve meritev elektronskih spektrov v monoatomnih tarčah

Na procese v atomu močno vpliva prisotnost sosednjih atomov. Če se hočemo izogniti tem t. i. kemijskim efektom, je potrebno uporabiti monoatomne tarče v plinastem agregatnem stanju. Tem zahtevam ustrezajo žlahtni plini in kovinske pare. Merjenje elektronskih spektrov mora potekati v vakuumu, saj se gibalna količina nizkoenergijskega elektrona, ki nosi informacijo o atomski zgradbi ali dinamiki atomskega trka, popolnoma spremeni že pri enem samem trku elektrona z atomom. Prosta pot elektrona mora biti veliko večja od razdalje med tarčo in detektorjem. Elektronski analizator zato postavimo v vakuumsko celico za visoki vakuum. Merjenje na plinski tarči izvajamo z vpihovanjem plina skozi šobo v vakuumski sistem. Lokalna gostota plinske tarče je ob močnem črpanju deset do stokrat večja od gostote plina daleč od izhodne šobe. Ravnesje med vpihovanjem plina in črpanjem moramo doseči pri takem tlaku, ki še omogoča delovanje detektorja za elektrone. Pri enokanalnih pomnoževalnikih je ta tlak okoli  $10^{-5}$  mbar. Ta zahteva omejuje pretok tarčnega plina pri vpuščanju v vakuumski sistem.

Za energije elektronov pod 2 keV so elektrostatski analizatorji bolj primerni od magnetnih zaradi njihove enostavnejše konstrukcije in večje fleksibilnosti. Energijsko porazdelitev elektronov iz tarče merimo z disperzijo elektronov v elektrostatskem polju. V spektrometru je potrebno odpraviti zunanje magnetno polje, tako da je mogoče tire elektronov pripisati le elektrostatskim vplivom. Zaradi tega je potrebno znotraj spektrometra odpraviti zunanje magnetno polje in se pri izbiri materialov za izdelavo sestavnih delov izogniti feromagnetnim snovem. Gostota zemeljskega mag-

netnega polja je v Ljubljani okoli 46 mT, njegova smer pa oklepa z vodoravnico približno  $60^\circ$  in kaže proti geografskemu severu. Zaščito je mogoče izvesti iz pločevine z visoko permeabilnostjo ali s Helmholtzovimi tuljavami. Za detekcijo elektronov z energijo nad 100 eV zadošča zmanjšanje gostote magnetnega polja pod  $1 \mu\text{T}$ , za detekcijo elektronov z energijami pod 10 eV pa je potrebno zmanjšati magnetno polje pod  $0,1 \mu\text{T}$ . Mejo  $1 \mu\text{T}$  v merilni komori je mogoče doseči z eno plastjo zaščitne pločevine ali z enim kompletom Helmholtzovih tuljav. Za gostote magnetnega polja v vakuumski komori pod  $0,1 \mu\text{T}$  pa je potrebno uporabiti dvoplastni oklep iz zaščitne pločevine ali kombinacijo enoplastnega oklepa in Helmholtzovih tuljav. Sedaj ščitimo spektrometer pred zunanjim magnetnim poljem s Helmholtzovimi tuljavami.

Vir za vzbujanje atomov mora dajati snop vzporednih žarkov z majhno divergenco in presekom največ okoli  $1 \text{ mm}^2$ . Zaradi zelo majhne gostote atomov v plinski tarči je zaželena čim večja intenziteta žarka. V ta namen smo izdelali elektronsko puško, ki daje snop vzporednih elektronov s premerom okoli 1 mm in energijami do 6 keV. S parom elektrostatskih deflektorjev je mogoče elektronski žarek odklanjati v prečni smeri. Značilni tokovi, ki jih daje puška, so med  $0,1 \mu\text{A}$  in  $200 \mu\text{A}$ .

## 2 Spektrometer

Na Odseku za fiziko nizkih in srednjih energij Instituta "Jožef Stefan" v Ljubljani smo sodelavci skupine za atomske spektroskopije izdelali spektrometer za merjenje atomskih spektrov na plinastih tarčah.

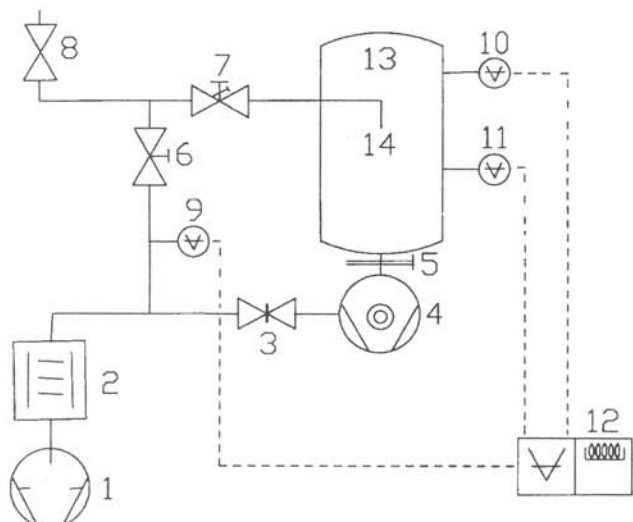
### 2.1 Vakuumski sistem

Vakuumski sistem spektrometra prikazuje slika 2. Za vzdrževanje visokega vakuuma v merilni celici skrbi turbomolekularna črpalka s črpalno hitrostjo 1600 l/min. Na izhodni strani turbomolekularne črpalke skrbi za predvakuum dvostopenjska rotacijska črpalka s črpalno hitrostjo  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ . Oljne pare, ki bi lahko dosegle vakuumski sistem zaradi delovanja rotacijske črpalke, se ujamejo v oljni pasti, ki je napolnjena z absorberjem ogljikovodikov. Na tak način dosegamo na izhodu turbomolekularne črpalke tlak  $2 \cdot 10^{-3}$  mbar brez prisotnosti oljnih par.

Maksimalna frekvenca vrtenja turbomolekularne črpalke je 600 Hz. Os rotorja je v spodnjem delu vpeta v mehanski ležaj z oljnim mazanjem, gornji ležaj, ki se nahaja v področju z nižjim tlakom, pa je magnetni. V zaprti vakuumski celici smo izmerili najnižji tlak  $2 \cdot 10^{-8}$  mbar. Kvaliteta vakuuma v komori je tako blizu optimalne, ki jo še lahko dosežemo s klasičnim vakuumskim sistemom brez dodatnega pregrevanja notranjih površin. Pri konstrukciji vseh delov smo se držali strogih meril pri izboru vakuumskih materialov.

Deli spektrometra so iz nerjavnega nemagnetnega jekla in aluminija. Zahtevnejši izolatorski kosi so izdelani iz obdelovalne keramike in cevi iz aluminijevega oksida.

Stene vakuumske komore so elektropolirane. S tem procesom je učinkovita površina sten, na katerih se adsorbirajo vodne molekule, močno zmanjšana. Z dodatnim sistemom za ogrevanje bi bilo mogoče spektrometer uporabljati v zelo visokem vakuumu, ki ga zahtevajo merilne metode na površinah trdnih snovi.



Slika 2: Vakuumski sistem spektrometra. 1: rotacijska črpalka, 2: sorpcijska past, 3: vratni ventil, 4: turbomolekularna črpalka, 5: priključek turbomolekularne črpalke s prirobnico CF 250, 6: ročni ventil za črpanje plinske napeljave, 7: dozirni ventil za uvajanje tarčnega plina, 8: reducirni ventil za tarčni plin, 9: glava merilnika grobega vakuma, 10: glava merilnika grobega vakuma v vakuumski posodi, 11: glava ionizacijskega merilnika, 12: sistem vakuumskih merilnikov in zaščitnih relejev, 13: vakuumska posoda, 14: plinska igla.

V normalnih delovnih razmerah mora turbočrpalka ob zagonu v 30 minutah doseči 80% maksimalne frekvence vrtenja. V nasprotnem primeru se napetostni izvir turbočrpalke samodejno izklopi. V primeru izpada električne energije zaščitni relejni sistem prepreči ponoven vklop občutljivih komponent spektrometra. Vakuumske razmere v sistemu merimo in kontroliramo z integriranim sistemom merilnikov in kontrolnih relejev. Grobi vakuum v območju do  $10^{-3}$  mbar merita dva konvektora. Visoki vakuum merimo z ionizacijskim merilnikom. Nanj je priključen zaščitni rele, ki izklopi celotno napravo pri previsokem tlaku v vakuumski celici.

Ko v merilni celici dosežemo tlak okoli  $10^{-7}$  mbar, so ustvarjeni pogoji za pričetek eksperimenta. V vakuumsko komoro uvajamo izbrani tarčni plin iz izbrane plinske linije skozi igelni ventil in izpušno šobo z izhodom tik nad interakcijskim področjem. Z igelnim ventilom naravnamo tlak v komori na izbrano vrednost med  $10^{-6}$  in  $10^{-5}$  mbar.

## 2.2 Elektrooptične lastnosti spektrometra

Predvidene meritve atomskih procesov so narekovale izbor analizatorske geometrije z dovolj velikim sprejemnim kotom in veliko ločljivostjo. Zaradi enostavnosti in fokusiranja drugega reda smo se odločili za planparalelni analizator z vpadnim kotom  $30^\circ$  /1,2/. Ker raziskujemo dogodke z majhno pogostostjo, potrebujemo spektrometer, ki zajema elektrone iz velikega interakcijskega volumna. Običajno točkasto interakcijsko območje spektrometra smo zamenjali z daljico, ki je določena s potjo vzbujevalnega elektronskega žarka skozi oblak plinske tarče. Pred planparalelni analizator

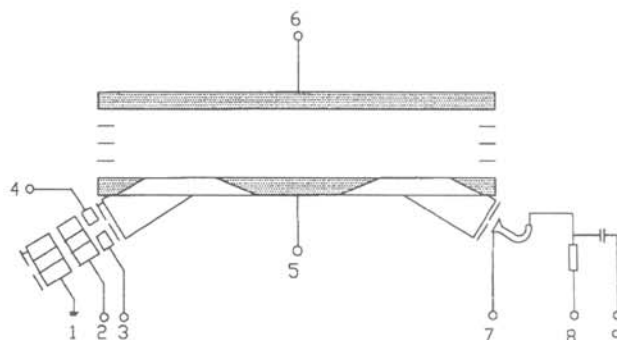
smo postavili elektronsko lečo iz vzporednih rež, ki ustreza taki geometriji in poveča sprejemni prostorski kot spektrometra, hkrati pa lahko z zaviranjem elektronov izboljša energijsko ločljivost sistema. Relativna ločljivost elektrostatskega analizatorja  $\Delta E/E$  je teoretično neodvisna od prepustne energije  $E$ . Zaradi tega je z zaviranjem elektronov pred analizatorjem mogoče dosežati poljubno visoke ločljivosti  $\Delta E$ . Ker z zaviranjem zmanjšamo širino detekcijskega okna, s tem zmanjšujemo tudi števno hitrost v eksperimentu. Geometrijske distorzije in parazitska polja nas omejujejo pri izbiri ekstremnega zaviranja, saj postane njihov vpliv na tire elektronov z nizkimi energijami pomemben.

Merilni program dovoljuje spreminjanje napetosti na vseh napetostnih kanalih hkrati v odvisnosti od merjene energije. S tem je mogoče ohranjati konstantno prepustnost spektrometra v velikih energijskih intervalih.

Z zaviranjem elektronov pred ustjem enokanalnega pomnoževalnika močno zmanjšamo ozadje v spektru. Hitri elektroni v analizatorju trčijo v kovinske stene in izbijajo sekundarne elektrone, ki lahko zadenejo ustje enokanalnega pomnoževalnika. Večina sekundarnih elektronov ima pred ustjem enokanalnega pomnoževalnika nižjo energijo od elektronov iz plinske tarče. Ozadje v spektru močno zmanjšamo, če na ustje enokanalnega pomnoževalca pripeljemo negativno napetost, ki prepusti do ustja le elektrone z dovolj visoko energijo.

Kvantni izkoristek enokanalnega pomnoževalnika je močno odvisen od energije elektronov pri vpadu na ustje. Pri vpadnih energijah pod 50 eV začne kvantni izkoristek padati. Ugodno je, če je mogoče izbrani del spektra meriti pri vpadnih energijah elektronov nad to mejo. Napetost na ustju enokanalnega pomnoževalnika zato spreminjamo tako, da je kinetična energija elektronov pri trku z njegovo površino konstantna vzdolž merjenega spektra.

Vhodna leča mora med meritvijo preslikati elektrone z izbrano energijo s področja tarče na odprto vhodno reže v analizator. Med meritvijo spreminjamo izbrano



Slika 3: Elektrostatski analizator in optični elementi. Številke označujejo kontrolne napetosti sistema. 1: vhodna elektroda leče z vhodno zaslonko, ki definira vstopni kot elektronov je na zemeljskem potencialu; 2: fokusna elektroda leče, 3,4: deflektorska elementa za korekcijo vhodne smeri; 5: spodnja plošča analizatorja; 6: zgornja plošča analizatorja; 7: ustje enokanalnega pomnoževalnika, 8: pomnoževalna napetost na enokanalnem pomnoževalniku, 9: izhodni signal v predojačevalnik.

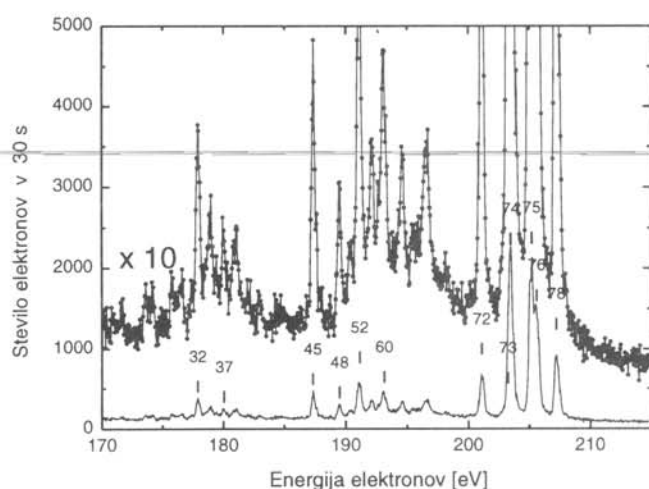
energijo elektronov, zato moramo spreminjati tudi napetost na srednji elektrodi leče. Brez tega pride do velikih sprememb prepustnosti spektrometra vzdolž merjenega spektra. Z numerično simulacijo vhodne optike smo ugotovili karakteristiko leče, ki ji lahko sledimo med meritvijo in s tem ohranjamo prepustnost sistema.

Zbiranje podatkov iz eksperimenta poteka prek vodila VME. Med meritvijo krmilimo osem kanalov digitalno-analognih pretvornikov, s katerimi upravljamo napetostne izvire. Na vodilu VME se nahajata tudi števec sunkov z enokanalnega pomnoževalnika in vhodno-izhodni modul, s katerim krmilimo števec. Merilni program smo razvili v programskem jeziku C++ s programsko knjižnico paketa LabWindows<sup>1</sup>. Detekcijski sistem je oblikovan modularno in omogoča enostavno spreminjanje postavitve.

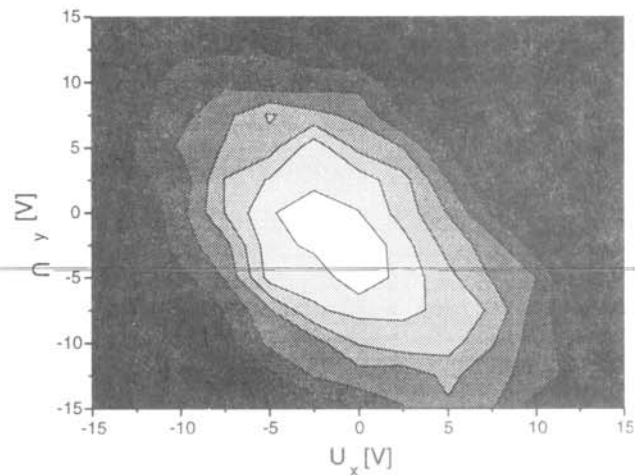
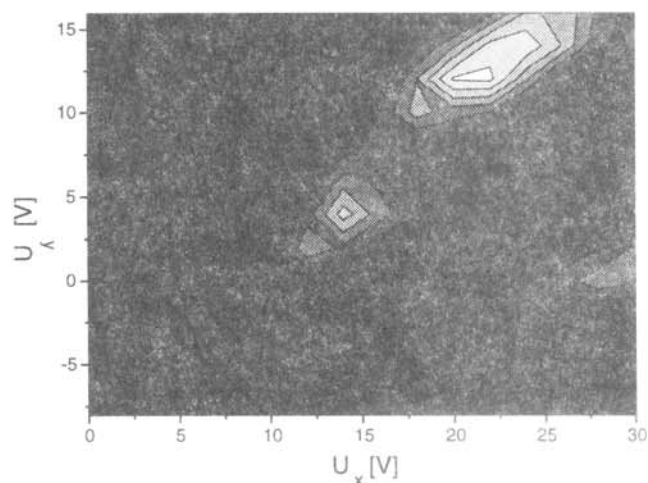
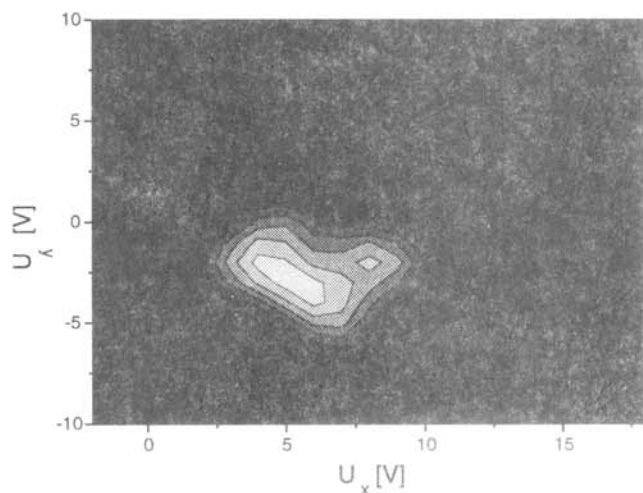
### 3 Delovanje spektrometra

Izmerjeni Augerjev spekter LMM v argonu prikazuje slika 4. Vzbujejo začetno stanje argonovega atoma z eno vrzeljo v lupini L<sub>1</sub> ali L<sub>23</sub> razpade z izsevanjem Augerjevega atoma. Končna stanja imajo dve vrzeli v lupinah M<sub>1</sub> ali M<sub>23</sub>. Števila označujejo diagramske prehode /3/. Neoznačeni prehodi predstavljajo razpade satelitskih stanj z dodatno vrzeljo v lupini M v začetnem stanju in satelitske prehode, pri katerih ima atom v končnem stanju dodatno vzbujen elektron v višjo, še nezasedeno lupino.

Prvo fazo uravnave spektrometra prikazuje slika 5. Izohipse pomenijo jakost toka na centralnem delu Faradayeve čaše, jakost toka na igli za vpihanje tarčnega plina in števno hitrost Augerjevih elektronov v vrhu prehoda L<sub>3</sub>M<sub>23</sub>M<sub>23</sub> <sup>1</sup>D<sub>2</sub> (na sliki 4 označen s 74) v argonu v odvisnosti od smeri elektronskega žarka. Meritve so izvedene z elektronskim žarkom energije 600 eV. Napetost 10 V na deflektorju elektronske puške ustreza odklonu žarka za 1,8 mm v področju plinske igle in 5 mm v področju Faradayeve čaše. S prve slike

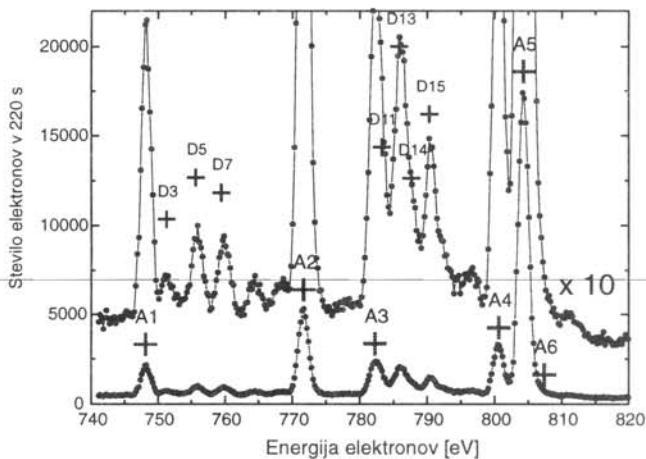


Slika 4: Argonov Augerjev spekter LMM. Števila označujejo energije diagramskih prehodov.

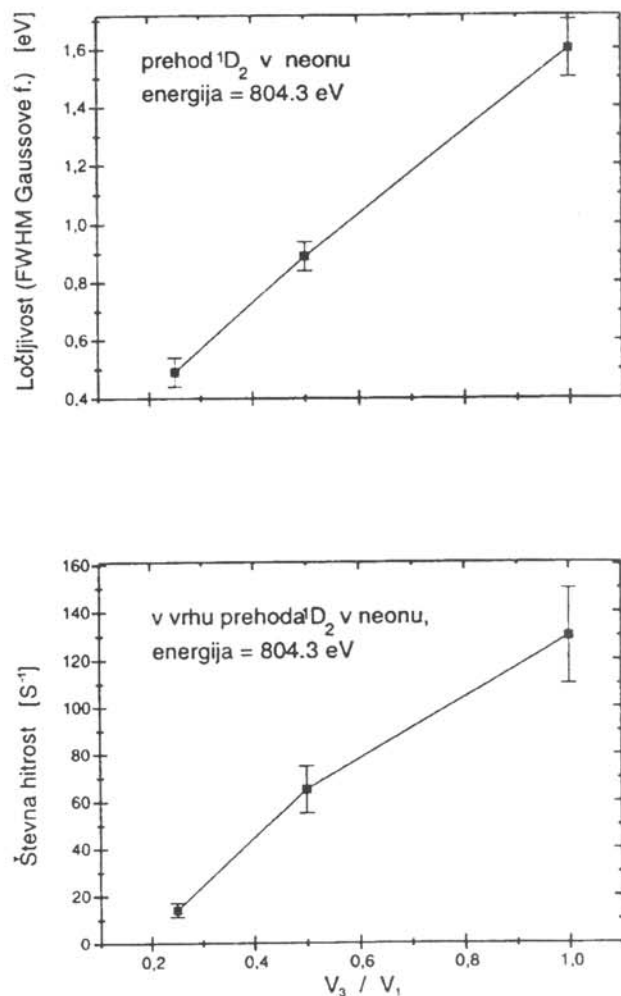


Slika 5: Tok elektronov na centralnem delu Faradayeve čaše, tok elektronov na plinski igli in števna hitrost Augerjevih elektronov v vrhu prehoda L<sub>3</sub>M<sub>23</sub>M<sub>23</sub> <sup>1</sup>D<sub>2</sub> v argonu v odvisnosti od napetosti na deflektorjih elektronske puške. Napetost 10 V na deflektorju elektronske puške ustreza prečnemu odklonu žarka za 1,8 mm v področju plinske igle in interakcijskega volumna ter prečnemu odklonu 5 mm v področju Faradayeve čaše.

<sup>1</sup> LabWindows je zaščitena znamka firme National Instruments



Slika 6: Neonov Augerjev spekter KLL. A: diagramski prehodi iz začetnega stanja z vrzeljo v lupini K, D: satelitski prehodi iz začetnega stanja z eno vrzeljo v lupini K in eno vrzeljo v lupini L



Slika 7: Ločljivost in števna hitrost spektrometra na vrhu  $^1D_2$  v neonu v odvisnosti od faktorja zaviranja. Spekter smo vzbujali z elektroni energije 3 kV, tok je bil 12  $\mu A$ , tlak v komori pa  $2 \cdot 10^{-6}$  mbar.

je razvidno, da je treba Faradayevo čašo premakniti za 2,5 mm v horizontalni smeri, da bo uravnana s centralno smerjo žarka in dvigniti za 1,2 mm. Druga slika prikazuje uravnano plinske igle glede na elektronski žarek. Svetle lise prikazujejo plinsko iglo s premerom 1,3 mm, svetlejša v spodnjem desnem delu slike pa električno povezavo za odvajanje naboja z igle. Za optimalno delovanje je potrebno iglo premakniti za približno 1 mm navzgor. Iz prikaza števne hitrosti analizatorja v odvisnosti od smeri elektronskega žarka je razvidno, da je uravnava analizatorja dobra. Optimalno območje oklepa z navpičnico smer, ki se ujema z vpadno smerjo v elektronski analizator ( $30^\circ$  glede na navpičnico).

Slika 6 prikazuje Augerjev spekter KLL v neonu, ki je bil izmerjen z lastno ločljivostjo analizatorja. Vhodna leča je pri tem delovala kot Einzelova leča - vhodna in izhodna elektroda vhodne leče sta bili na zemeljskem potencialu. Z A so označeni diagramski, z D pa satelitski prehodi v neonu /4/.

Slika 7 prikazuje ločljivost in števno hitrost v vrhu Augerjevega prehoda  $^1D_2$  (oznaka A5 na sliki 6) v neonu pri energiji 804,3 eV v odvisnosti od faktorja zaviranja.

#### 4 Sklep

Zgradili smo elektronski spektrometer za detekcijo elektronov iz plinastih tarč z energijami pod 3 keV, ki deluje stabilno in zanesljivo. Z majhnimi spremembami bi ga bilo mogoče prilagoditi tudi za merjenje na površinah trdnih snovi. Sedaj izvajamo na spektrometru meritve hipersatelitskih prehodov v neonu /5/, iz katerih bomo ugotovili preseke za dvojno ionizacijo lupine K v neonu pri vzbujanju z elektroni.

V tem letu predvidevamo selitev naprave v prostore v Podgorici na lokacijo novega ionskega pospeševalnika, kjer bodo že letos na voljo visokoenergijski ionski žarki za vzbujanje tarčnih atomov. Konstruirali bomo magnetni ščit iz pločevine z visoko permeabilnostjo. V spektrometer bomo vgradili polprevodniški detektor rentgenskih žarkov, ki bo omogočal istočasno merjenje fotonov spektrov. S tako oblikovanim sistemom predvidevamo izvedbo prvih koincidenčnih meritev med elektroni in fotoni iz atomskih procesov v notranjih lupinah.

#### 5 Literatura

- /1/ G. A. Proca in T. S. Green, Rev. Sci. Instrum. 41, (1970) 1778
- /2/ D. Roy in D. Tremblay, Rep. Prog. Phys. 53, (1990) 1621
- /3/ L. Asplund, P. Kelfve, B. Blomster, H. Siegbahn in K. Siegbahn, Phys. Scr. 16, (1977) 268
- /4/ A. Albiez, M. Thoma, W. Weber in W. Mehlhorn, Z. Phys. D 16 (1990), 97
- /5/ Ž. Šmit, M. Žitnik, L. Avaldi, R. Camilloni, E. Fainelli, A. Mühleisen in G. Stefani, Phys. Rev. A 49, 1480 (1994)

#### Zahvala

K izgradnji spektrometra so prispevali sodelavci z Inštituta in ljudje izven njega. Dr. Jože Gasperič je izdelal načrt vakuumske komore, Marjan Ravnikar je pomagal s svojimi bogatimi izkušnjami in z detektorjem tesnjenja. Celoten spektrometer je bil skrbno izdelan v Inštitutski delavnici. Vsem imenovanim in neimenovanim se iskreno zahvaljujemo za njihov trud in vloženo znanje.

# ELEKTRONSKE LASTNOSTI MEJNIH PLASTI V HETEROSTRUKTURAH ZnSe/GaAs(001): KLJUČ DO MODREGA LASERJA?

Gvido Bratina, Fotona, d.d., Stegne 7, 1210 Ljubljana

## Electronic properties of ZnSe-GaAs(001) heterointerfaces: a key to the blue laser?

### ABSTRACT

ZnSe-GaAs(001) heterostructures are one of the staple systems in novel solid-state blue lasers. Electronic properties in these heterovalent interfaces are likely to depend on the microscopic interface environment. We have shown that ZnSe-GaAs(001) heterojunction valence band offset can be tuned in the range from 0.4 eV to 1.2 eV by controlling the composition of the interface through variations in the composition of the growing front. Se-rich growth conditions yield Se-rich interfaces with the resulting low value of the band offset. Zn-rich growth conditions yield Zn-rich interfaces with the resulting high value of the band offset.

### POVZETEK

Heterostruktura ZnSe-GaAs(001) je eden od najpomembnejših delov v modernih trdnih laserjih. Elektronske lastnosti na teh heterovalenčnih mejnih plasteh so najverjetneje odvisne od sestave v neposredni okolici meje. Pokazali smo, da je mogoče nadzorovano spreminjati zamik valenčnega pasu na meji v območju od 0,4 do 1,2 eV. Te spremembe so dosegljive s spreminjanjem sestave atmosfere med rastjo kristalov. Okolje, bogato s selenom, privede do mejnih plasti s presežkom selena in nizke vrednosti nezveznosti valenčnega pasu. Okolje, bogato s cinkom, pa privede do mejnih plasti s presežkom cinka in nizke vrednosti nezveznosti valenčnega pasu.

## 1 Uvod

Polprevodniški viri modre in modro-zelene koherentne svetlobe so zanimivi predvsem pri optičnem shranjevanju podatkov in v komunikacijah. Obe področji sta tržno zelo konjunktorni in zato so razumljivi precejšnji napor, ki jih vlagajo številni industrijski in univerzitetni laboratoriji v razvoj teh elementov. Zaradi krajše valovne dolžine bi bila gostota informacij, zapisana na ustrezni podlagi, vsaj štirikrat večja od tiste, zapisane s svetlobo valovne dolžine 640 nm, ki se trenutno uporablja v optičnih zapisih. Večina raziskav je posvečena kvantnim strukturam, izdelanim iz GaN, SiC in ZnSe/GaAs, med katerimi je največ preiskav opravljenih na sistemih, ki temeljijo na heterostrukturah ZnSe/GaAs.

Ena od najpomembnejših količin, ki označijo izbrano heterostrukturo v smislu elektrooptičnih značilnosti, je nezveznost energijskih pasov na meji med dvema polprevodnikoma. Ta količina namreč učinkuje na lokalizacijo oziroma transport nosilcev naboja preko mejne plasti ter tako določa kvantni izkoristek optoelektronskih elementov. Moderne teorije s tega področja /1,2,3/ kažejo na to, da sta predznak in velikost energijskega skoka v izovalenčnih heterostrukturah (npr. AlAs/GaAs, InGaAs/GaAs) odvisna od elektronskih značilnosti obeh kristalov in da sta relativno neobčutljiva za dogajanja na mejni plasti. Nasprotno pa sta ti dve količini v heterovalenčnih heterostrukturah (npr. Si/GaAs, ZnSe/GaAs, CdTe/GaAs) funkciji kemijske sestave, kristalografske orientacije in strukture v neposredni okolici (nekaj atomskih plasti) mejne plasti. Ta odvisnost daje slutiti možnost umetnega spreminjanja poteka energijskih pasov na heterovalenčni meji z nadzorom dogajanj v njeni neposredni okolici.

Taka možnost bi bila posebej dobrodošla v primeru heterostrukture ZnSe-GaAs(001), ki je osnovni element modrih laserjev. Laserski element je navadno izdelan z epitaksijo z molekularnimi curki na podlagi GaAs. Uporabo le-teh narekujejo težave, povezane s sintezo ZnSe podlag z zadovoljivo nizko koncentracijo razsežnih kristalografskih napak. Kvantna jama iz ZnCdSe, kjer pride do optičnih prehodov med energijskimi nivoji, je vpeta med barieri ZnSe, ki sta obdani z ZnSse. Ker ima ZnSse večji lomni količnik od ZnSe, pride na mejah med ZnSe in ZnSse do totalnega odboja svetlobe, ki se izseva iz kvantne jame pri rekombinaciji elektronov in lukenj.

Največje težave pri taki strukturi izhajajo iz visoke vrednosti nezveznosti v valenčnem pasu na meji ZnSe-GaAs, kar narekuje uporabo n-tipa GaAs (zaradi olajšanega transporta elektronov iz GaAs v ZnSe) in p-tipa ZnSe. Znano pa je, da je izdelava kovinskih stikov na p-ZnSe izjemno problematična zaradi visoke uporabnosti /4/, kar povzroča veliko sproščanje jouske toplote in s tem zmanjšanje trajnosti laserja. Znižanje energijskega skoka na meji ZnSe-GaAs bi torej pripeljalo do uporabe p-tipa GaAs ter n-tipa ZnSe, kar bi pomenilo kvalitetnejše stike na strukturi in torej povečano trajnost.

V laboratorijih TASC-INFM in na Univerzi v Minnesoti smo se s kontroliranim spreminjanjem poteka energijskih pasov na mejni plasti med različnimi sestavljenimi polprevodniki ukvarjali več let in smo izkušnje prenesli na heterostrukturo ZnSe/GaAs. V tem članku so opisani poizkusi, s katerimi smo pokazali, da lahko energijski skok na mejni plasti znižamo, z ustrežno izbiro pogojev rasti ZnSe(001) na GaAs(001), na vrednosti okrog 0,4 eV.

## 2 Eksperimentalno delo

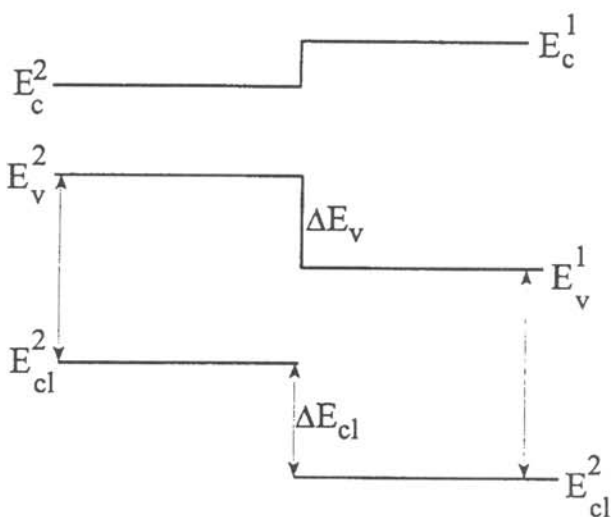
Heterostrukture ZnSe/GaAs(001) smo sintetizirali z metodo epitaksije z molekularnimi curki v ultravisokovakuumski (UVV) posodi s končnim tlakom  $1,1 \cdot 10^{-10}$  mbar. Pred naparevanjem ZnSe smo na ustrezno očiščeno podlago GaAs neparili 1  $\mu$ m debelo epitaksialno plast GaAs pri 580 °C ter nato pri temperaturi -30 °C še okrog 2  $\mu$ m debelo plast As, ki je učinkovito zaščitila GaAs pred oksidacijo. Tako pripravljene podlage smo prenesli v UVV posodo, prirejeno za naparevanje ZnSe. Uporabili smo elementne Knudsenove izvire cinka in selena in naparevali ZnSe na GaAs pri temperaturi 290 °C in pri različnih razmerjih med gostotama curkov Zn atomov in Se molekul /5/. Koncentracije smo določili z ionizacijskim merilnikom, postavljenim v vidnem polju izvirov, in s kvadropolnim masnim spektrometrom. Hitrost rasti smo preverjali z merjenjem oscilacij intenzitete uklonskih maksimumov hitrih elektronov, pospešenih z energijo 10 keV, na površino pod kotom, manjšim od 2° C, kakor tudi z merjenjem slabenja fotoemisije iz lupinskega nivoja Ga 3d podlage GaAs v odvisnosti od debeline ZnSe. Neparili smo plasti z debelinami od 2 Å do 1  $\mu$ m.



Elektronske lastnosti tako pripravljenih heterostruktur smo preiskali s fotoemisijo. Pri tem smo uporabljali monokromatiziran izvir rentgenskih žarkov Al  $K_{\alpha}$  in polkrožni analizator energije elektronov z večkanalnim detektorjem. Celotna ločljivost sistema je bila 0,7 eV. Zamik valenčnih pasov bi v principu najlaže merili s fotoemisijo v bližini vrha valenčnega pasu heterostrukture. Žal pa je presek za fotoefekt v tem energijskem območju zelo majhen, kar oteži analizo. Precej bolj natančno pa lahko določimo lego lupinskih nivojev. Pri takem določevanju nezveznosti valenčnega pasu na mejni plasti ( $\Delta E_v$ ) upoštevamo dejstvo, da so energijske razdalje med lupinskimi energijskimi nivoji in vrhom valenčnega pasu značilne za izbran material [6]. Metoda je ponazorjena s sliko 1, kjer so prikazani vrh valenčnega pasu ( $E_v$ ) in dno prevodnega pasu ( $E_c$ ), energijska nezveznost na meji ( $\Delta E_v$ ) ter energiji izbranih lupinskih nivojev ( $E_{cl}(1)$  in  $E_{cl}(2)$ ). Pri merjenju  $\Delta E_v$  najprej izmerimo razdalji  $E_v(1) - E_{cl}(1)$  in  $E_v(2) - E_{cl}(2)$  v obeh ločenih polprevodnikih. Na ta način določimo lege lupinskih nivojev v odsotnosti morebitnih dipolnih potencialov na mejni plasti. Ob izdelavi heterostrukture se medsebojna razdalja lupinskih nivojev spremeni zaradi prilagoditve pasovnih struktur. Meritev  $E_{cl}(1)$  in  $E_{cl}(2)$  na taki heterostrukturi torej odseva spremembo poteka energijskih pasov preko meje ob stiku dveh polprevodnikov, tako da lahko določimo  $\Delta E_v$  iz enačbe:

$$\Delta E_v = [(E_v(1) - E_{cl}(1)) - (E_v(2) - E_{cl}(2))] - [E_{cl}(1) - E_{cl}(2)]$$

Heterostrukturo pripravimo tako, da je plast gornjega polprevodnika dovolj tanka, da še omogoča detekcijo lupinskih nivojev iz spodnjega polprevodnika. Za fotoelektrone, ki jih iz lupinskih nivojev izbijemo z rentgenskimi fotoni Al  $K_{\alpha}$ , je taka debelina do 300 nm.



Slika 1. Shematski prikaz elektronske energijske pasovne strukture v bližini mejne plasti v heterostrukturi. Dno prevodnega pasu je označeno z  $E_c$ , vrh valenčnega pasu je označen z  $E_v$ . Z  $E_{cl}(1)$  in  $E_{cl}(2)$  sta označeni legi lupinskih nivojev v obeh polprevodnikih.  $\Delta E_v$  pa označuje nezveznost valenčnega pasu na meji med dvema polprevodnikoma.

### 3 Rezultati in diskusija

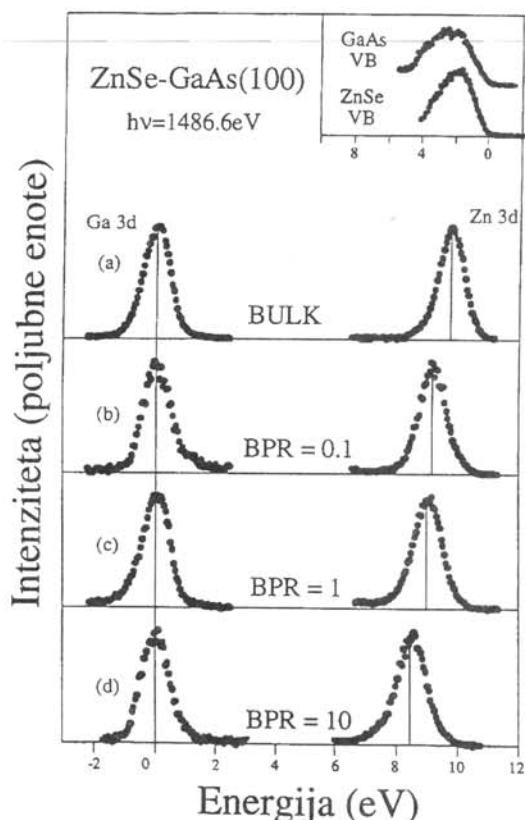
Izkazalo se je, da razmerje med Se in Zn med napajanjem ZnSe na GaAs pomembno vpliva na rekonstrukcijo površine. Tako dobimo med napajanjem v okolju, bogatem s Se, površinsko rekonstrukcijo,  $2 \times 1$ , med napajanjem v okolju, bogatem s cinkom, pa površinsko rekonstrukcijo  $c(2 \times 2)$ , kot smo ugotovili z uklonom elektronov, pospešenih z energijami 10 keV na površino ZnSe pod ostrim kotom. Črtaste uklonske slike, dobljene med celotno fazo napajanja, kažejo na to, da kljub pogojem rasti, ki so daleč od stehiometrije, kristal raste urejeno. Pri tem je pomembno, da je tak slojevit (layer-by-layer) način rasti že od začetka nukleacije. Urejena struktura pomeni, da lahko preiščemo elektronske lastnosti tako sintetiziranih heterostruktur brez bojazni, da bi morebitne kristalografske napake vplivale na pasovno strukturo znotraj dosega fotoemisije.

Na sliki 2 sta prikazana lupinska nivoja Zn 3d in Ga 3d, izmerjena na sveže naperjenih ločenih plasteh ZnSe in GaAs (2a) in na izgotovljenih heterostrukturah ZnSe/GaAs (b-d). Plast ZnSe je bila naperjena v atmosferi, bogati s Se (slika 2b), stehiometrični atmosferi (slika 2c) in v atmosferi, bogati s cinkom (slika 2d), njegova debelina pa je bila 15 Å. Manjša slika prikazuje vrhove valenčnih pasov v obeh materialih. Vrhove valenčnih pasov smo umetno poravnali, izmerili vse energije glede na tako dobljeno energijo in premaknili ničlo energijske skale na energijo nivoja Ga 3d v debelem GaAs (slika 2a).

Na tako izbrani energijski skali pomeni gornji par "lupinski rezultat", ki bi ga dobili z merjenjem na hipotetični heterostrukturi ZnSe/GaAs z  $\Delta E_v = 0$  eV. Energijska razlika med gornjim parom in spodnjimi pari lupinskih nivojev je torej v tej predstavitvi enaka  $\Delta E_v$ . Tako lahko razberemo, da je  $\Delta E_v$  (ZnSe-GaAs) v primeru napajanja ZnSe z BPR=0,1 (slika 2b) enak 0,43 eV, pri BPR=1 (slika 2c) je  $\Delta E_v = 0,78$  eV, pri BPR=10 pa je  $\Delta E_v = 1,20$  eV.

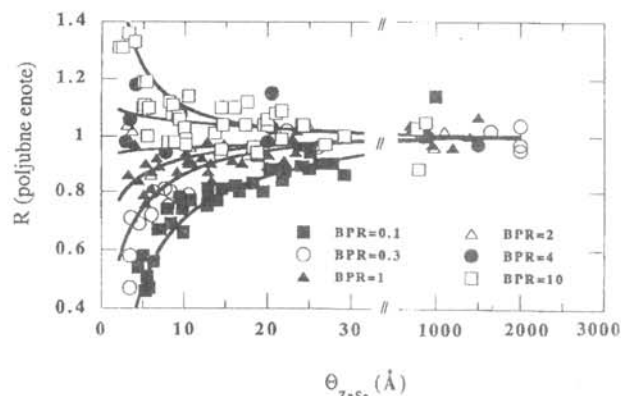
Ugotavljamo, da lahko s spreminjanjem pogojev napajanja učinkujemo na potek energijskih pasov na mejni plasti heterostrukture. Izkaže se, da je pojav zvezen: zamik energijskih pasov se manjša od okrog 1,2 eV za heterostukture, naperjene z BPR=10, do okrog 0,4 eV za heterostukture, naperjene z BPR=0,1. Vmesne vrednosti  $\Delta E_v$  pa so dosegljive z izbiro ustreznega razmerja med Zn in Se.

Da bi dobili več vpogleda v ta pojav, smo določili sestavo plasti ZnSe v zgodnjih fazah rasti (4-30 Å) z merjenjem intenzitet lupinskih nivojev Zn 3d in Se 2p. Izkazalo se je, da so plasti, naperjene v atmosferi, bogati s Se, obogatene s Se, medtem ko so tiste naperjene v s cinkom nasičeni atmosferi, obogatene s cinkom. To je ilustrirano na sliki 3, ki prikazuje sestavo plasti ZnSe, izraženo v obliki razmerja intenzitet Zn 3d in Se 3d (R), normaliziranega na razmerje, dobljeno na debelem kosu ZnSe, v odvisnosti od debeline plasti za različne BPR. Za debeline, manjše od približno 15 Å, so odkloni od stehiometrične sestave ZnSe ( $R \gg 1$ ) precejšnji. Z večanjem debeline ZnSe se ti odkloni manjšajo in v celoti izginejo za vse BPR, ko debelina plasti ZnSe doseže okrog 30 Å. Spremembe v sestavi atmosfere med napajanjem torej bistveno vplivajo na sestavo plasti ZnSe slojev blizu mejne plasti.



Slika 2. Manjša slika: emisijska spektra fotoelektronov iz stanj v bližini vrha valenčnih pasov v 1 mm debelem GaAs(001), naparjenem pri 580 °C (zgoraj), ter 100 nm debelem ZnSe(001), naparjenem na GaAs(001) pri 290°C (spodaj). Vrhova valenčnih pasov sta bila dobljena z linearno ekstrapolacijo vodilne strmine na ozadje sekundarnih elektronov. Večja slika: (a) emisijska spektra fotoelektronov iz lupinskih nivojev Ga 3d (levo) in Zn 3d (desno), izmerjena posebej na vzorcih z manjše slike. Energije so izmerjene glede na poravnana vrhova valenčnih pasov v GaAs in ZnSe (manjša slika). Ničla energijske skale je postavljena na lego Ga 3d nivoja, (b) emisijska spektra fotoelektronov iz lupinskih nivojev Ga 3d (levo) in Zn 3d (desno), izmerjena na izgotovljeni heterostrukturi ZnSe-GaAs, sestavljeni iz 15 Å debelega ZnSe, naparjenega na GaAs(001) pri 290°C z razmerjem gostot molekularnih tokov cinkovih atomov in selenovih molekul (BPR) 0.1. Razlika med energijskima razlikama Ga 3d- Zn 3d iz (a) in (b) da  $\Delta E_v = 0,43$  eV. (c)emisijska spektra fotoelektronov iz lupinskih nivojev Ga 3d (levo) in Zn 3d (desno), izmerjena na izgotovljeni heterostrukturi ZnSe-GaAs, sestavljeni iz 15 Å debelega ZnSe, naparjenega na GaAs(001) pri 290°C z BPR=1. Razlika med energijskima razlikama Ga 3d- Zn 3d iz (a) in (c) da  $\Delta E_v = 0,78$  eV. (d) emisijska spektra fotoelektronov iz lupinskih nivojev Ga 3d (levo) in Zn 3d (desno), izmerjena na izgotovljeni heterostrukturi ZnSe-GaAs, sestavljeni iz 15 Å debelega ZnSe, naparjenega na GaAs(001) pri 290°C z BPR=10. Razlika med energijskima razlikama Ga 3d-Zn 3d iz (a) in (d) da  $\Delta E_v = 1,20$  eV.

Poudariti je tudi treba, da je sestava površinske plasti določena z odklonom od stehiometrije: pri naparevanju z mešanico, bogato s Se, dobimo kristal, sklenjen z atomi selena, in nasprotno, mešanica, bogata s cinkom, sklence kristal s cinkovimi atomi.



Slika 3. Sestava plasti ZnSe(001), naparjene na GaAs(001) pri 290°C, v odvisnosti od debeline plasti. Sestava je izražena kot razmerje med integralnima intenzitetama emisije fotoelektronov iz lupinskih nivojev Zn 3d in Ga 3d. Posamezni simboli ustrezajo vzorcem, naparjenim z različnimi BPR. Črte so narisane samo kot vodilo in ne ustrezajo nikakršni numerični analizi.

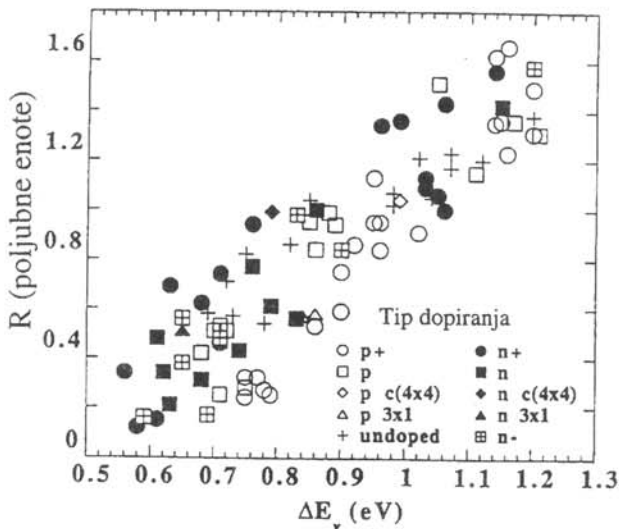
Slika 4 prikazuje odvisnost  $\Delta E_v$  od sestave prvih treh ångstremov ZnSe na GaAs. Izmerili smo več vzorcev, naparjenih tako na p-tipu GaAs (beli simboli), kot na n-tipu (črni simboli). Energijsko razdaljo pa smo izmerili na debelinah ZnSe od 20 do 40 Å. Ugotovili smo, da  $\Delta E_v$  monotono narašča z višanjem deleža Zn v ZnSe, in to ne glede na debelino ZnSe ali tip dopiranja podlag. Izmerjene spremembe v  $\Delta E_v$  torej ne morejo biti odsev dopiranja kristalov zaradi difuzije preko mejne plasti, saj bi v tem primeru opazili odvisnost  $\Delta E_v$  od oddaljenosti od meje oziroma od debeline ZnSe plasti. Prav tako pa bi v primeru, da bi bil opaženi pojav posledica dopiranja, morali opaziti razlike med različnimi dopanti.

Vzroke za tako vedenje je težko dognati, saj so procesi omejeni na medatomske razdalje in je njihova neposredna analiza otežena. Nekaj vpogleda nam lahko ponudi teorija. Tržaška skupina, zbrana okrog prof. Baldereschija, je razvila model linearnega odziva /7/, s katerim lahko računajo zamik valenčnih pasov na meji med dvema polprevodnikoma. Njihovi računi /8/ kažejo, da je  $\Delta E_v$  lahko funkcija mešanja atomov samo na eni ali dveh atomskih plasteh na obeh straneh meje. Najnižji  $\Delta E_v$  so izračunali za primer, ko pride do izmenjave atomov As in Se v razmerju 50/50 na dveh sosednjih plasteh, kar je v skladu z našimi meritvami za mejne plasti, bogate s Se. V primeru mešanja kationov preko meje pa teorija pokaže povišan  $\Delta E_v$ .

Na podlagi teh dognanj lahko predvidevamo, da pride pri naparevanju ZnSe v mešanici, bogati s selenom, do pospešene izmenjave As-Se, kar povzroči nastanek električnega dipolnega momenta na meji. Predznak

tako nastalega potenciala je tak, da se  $\Delta E_v$  zniža glede na stehiometrično mejno plast. Nasprotno velja za ZnSe, obogaten s Zn, kjer pride do pospešene izmenjave kationov, kar zviša  $\Delta E_v$ .

Ne glede na to, kakšen je mehanizem spreminjanja  $\Delta E_v$ , lahko sklenemo, da je možno nadzorovano znižati  $\Delta E_v$  v heterostrukturah ZnSe/GaAs na samo 0,4 eV, kar



Slika 4. Zamik valenčnih pasov na meji ZnSe-GaAs ( $\Delta E_v$ ), prikazan kot funkcija sestave prvih treh ångstromov plasti ZnSe(001), naparjene na GaAs(001) pri 290°C. Posamezni simboli ustrezajo vzorcem, naparjenim pod različnimi BPR in na podlagah z različnim tipom dopantov.

je precej glede na vrednost 1 eV. Praktična uporaba tega mehanizma bo nedvomno prispevala k izboljšanju transporta lukenj preko mejne plasti ZnSe/GaAs in s tem k povečanju trajnosti trdnih modrih laserjev.

## Zahvala

Zahvaljujem se A. Franciosiju, L. Sorbu in sodelavcem na University of Minnesota in na SRC-University of Wisconsin-Madison za nesebično pomoč pri pripravi poizkusov.

## 5 Literatura

- 1/ S. Baroni, R. Resta, A. Baldereschi, in M. Peressi, v Spectroscopy of Semiconductor Microstructures, uredili G. Fasol, A. Fasolino in P. Lugli (Plenum, London, 1989)
- 2/ C. G. Van de Walle, Phys. Rev. B. 39 (1989) 1871.
- 3/ A. Muñoz, N. Chetty, in R. M. Martin, Phys. Rev. B 41 (1990) 2976.
- 4/ Y. Fan, Y. Han, L. He, J. Saraie, R. L. Gunshor, M. Hagerott, H. Jeon, A. V. Nurmikko, C. G. Hua in N. Otsuka, Appl. Phys. Lett. 63 (1993) 1812 in tamkajšnji viri.
- 5/ Pri izbranih pogojih naprejanja Se izstopa iz izvora v obliki dimera in tetramera.
- 6/ R. W. Grant in J. R. Waldrop, J. Vac. Sci. Technol. B 5. (1987) 1015
- 7/ A. Baldereschi, S. Baroni in R. Resta, Phys. Rev. Lett., 61, 734 (1988).
- 8/ R. Nicolini, L. Vanzetti, Guido Mula, G. Bratina, L. Sorba, A. Franciosi, M. Peressi, S. Baroni, R. Resta, A. Baldereschi, J. E. Angelo in W. W. Gerberich, Phys. Rev. Lett. 72, (1994) 294

## IZOBRAŽEVANJE O VAKUUMSKI TEHNIKI - 1997

Vse uporabnike vakuumske tehnike obveščamo, da so v letu 1997 predvideni naslednji strokovno izobraževalni tečaji:

### VZDRŽEVANJE VAKUUMSKIH NAPRAV 14.-15.april ter 20.-21.oktober 1997

Pod tem naslovom se obravnava predvsem tematika, ki jo srečujemo v tehniki grobega vakuuma. To je: delovanje, vzdrževanje in popravila rotacijskih črpalk, pregled in uporaba različnih črpalk, ventilov in drugih elementov, meritve vakuuma, hermetičnost in odkrivanje netesnosti v vakuumskih sistemih, materiali za popravila, tehnike čiščenja in spanja, skupno 20 šolskih ur, od tega tretjina praktičnih prikazov in vaj.

Cena tečaja je 32.000 SIT. Vsak tečajnik bo prejel tudi brošuro "Osnove vakuumske tehnike za vzdrževalce naprav" in potrdilo o opravljenem tečaju.

### OSNOVE VAKUUMSKE TEHNIKE 12.-14. maj ter 24.-26. november 1996

Pri tem tečaju je večji poudarek na teoretičnem razumevanju snovi. Obravnava so vsa že prej omenjena področja in poleg tega še: pomen in razvoj vakuumske tehnike, fizikalne osnove, črpalke za visoki vakuum, tankoplastne in druge vakuumske tehnologije, čisti postopki, analize površin ter doziranje, čiščenje in preiskave plinov - skupno 26 šolskih ur z vajami in ogledom inštituta.

Cena tečaja je 32.000 SIT. Udeleženci prejmejo zbornik predavanj "Osnove vakuumske tehnike" in potrdilo o opravljenem tečaju.

Oba tečaja se pričneta ob 8.00 uri v knjižnici Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, Ljubljana.

Prosimo zainteresirane, da se informativno javijo čimprej, za dokončno potrdilo udeležbe pa velja kopija položnice o plačilu - najkasneje tri dni pred pričetkom tečaja na naslov:

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije,  
Teslova 30, 1111 Ljubljana  
(št. žiro računa: 50101-678-52240).

Prijave sprejema organizacijski odbor (Koller, Spruk, Mozetič, Nemanič), ki daje tudi vse dodatne informacije (tel. 061 177-66-00, 126-45-92).

V primeru premajhnega števila kandidatov tečaj odpade, nteresenti bodo povabljeni na naslednji rok.

Tečaj "Osnove vakuumske tehnike za srednješolske predavatelje" bo predvidoma 10. in 11. novembra 1997 in bo posebej razpisan v informativnih glasilih za šolstvo. Name njen je popestrivitv pouka fizike in tehničnih znanj na srednjih in višjih šolah.

## ZASLONI ZA KATODNE ELEKTRONKE (II. del)

Lea Županc Mežnar, Inštitut za tehnologijo površin in optoelektroniko, Teslova 30, 1000 Ljubljana

### Screens for cathode-ray tubes (Part II)

#### ABSTRACT

Screen is the optical coating on the inner face plate of the cathode-ray tube, which converts the kinetic energy of the electron beam into the visible light. Screen includes the glass substrate and densely packed layer of the few microns large phosphor particles, coated by the aluminum film. In the article we will present the deposition methods of phosphor layer, the resolution and the light efficiency of the screen as well as the parameters which influence these two basic screen properties. We will also compare the conventional powder screens and newly developed thin film screens.

#### POVZETEK

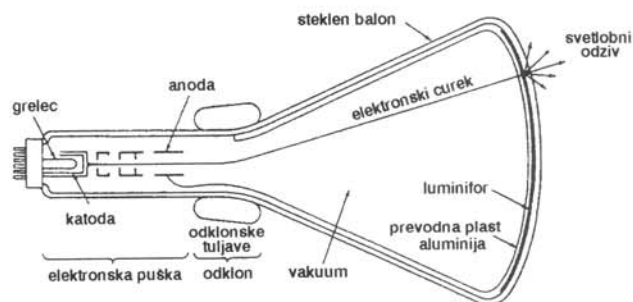
Optično plast na notranji čelni ploskvi katodne elektronke, ki kinetično energijo elektronov pretvarja v vidno svetlobo, imenujemo zaslon. Zaslon tvorijo steklena podlaga in gosto zložena plast nekaj mikrometrov velikih delcev luminiscentne snovi, prekrita z zvezno plastjo aluminija. V prispevku bodo predstavljene metode nanašanja luminiscentne plasti in osnovne lastnosti zaslonov, kot sta ločljivost in svetlobni izkoristek ter parametri, ki vplivajo na ti dve lastnosti. Na koncu bo podana tudi primerjava navadnih praškastih in novejših tankoplastnih zaslonov.

### 1 UVOD

V prvem delu prispevka /1/ sem predstavila pojav luminiscence in katodoluminiscence ter osnovne lastnosti luminiscentnih snovi, kot so: barva, svetlobni odziv, persistenca, kemijska sestava in morfološke lastnosti. V drugem delu pa bom predstavila zaslone za katodne elektronke in njihove lastnosti.

Katodne elektronke letos praznujejo svoj stoti rojstni dan. Zgodovinski pregled in osnove delovanja katodnih elektronk so bile že predstavljene v Vakuumistu /2,3/, zato bom le na kratko opisala princip njihovega delovanja.

Katodna elektronka je naprava, ki pretvarja električni signal v svetlobnega /4/. V grobem je sestavljena iz dveh sklopov: steklene cevi z zaslonom na čelni ploskvi in elektronske puške v notranjosti (slika 1). Katoda je izvir elektronov, ki se v anodnem delu zberejo in pospešijo do energije 5-30 keV, v odklonskem delu (magnetnem polju tuljav ali električnem polju med ploščama) pa se odklonijo v določeno točko na zaslonu.

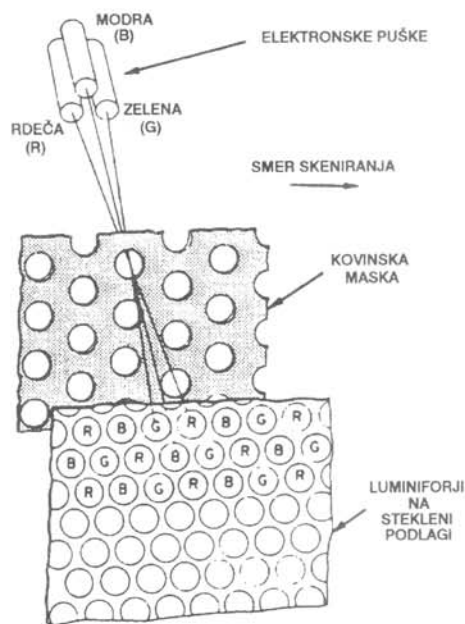


Slika 1. Katodna elektronka z elektrostatskim fokusiranjem in magnetnim odklonom /4/

V elektronki je visoki vakuum ( $10^{-7}$  mbar), ki zagotavlja nemoteno gibanje elektronov ter stabilnost fizikalno-kemijskih procesov na katodi in zaslonu. Delovanje v visokem vakuumu in pri visokih napetostih zahteva posebne postopke kemijskega čiščenja in žarjenja osnovnih komponent ter pazljiv izbor materialov.

### 2 ZASLONI ZA KATODNE ELEKTRONKE

Najpomembnejši del zaslon je tanka plast luminiscentne snovi, nanesene na stekleno podlago, ki pri trku z elektroni pretvori njihovo kinetično energijo v vidno svetlobo. Plasti najpogosteje nanašajo iz vodne suspenzije nekaj mikrometrov velikih delcev. Od vrste luminiforja je odvisno, kateri del vidnega spektra (barvo) bo emitiral zaslon. Zaslone so lahko monokromatski (enobarvni) ali barvni. Pri barvnih zaslonih so naneseni trije osnovni luminiforji: rdeč, moder in zelen, v obliki majhnih krogcev (slika 2) ali ozkih vzporednih črt.

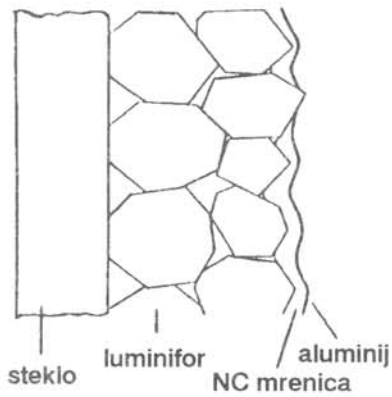


Slika 2. Shematski prikaz vzbujevanja zaslon s senčno masko v barvni katodni elektronki /4/

#### 2.1 Zgradba monokromatskega zaslon

Znano je, da je velikost in oblika zaslonov lahko zelo različna. Pri najmanjši (miniaturni) katodni elektronki ima zaslon koristni premer 15 mm, pri večjih s kvadratno ali pravokotno obliko pa lahko diagonala meri do približno 62 cm (3-25 inch). Ne glede na velikost in zunanjo obliko imajo vsi zaslone enako zgradbo (slika 3). Zaslon sestavljajo:

1. steklena podlaga
2. luminiscentna plast
3. organska mrenica
4. plast aluminija

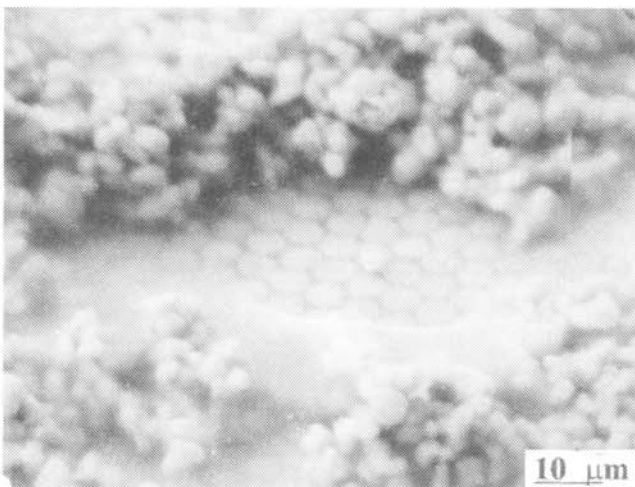


Slika 3. Zgradba praškastega zaslona za katodne elektronke

**Steklena podlaga** je sestavni del elektronke, ki je po izdelavi zaslona s steklenim spojem pričvrščena na stekleni vrat. Lahko pa je kar del steklenega ohišja (slika 1). Podlaga je nekaj milimetrov debelo steklo, pri profesionalnih napravah pa je lahko optično ali vlaknasto steklo (fiber optics), kjer je premer vlaken 3 ali 5  $\mu\text{m}$ . Podlaga vpliva na ločljivost in kontrast zaslona; nanjo je lahko nanesena še prozorna prevodna plast.

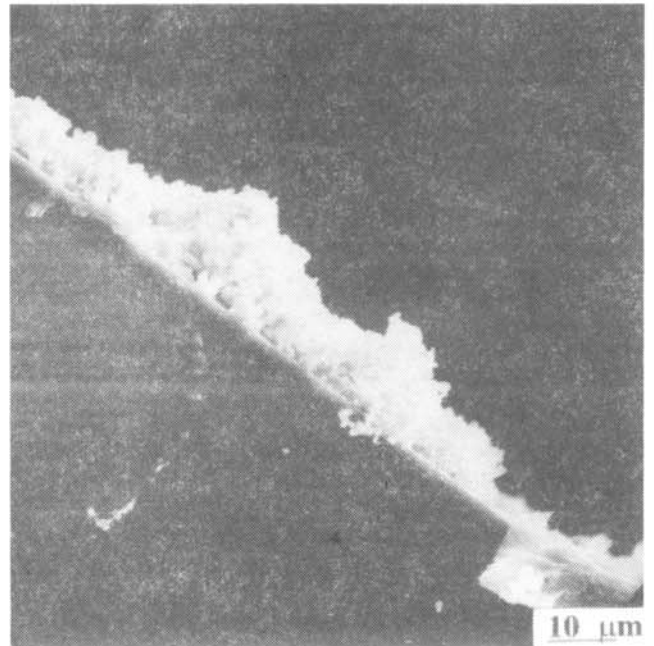
**Luminiscentno plast** sestavljajo gosto zloženi delci luminiscentnega prahu, povezani med seboj in na stekleno podlago z vezivom. Uporabljajo se le anorganska veziva, ki niso razgradljiva pri trkih z elektroni. Glede na želene lastnosti zaslona oz. prikazalnika (barva, persistenca, svetlobni izkoristek, delež absorbirane energije, sproščene pri trku elektronov, napetost nasičenja) bomo uporabili enega izmed 60 različnih katodoluminiscentnih snovi [1].

**Organska mrenica** je nanesena na hrapavo površino luminiscentne snovi zato, da bo plast, ki ji sledi (aluminij), zvezna (slika 4). Uporabljamo lahko 1% raztopino nitroceluloze v organskih topilih. Po naparevanju aluminija to organsko plast odžgemo, ker bi sicer prišlo do razgradnje med delovanjem elektronke in zastrupljanja katode.

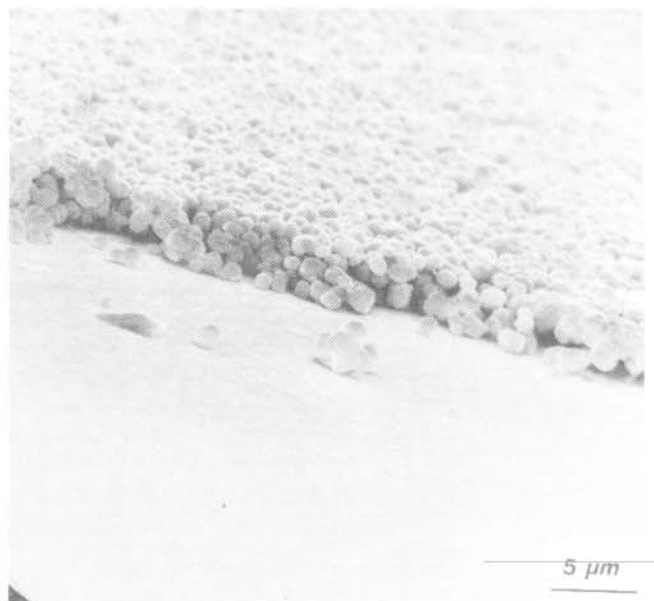


Slika 4. Praškasta luminiscentna plast, nanesena s sedimentacijo v centrifugi na podlago iz vlaknastega stekla. Plast prekriva tanka nitrocelulozna mrenica [5]

**Plast aluminija** je debela približno 100 nm. Debelina je odvisna od pospeševalne napetosti in je lahko pri višjih napetostih večja. Aluminij naporimo v visokem vakuumu. Plast je prevodna, tako da je potencial enakomerno porazdeljen po zaslonu. Hkrati pa rabi tudi kot zrcalo za izsevano svetlobo iz zaslona, ki se širi v notranjost elektronke. Pri vzbujanju luminiscentne snovi ta izseva svetlobo v vse smeri, tako da koristno izrabimo le del svetlobe v smeri opazovalca. Svetlobni izkoristek zaslona z aluminijem je pri dani napetosti približno za polovico večji kot pri nealuminiziranem zaslonu.



Slika 5. Prelom zaslona, kjer je luminiscentna plast nanesena z gravitacijskim posedanjem (bel luminifor P45 -  $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ ) [5]



Slika 6. Luminiscentna plast, nanesena z npraševanjem na lepljivo površino (zelen luminifor P20 -  $(\text{Zn,Cd})\text{S:Ag}$ ) [5]

## 2.2 Metode nanašanja luminiscentne plasti

Luminiscentno snov lahko nanesemo na površino steklene podlage z različnimi postopki: z gravitacijskim poseanjem suspenzije, centrifugiranjem suspenzije, napraševanjem na lepljivo površino ali z elektroforezo. Na sliki 5 je prikazan prelom zaslona, prekritega s prosto sedimentacijo vodne suspenzije luminiforja. Ta tehnika se največ uporablja pri izdelavi zaslonov za široko porabo (TV sprejemniki, računalniški monitorji). Za zaslone z boljšimi lastnostmi moramo uporabiti drugačne, zgoraj navedene metode (sliki 4, 6).

## 2.3 Ločljivost in svetlobni izkoristek zaslonov

Najpomembnejši lastnosti zaslonov sta ločljivost in svetlobni izkoristek. Ločljivost zvišujemo s tanjšanjem aktivne plasti, bolj gostim nanosom, z izborom snovi z manjšimi delci in z ožanjem elektronskega curka, s katerim vzbujamo katodoluminiscentno plast. Svetlobni izkoristek pa je višji pri debelejših plasteh, pri snoveh z večjimi delci in pri višjih energijah vzbujanja. Zato je razumljivo, da je potrebno debelino zaslona optimizirati.

Ločljivost katodne elektronke lahko podamo kot premer svetlobne točke ali črte, ki jo na zaslonu vzbujamo z elektroni pri določenem toku in potencialu, ali kot število linijskih parov na milimeter (lpm). Celotni premer svetlobne točke ( $d_c$ ) je izražen z naslednjo enačbo (6):

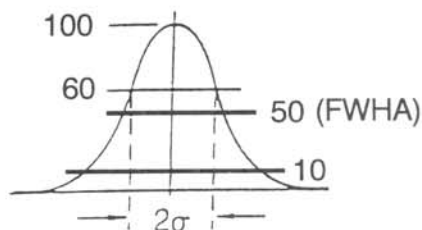
$$d_c^2 = d_e^2 + d_z^2 + d_o^2 \quad (1)$$

kjer  $d_e$  pomeni prispevek elektronske puške (sferična aberacija, astigmatizem),  $d_z$  je prispevek luminiscentne plasti,  $d_o$  pa so drugi prispevki (npr. ločljivost podlage). Ko potujemo z ozko režo čez vzbujeno črto na zaslonu in s fotometrom merimo njeno svetlost, ima ta obliko Gaussove krivulje (slika 7). Ločljivost je lahko podana kot premer črte oz. širina Gaussove krivulje na 60%, 10% ali na polovici višine krivulje (FWHA, full width half amplitude).

**Svetlobni izkoristek**  $\epsilon$  je definiran z razmerjem med izsevano svetlostjo zaslona  $L$  in energijo vzbujanja  $Q_i$ , energijski izkoristek  $\eta_e$  pa z razmerjem izsevane in vzbujevalne energije (8):

$$\epsilon = \frac{L}{Q_i} \quad (2)$$

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_i} \quad (3)$$



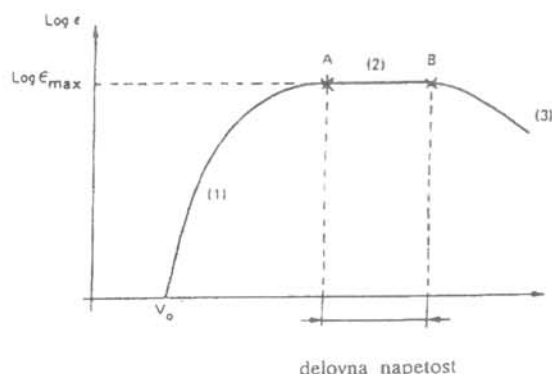
Slika 7. Porazdelitev svetlobe v vzbujeni črti na zaslonu ima obliko Gaussove krivulje (7)

Kadar je detektor človeško oko, je primerneje uporabiti svetlobni izkoristek zaslona, če pa je detektor film ali fotopomnoževalka, se uporablja izkoristek, kjer je emitirana svetloba izražena kot energija.

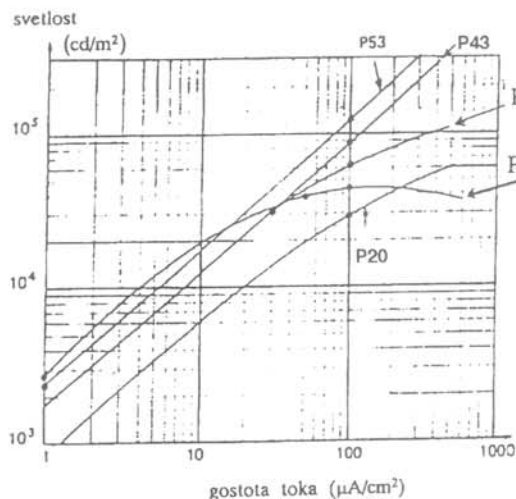
### 2.3.1 Parametri, ki vplivajo na svetlobni odziv zaslonov

**Vpliv napetosti** na svetlobni izkoristek prikazuje slika 8. Luminiscentni zaslon zasveti šele pri določeni napetosti  $V_0$  (1-4 kV), ki je odvisna od debeline plasti aluminija in debeline neaktivne plasti na površini delcev, ki jih sestavljajo oplaščenje (npr.  $SiO_2$  ali  $Al_2O_3$ ), površinski defekti in vezivo. V prvem delu krivulje se svetlobni izkoristek viša do maksimalne vrednosti, ki je odvisna od luminiscentne snovi in metode nanosa. Med točkama A in B je delovno območje elektronke. V tretjem delu je energija elektronov že tolikšna, da je njihova vstopna globina večja od debeline luminiscentne plasti in elektroni izgubijo velik del energije pri trkih s stekleno podlago. Zaradi povišane temperature prihaja na steklu do kemijskih reakcij in s tem do temnenja podlage.

**Vpliv gostote toka** na svetlost zaslona: v območju do  $10 \mu A/cm^2$  svetlost večine luminiscentnih snovi linearno narašča, potem pa pride do neemitivnih procesov ali nasičenja (slika 9). Luminiforji, ki imajo



Slika 8. Vpliv pospeševalne napetosti na svetlobni izkoristek zaslona (8)



Slika 9. Svetlost zaslona v odvisnosti od gostote toka pri napetosti 16 kV (8)

linearno odvisnost tudi pri višjih vrednostih (P53 in P43), so primerni za uporabo v napravah, kjer se zahteva visoka svetlost.

**Staranje luminiscentne plasti** je pojav, kjer se svetlobni odziv katodne elektronke s časom delovanja znižuje, odvisno od razmer pri vzbujanju. Svetlobni izkoristek se po 1000-2000 urah zniža na polovico, kar se navzven pokaže kot sivenje ali kot moteče praznine na zaslonu in omejuje trajnost naprav. Poleg trajnega uničenja plasti poznamo tudi začasno ali reverzibilno izgubo izkoristka. Če večamo energijo elektronov, se veča tudi svetlobni odziv in temperatura luminiforja, dokler ne pride do nasičenja, potem pa svetlost pada, dokler zaslon ne preneha svetiti. Če vzbujanje prekinemo in plast ohladimo, le-ta ponovno emitira svetlobo.

V enačbi 4 /8/ je podan izraz, ki pove, koliko naboja  $Q$  luminiscentna snov lahko sprejme, da se začetna vrednost svetlobnega izkoristka zniža na polovico, kar je merilo za trajnost zaslona in celotnega prikazalnika:

$$\varepsilon_{0,5} = \varepsilon_0 \cdot [1 / (1 + C \cdot Q)] \quad (4)$$

( $C$ =konstanta za določeno snov)

Nekateri parametri, ki vplivajo na staranje, so zbrani v tabeli 1. Luminiforji P1, P43, P45 in P53 lahko prejmejo velike gostote naboja: od 80 do 120 C/cm<sup>2</sup>, in so zato najprimernejši za izdelavo zaslonov za naprave, kjer se zahteva visoka svetlost (prikazalniki v pilotski kabini, projekcijske elektronke).

Mehanizmi staranja še niso dobro znani in se za snovi z različno kemijsko sestavo razlikujejo. Pri nekaterih luminiforjih pride do temnenja plasti zato, ker se kovinski ioni na površini delcev reducirajo in ta temna plast potem absorbira izsevano svetlobo. Pod vplivom elektronskega curka prihaja tudi do strukturnih sprememb.

TABELA 1. Vpliv različnih parametrov na staranje zaslona v katodni elektronki /8/

| Parameter  | Vpliv na staranje  |
|--|--|
| <b>Luminifor</b><br>velikost delcev<br>kristalna faza                                      | manjši delci so bolj občutljivi<br>razlike v svetlobnem odzivu do 1:10 za različne faze        |
| <b>Pogoji vzbujanja</b><br>pospeševalna napetost<br>raster ali dc vzbujanje<br>temperatura | ne vpliva<br>ne vpliva<br>višja ko je temperatura,<br>hujše so poškodbe<br>luminiscentne snovi |
| <b>Vakuum</b>  | ioni 10-krat močneje<br>poškodujejo snov kot<br>elektroni                                      |

Ti procesi so lahko hitri, imenujemo jih tudi sežig, saj elektronski curek z energijo 2 W/cm<sup>2</sup> upari plast aluminija in luminiforja ter poškoduje stekleno podlago. Pri vzbujanju zaslonov raje uporabljamo visoke napetosti in nizke tokove (nekaj  $\mu$ A). Staranje zaslonov je odvisno od vrste luminiscentne snovi, lastnosti plasti, uporabljenega veziva in režima vzbujanja (Zgled: naprava, kjer je luminiscentna plast iz P11, bo pri toku 1 A/cm<sup>2</sup> delovala le 16 sekund).

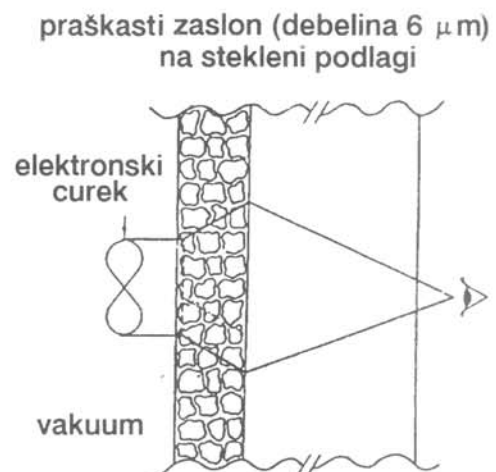
Zaslon navadno vzbujamo tako, da vodimo curek elektronov po njegovi površini (raster). Pri tem so obremenitve zaslona mnogo nižje, kot če bi vzbujali le določeno točko (alfanumerični znaki).

Lastnost zaslona, ki povezuje izsevalni čas in frekvenco vzbujanja, se imenuje utripanje (flicker). Če posredujemo informacijo 25-krat na sekundo, jo oko zazna kot kontinuirno. Nekoliko prispevajo tudi svetlost, barva in velikost zaslona, osvetljenost prostora, zorni kot opazovalca in premikanja slike na zaslonu. Bolj ekonomično je znižati frekvenco vzbujanja in uporabiti luminifor z daljšim izsevalnim časom (antiflicker phosphors).

## 2.4 Primerjava praškastih in tankoplastnih zaslonov

Praškasti zasloni so konglomerati kristaliničnih delcev, nanosenih v plast, debelo nekaj mikrometrov, ki so med seboj in na podlago vezani z vezivom. Zaradi majhne stične ploskve med delci in stekleno površino podlage so luminiscentne plasti termično slabo prevodne in nagnjene k poškodbam zaradi visokoenergijskega elektronskega curka. Čeprav je prevodnost odvisna od vrste snovi, debeline plasti in drugih fizikalnih lastnosti, velja, da je 1 W/cm<sup>2</sup> maksimalna dovoljena vrednost za gostoto energije, ki jo plast še lahko prejme. Trikrat višja energija pa že trajno uniči luminifor.

Poroznost praškastega nanosa prispeva k slabši ločljivosti in kontrastu. Ko kristale luminiforja vzbudimo z elektroni, se izsevna svetloba sipa znotraj zrn, pa tudi med zrni zunaj vzbujenega področja (slika 10). Posebej je sipanje izraženo pri plasteh z velikimi delci, ki imajo majhno gostoto in pri visokih energijah vzbujanja, kjer pride do odbojnih sil med elektroni v curku.

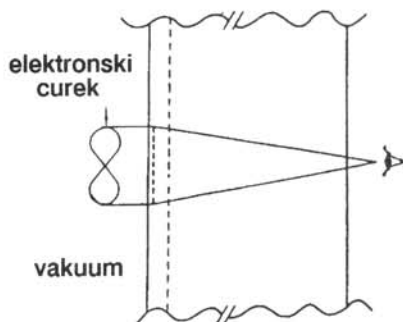


Slika 10. Vzbujanje, izsevane in sipanje svetlobe pri praškastem zaslonu /6/

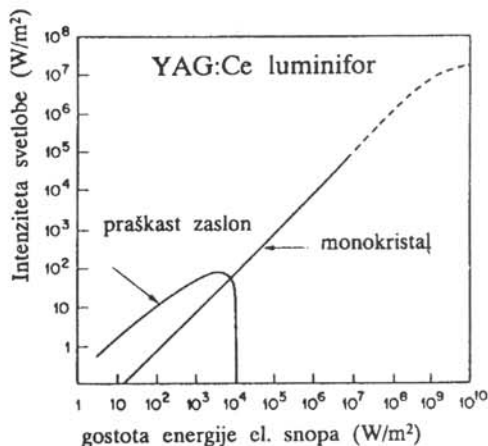
Da bi presegli pomanjkljivosti praškastih zaslonov, so začeli raziskovati tankoplastne nanose. Spektralna porazdelitev izsevane svetlobe in persistenca ostaneta pri tankoplastnih zaslonih enaki, močno pa se spremenijo svetlobni izkoristek, ločljivost in obstojnost snovi pri visokih energijah vzbujanja.

Metode nanašanja tankoplastnih zaslonov so: CVD postopek (chemical vapour deposition), rf naprševanje, sol-gel postopek in drugi. Plast je homogena, ločljivost zaslona je enaka premeru elektronskega snopa, ker ni sipanja svetlobe in elektronov na delcih (slika 11), kontrast je boljši zaradi nižje refleksije tankoplastnega zaslona, odpornost na sežig je zaradi dobrega kontakta s podlago neprimerno višja kot pri praškastem zaslonu. Nižji pa je "zunanj" svetlobni izkoristek zaradi pojava totalnega odboja znotraj plasti. Tako svetijo le robovi tanke plasti. Pri istih pogojih vzbujanja

tankoplastni zaslon (debeline 2  $\mu\text{m}$ )  
na safirni podlagi



Slika 11. Vzbujanje in izsevanje svetlobe pri tankoplastnem zaslonu [6]



Slika 12. Odvisnost svetlobnega odziva od gostote energije elektronskega curka pri praškastem in tankoplastnem zaslonu [10]

daje tankoplastni zaslon določene snovi le 10% svetlobe praškastega zaslona. Izguba svetlosti je premo sorazmerna z lomnim količnikom, zato izbiramo snovi z nizkim lomnim količnikom [9]. Zaradi boljše termične prevodnosti pa lahko tanko plast vzbujamo z višjo energijo in tako dobimo večji svetlobni odziv (slika 12).

Svetlobni izkoristek tankih luminiscentnih plasti je odvisen od števila defektov, zato morajo imeti čim bolj urejeno kristalinično strukturo. To dosežemo z visokotemperaturno obdelavo, zato je potrebno plasti nanesti na safirne ali kremenove podlage. Tankoplastne zaslone uporabljajo le za profesionalne elektronke, kjer sme biti zaradi izboljšanih lastnosti tudi cena višja.

### 3 SKLEP

V prispevku smo predstavili kratek pregled luminiscentnih zaslonov za katodne elektronke. Opisali smo zgradbe, metode nanašanja in osnovne lastnosti zaslonov. Primerjali smo tudi praškaste in tankoplastne zaslone glede na njihovo termično obstojnost, ločljivost in svetlobni izkoristek.

### ZAHVALA

Zahvaljujem se Ministrstvu za znanost in tehnologijo, ki mi je omogočilo opraviti raziskovalno delo v okviru magistrske naloge.

### 4 LITERATURA

- /1/ L. Županc-Mežnar, Luminiscentne snovi (I. del), Vakuumist, 16/3 (1996) 14
- /2/ S. Južnič, V. Nemanič, Iznajdba in razvoj katodne elektronke in drugih vakuumskih elementov za televizijo (I. del), Vakuumist, 16/1 (1996) 19
- /3/ S. Južnič, V. Nemanič, Iznajdba in razvoj katodne elektronke in drugih vakuumskih elementov za televizijo (II. del), Vakuumist, 16/2 (1996) 15
- /4/ L.E. Tannas, Flat-panel displays and CRTs, Van Nostrand Reinhold company, New York, 1985
- /5/ L. Županc-Mežnar, Priprava in lastnosti luminiscentnih snovi ter izdelava zaslonov za katodne elektronke, magistrsko delo, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Ljubljana, 1996
- /6/ E. Sluzky and K. Hesse, High-resolution phosphor screens, J. Electrochem. Soc., 135 (1988) 2893
- /7/ E. Sluzky, T. Avalos and K. Hesse, Evaluating the resolution of ultra-fine-grain phosphor screens, J. SID, 1 (1993) 3
- /8/ A. Martin, Cathode Ray Tubes for Military Applications, Advances in Electronics and Electron Physics, Academic Press, New York, 67 (1986) 183
- /9/ J. Shmulovich and D.F. Kocian, Thin-film phosphors for miniature CRTs used in helmet-mounted displays, SID Intl. Symp. Digest Tech. Papers, 30 (1989) 297
- /10/ A.M. Wittenberg, Single-crystal garnet phosphors, Information Display, 3 (1987) 14



## KVANTNO RAČUNANJE

Igor Belič, VPVŠ, Kotnikova 8, 1000 Ljubljana

### Quantum computing

#### ABSTRACT

Where will new directions in computer technologies go is the main question of the original paper written by Tom Thompson and published by Byte. There is a particularly interesting section describing the potentials of quantum computing that requires the vacuum system in order to operate. If the quantum computing story ever comes true it will also be the moment of great vacuum technology expansion.

#### POVZETEK

Originalni članek Toma Thompsona daje nekaj odgovorov na vprašanje usmeritev računalniških tehnologij v prihodnosti. Posebej zanimiv je del članka, ki opisuje možnosti kvantnega računanja. Elementi, ki izvajajo kvantno računanje, lahko delujejo le v vakuumskem okolju. Če bodo principi kvantnega računanja kdaj postali resničnost, potem bo to tudi začetek velikega vzpona vakuumskih tehnologij.

#### 1 Uvod

Iskanje novih tehnologij, ki bi omogočile izdelavo še hitrejših in zmogljivejših računalnikov, je kot zlata mrzlica. Zelo veliko ljudi se ukvarja s tem iskanjem, vendar, kot povesod drugje, so tudi tu le redki izbrani.

Vakuumske tehnologije so v zadnjih desetletjih izrinjene na rob uporabe v široki porabi. Navzoče so posredno, ker sodobnih mikroelektronskih vezij in še česa brez vakuumskih procesiranj ne bi bilo. Povzetek članka T. Thompsona, objavljenega v reviji Byte /1/, nakazuje možnost povratka vakuumskih tehnologij v samo osrednje v široki porabi uporabljenih elektronskih komponent in to ne v tako zelo oddaljeni prihodnosti.

#### 2 Kvantni procesorji

Kakšno je stanje na področju procesorjev, uporabljenih v sodobnih računalnikih? Ali obstajajo principi, ki bi uspešno zamenjali digitalne principe delovanja? Morda s čim, še manjšim od dosedaj najbolj miniaturnih integriranih vezij - s posameznimi atomi, ioni, elektroni. Skozi leta so se fiziki v laboratorijskih okoljih ukvarjali z delom na atomarnem in subatomarnem nivoju. V današnjem času poskušajo izvesti računske operacije z izkoriščanjem fizikalnih lastnosti, ki veljajo za atomarni nivo. Delo na tem področju se precej razlikuje od običajne uporaba binarne logike in principov Booleove algebre. Odkrite so nove zakonitosti, ki se jih da uporabiti za izvajanje računskih operacij. Običajna fizikalna pravila, ki veljajo tudi za najbolj miniaturizirana CMOS logična vrata (logična vrata so osnovni sestavni elementi logičnih vezij za izvajanje operacij, kot so AND, OR, negirani AND in OR itd.), tu ne veljajo več. Namesto tega veljajo za subatomarne delce pravila kvantne mehanike.

Vsak delec lahko opišemo kot delec ali kot valovanje. Kadar subatomarni delec obravnavamo kot delec (korpuskularni opis), potem ta lahko zaseda le diskretna energijska stanja, ki jim rečemo energijski kvanti. Valovni opis govori o tem istem delcu v prostorsko-časovnem smislu. Ko se val, ki predstavlja elektron,

razširi v prostoru in času, postane lokacija elektrona negotova; veljajo zakoni verjetnosti.

Slika je podobna, ko vržemo kamen v bazen, napolnjen z mirujočo vodo. V trenutku, ko se kamen dotakne vodne gladine, se začne centrično razširjati valovi proti robu bazena in se od njega odbijejo. Čez določen čas je celotna gladina bazena v valovanju. Valovna predstavitev "kamna" je porazdeljena po celotni površini bazena. Elektron je zato v valovnem smislu povesod naenkrat.

Stanje nedoločenosti (fuzzy state) se nadaljuje toliko časa, dokler elektron ne interagira z nekim drugim delcem ali s fotonom. V trenutku interakcije je izdana lokacija elektrona, ki je v točki, kjer razširjajoči se val razpade v množico lokaliziranih valov (elektron in drugi delec).

Kot primer tega dogodka si predstavljajmo majhen prostor, v katerem je zaprt elektron. Prisotnost elektrona lahko predstavimo kot val. Valovna funkcija govori tudi o verjetnosti, da se delec nahaja zunaj s stenami omejenega prostora. Pod ustreznimi pogoji elektron pobegne iz omejenega prostora. Proces imenujemo tuneliranje.

V šestdesetih in sedemdesetih letih sta Rolf Landauer in Charles H. Bennet iz centra IBM Thomas J. Watson raziskovala in odkrila osnovne fizikalne zakonitosti računanja, ki so kasneje postali temeljni principi kvantnega računanja. Bennet je pokazal, da je možno zgraditi molekularni računalnik, ki deluje na temelju Turingovega stroja.

Okoli leta 1980 je Paul Benioff iz Argonne National Laboratory ugotovil, da se računanje lahko izvaja na sistemih, ki popolnoma sledijo zakonom kvantne mehanike. David Deutsch z Univerze v Oxfordu je leta 1985 dognal, da taki sistemi lahko izvajajo celo kvantno paralelno računanje. Ko so bili sistemi kvantnega računanja še v teoretskih povojih, je že kazalo, da bodo taki računalniki precej zmogljivejši, kot so sedanji.

Leta 1993 je Seth Lloyd iz Los Alamos National Laboratory pokazal, da veliko kvantnih sistemov, vključno s preprostimi kristalom soli, lahko deluje kot kvantni računalnik. Istega leta je Peter W. Shor iz AT&T Bell Laboratory demonstriral, da kvantni računalnik lahko izvaja praktično delo hitreje kot katerikoli znani digitalni računalnik. Vsa ta odkritja so sprožila renesanso raziskav kvantnega računanja, kjer številne skupine poskušajo zgraditi prototipne elemente kvantnih računalniških sistemov.

Teoretične ideje, kako narediti osnovna kvantna "vrata", se razlikujejo glede na to, v kateri raziskovalni skupini so nastale. Kljub temu sta dve skupini naredili pomembne korake pri laboratorijskih poskusnih izvedbah. Skupina, ki deluje pod vodstvom Davida J. Winelanda v National Institute of Standards (NIST), je zgradila XOR (eXclusive OR) vrata z uporabo ionov, ujetih v pasti. Druga skupina pod vodstvom Jeffa H. Kimbleja iz Cal Techa uporablja optično kavitacijo v past ujetega atoma za izvedbo kvantnih faznih vrat (Quantum Phase Gate QPG). Izhod QPG vrat spremeni

fazni kot polarizacije vhodnega laserskega žarka. Taka logična vrata lahko izvajajo več različnih logičnih funkcij.

Konstrukcija osnovnih gradbenih elementov ni lahka naloga. Vrata NIST so izvedena v vakuumskem sistemu s štirimi elektrodami (slika 1).

Čeprav je skupina NIST zgradila logična vrata, ki izvajajo logično funkcijo, kot klasična elektronska vrata, je treba posebej poudariti, da kvantna logika ne deluje nujno tako. Kot je bilo že prej omenjeno, kvantno računanje uporablja neke vrste paralelno računanje zaradi verjetnostne narave vedenja delcev in tudi vrata NIST izkazujejo take lastnosti.

"Prostor stanj sistema kvantnega računanja je bistveno večji kot pri klasičnem digitalnem računalniku, zato ker kvantni sistem lahko realizira eksponentno mnogo stanj naenkrat," je dejal Kimble. Zaradi tega se kvantni biti imenujejo qu-bit, da jih tako razlikujemo od klasičnih bitov.

"3-bitni register shrani v enem trenutku le eno število, medtem ko 3 qu-bitni vseh osem možnih števil naenkrat, vse dokler jih ne odčitamo," pravi Chris Monroe, ki je ravno tako član skupine NIST.

Kvantni paralelizem teoretično omogoča izvajanje zahtevnih operacij precej hitreje. Faktoriranje velikih števil navadno zahteva od računalnika ogromno število operacij, ki naraščajo eksponentno z velikostjo števila, ki se faktorira. Kvantni računalnik se loti naloge tako, da izračuna potence manjših števil z različnimi potencami naenkrat.

Kvantni računalnik ne izvaja nujno digitalnega računanja. Richard Feynman predlaga, da kvantne računalnike uporabljamo za simulacijo kvantnomehanskih sistemov, torej kot analogne računalnike. To idejo uporablja Seth Lloyd, ki deluje na MIT. Želi simulirati časovni razvoj 40 delcev, ki sestavljajo snov v jedru

eksplozivno zvezde. Izvedba takih izračunov s klasičnim digitalnim računalnikom zahteva delo z matrikami reda  $2^{40} \times 2^{40}$ , kar dovolj natančno opiše bistvene kvantne lastnosti delcev.

Uporabiti bi morali  $10^{24}$  digitalnih operacij za izračun rezultata. TFLOPS (Tera Floating Point Operations per Second) računalniški sistem bi porabil za to delo trilijon sekund ali 31 709 let. Z uporabo laserjev za kontrolo oziroma programiranje delovanja 40 ionov v ionski pasti bi kvantni računalnik porabil le sto kvantnih interakcij. Tak kvantni analogni računalnik bi izkoriščal kvantne lastnosti uporabljenih delcev (spin) za izračun kvantnih učinkov simulacije.

Čeprav kvantno računanje mnogo obeta, je še vedno veliko problemov in vprašanj, na katere zaenkrat še ni odgovora. Izjemen problem je, kako obdržati koherenten kvantni sistem. Kvantni računalniki morajo delovati pod dvema pogojevoma, ki sta zelo težko dosegljiva. Qu-bitovi morajo zelo močno interagirati med seboj, če želimo doseči postopek računanja. V interakciji ne sme sodelovati okolica opazovanih ionov (ohišje, elektrode). Obe zahtevi sta izredno težko dosegljivi, še posebej, če računanje poteka dlje časa. Termično nihanje okvira, ki je mehanska osnova sistema, lahko povzroči izgubo koherence sistema. Počasno in neizogibno spreminjanje delovne točke analogne opreme povzroča računске napake, ki jih digitalni računalniki ne poznajo.

Monroe priznava, da se še nihče ni resno lotil omenjenega problema. Celo navadna vrata XOR izgubijo koherenco po 10 do 20 interakcijah, verjetno zaradi nestabilnosti vzbujevalnega laserja. Bennet in ostali so raziskovali potencialne možnosti za popraviljanje napak kvantnega računanja. Peter Shor je odkril obetajoč princip za popraviljanje napak v kvantnem pomnilniku. Dokazal je, da uporaba devetih qu-bitov samodejno popravlja napake. Sistem je sicer zelo neefektiven, a deluje. Kaže, da bo potreben miselni preskok za rešitev omenjenega problema.

Čeprav opis in ideja sistema delujeta medlo, ne pozabimo, da je ideja kvantnega računanja še v svojih prvih korakih. Stanje je podobno kot takrat, ko so leta 1947 v Bellovih laboratorijih prvič izdelali transistor. Raziskovalci poskušajo preizkusiti nekaj desetletij staro teorijo v praksi. Vpeljava analogije klasičnih elektronskih vezij verjetno ni optimalna strategija. Kvantna fizika je bogata in neraziskano področje, kjer je razkorak med teoretičnimi dognanji in tehnološko izvedljivo rešitvijo izredno velik.

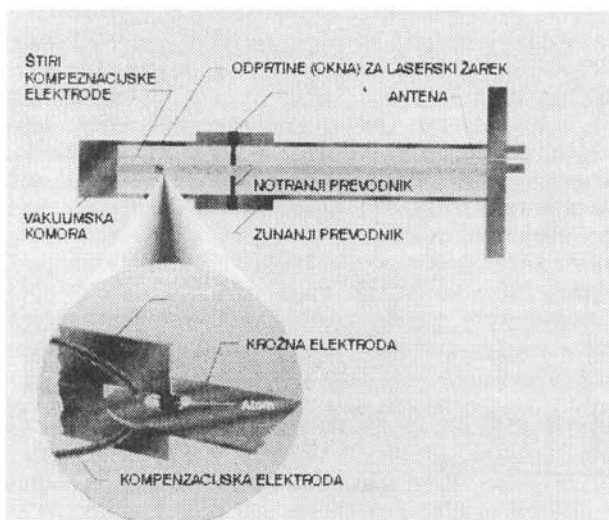
### 3 Diskusija

Morda diskusija na tem mestu niti ni smiselna, saj bralec lahko poseže po originalu in si tam ogleda tudi druge smeri razvoja računalniških tehnologij.

Osnovni namen pričujočega povzetka članka je bil nakazati smeri razvoja, ki so pomembne s strani vakuumske tehnologije. Ko bo prišel čas tehnološke zrelosti kvantnih računalnikov (če bo do tega tudi v resnici prišlo), bo to nedvomno izjemna priložnost za ponoven razcvet vakuumskih tehnologij.

### 4 Literatura

- /1/ T.Thompson, When Silicon Hits its Limits, What's Next?, Byte, Vol.21, N°4 (1996) 45-54.



Slika 1. Vrata XOR, ki jih je zgradila skupina NIST. Berilijev atom je ujet v magnetnem polju. Dva ultravijolična laserska žarka kontrolirata stanje atoma - njegovo nihanje in spin. Ti dve lastnosti sta uporabljeni za izdelavo 2-bitnega registra, ki deluje kot vrata XOR. Trenutno stanje atoma je merjeno s tretjim laserjem. Če atom kot odgovor na vzbujanje fluorescira, potem je to logično stanje 0. Če ne, potem je to stanje 1.

## ZGODOVINA RAZISKOVANJA LUMINISCENTNIH SNOVI (I del)

Stanislav Južnič\*

### History of development of luminescent materials (Part I)

#### ABSTRACT

The development of the research of the luminescent materials is described from inventions to their use in Braun's cathode ray tube. Attention is put on the researches and writing about luminescence in Austria, specially in its Slovene part. First part of the article ends with Stokes' law in the middle of last century.

#### POVZETEK

Obravnavamo raziskovanje luminescentnih snovi od odkritij do uporabe v Braunovi elektronki. Več pozornosti posvečamo raziskavam in pisanju o luminescenci v tedanji Avstriji in še posebej v njenem slovenskem delu. Prvi del razprave sega do objave Stokesovega zakona sredi preteklega stoletja.

#### 1 UVOD

"Fosforje imenujemo telesa, katerih medla svetloba je kot svetloba Lune in pogosto še šibkejša. Ne pustijo močnejšega vtisa v očesu, v katerem se zberejo, niti ne povzročajo zaznavne toplote, niti občutno ne povišajo temperature okoliških teles."

Tako je luminiforje in element fosfor s skupnim imenom "fosfor" opisal dolgoletni ljubljanski profesor fizike Ambschel pred dvesto leti (1792, 279, 280). Danes opišemo luminescenco z razliko med visoko energijo absorbiranih in nižjo energijo oddanih fotonov. Razlika med definicijama je plod stoletij raziskav, odkritij in tudi napak, ki so omogočile mnogotere uporabe luminiforjev, brez katerih si ni mogoče zamisliti sodobnega računalniškega in televizijskega sveta.

#### 2. RAZISKOVANJE LUMINISCENCE PRED ODKRITJEM ULTRAVIJOLIČNE SVETLOBE

Svetlikanje snovi v temi je privabljal pozornost že v antiki. Bioluminescenco gob in rib je poznal že Aristotel (384 do 322 pr.n.š.), Plinius (23 ali 24 do 79) pa je opisal tudi fosforescenco kamnin (Wilde, 1843, 384-385).

##### Prvi opis fluorescence

Španski zdravnik Monardes je prvi objavil opis fluorescence mehiškega drevesa "lignum nephriticum", njegove raztopine v vodi in kamnino "lapis nephriticum", ki so jo v različnih oblikah poznali že v antični Indiji, posebno pogosta pa je bila v Mehiki, "Novi Španiji". V isti knjigi je objavil tudi prvi opis tobaka, ki so ga Špancem pokazali Indijanci (Monardes, 1574, 50-52, 21).

Posthumno nizozemsko izdajo Monardesove knjige so vezali z njegovim drugim medicinskim delom, tiskanim

leta 1582, in s petimi deli drugih sodobnikov. Leta 1626 je bila knjiga last dunajskega zdravnika Conradusa Widderja, pozneje pa je prešla k ljubljanskim avguštincem in okoli leta 1800 v licejsko knjižnico v Ljubljani.

##### Prvi umetni luminifor: "bolonjski kamen"

Čevljar Vincenzo Cascariolo (tudi Casciriolo, Casciarolo) je v Bologni pri alkimističnih poskusih med leti 1692-1604 dobil prvi umetni luminifor. Mešal je zmleti barit z Monte Paderna pri Bologni in oglje v prahu. Ponoči je opazil, da ohlajena zmes oddaja vijolično-modro svetlobo.

Galileo Galilei (1564-1642) je na univerzi v Padovi med prvimi izvedel za novost. Kose "bolonjskega kamna", imenovanega tudi "lapis solaris", je dal zdravniku jezuitu Lagalli iz Collegio Romano, ki je prvi objavil odkritje. Lagalla je v zadrževanju svetlobe v luminiforju videl dokaz, da svetloba nima teže, saj se teža kamna med luminescenco ne spreminja. S tem je nasprotoval trditvam Galileja, kritiziral pa je tudi Galilejev opis opazovanja Lune skozi teleskop (Mladenović, 1985, 177).

Profesor filozofije na univerzi v Bologni Licetius je leta 1640 opisal "pietra lucifera di Bologna". Menil je, da od Sonca neosvetljena stran Lune sveti z medlo svetlobo zaradi fosforescence, podobno kot "bolonjski kamen". Kritiziral je tudi pravilen Galilejev opis te pepelnate svetlobe, odboja sončne svetlobe od Zemlje, ki ga je objavil že Leonardo da Vinci (1542-1519).

Liceti je bil eden napomembnejših mislecev svoje dobe. Med drugim si je dopisoval tudi s Francozom Pierrom Gassendijem (1592-1655) o atomih. Zato Galilei ni mogel spregledati njegovih kritik, kot je sprva nameraval. Pomladi 1640 mu je nekdanji učenec princ Leopoldo Medici (1617-1675) pisal iz Firenc v Arcetri, naj odgovori na "lahkomiselne Licetiusove argumente". Galilei je v "Lettera al Principe Leopoldo di Toscana" Licetiusovo veliko znanje označil kot golo zbiranje nepovezanih dejstev, analogijo med Luno in "bolonjskim kamnom" pa je zavrnil kot neutemeljeno. Princ Leopoldo je pozneje, 19.6.1657, predsedoval prvi fizikalni "Accademia del Cimento" (Kuznecov, 1964, 134, 274-276). Licetijevo idejo o fosforescenci neosvetljenih nebesnih teles je Puluj stoletja pozneje uporabil pri opisu Venere (1889, 308).

Kircher je 6 let za Licetiusom dopolnil njegov opis "bolonjskega kamna" z lastnimi opazovanji luminescence živali, rib in kamnov. Opazil je, da "iz kamna izhajajoča svetloba ni stalna, saj ugaša s časom kot magnet. Sila najpreprostejših ognjenih par namreč zaduši izločanje ... Svetloba je znotraj sence vkovana in tako shranjena v svetlečem se telesu. V nasprotju s prevladujočim mnenjem šolanih filozofov menim, da svetlobo sestavljajo delci. (Bolonjski) kamen vleče svetlobo nase kot nafta ogenj in (kot) magnet železo. Svetloba ima v takšnem kamnu lastnosti neba in ognja ter sveti v temi tako kot sama Luna. Nekaterim kamnom svetloba vžge atomske delce, ki jo skušajo vedno pregnati na tak ali drugačen način." (Kircher, 1646, 27).

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

C A P V T V I I I .

De Photismo Lapidum.

De Lapide Phengito, seu Phosphoro minerali.



Nueneum non ita pridem in agro Bononiensi fofille quoddam, quod certa ratione preparatum, lucique expofitum, eam ita imbibit ita tenaciter eam fibi incorporat, vt fi loco tenebrofo ex theca depromptum exponatur, conceptam lucem conferuatque non lecus ac viuos carbones non fine intuitum admiratione diffundat. Et quamuis insignis ille Fortunius Licetus in fuo de Lithophoro libello, eum in folo agro Bononiensi reperiri dicat, ego tamen huius quoque mineræ apud Tolpham, & in loco, vbi lapides aluminis, vulgo Alumæ di loeca, fodere folent, hæud obfcura indicia reperi; que Bononiensi qualitatibus profus fimilis eft. Eft enim huiusmodi fofille maffa quædam Gypho fulphureo-felenitica multum Arfenici, Antimonij, Chalcanti admittum habens, & gypfum quidem calx, in quam facilimè refoluitur; grauolentia fulphur, diaphanetas felenitum; vis cauftica, & pilloca. feù pilorum deterfiva, arfenicum; antimonium ad vomitus coarctatiua facultas; chalcantum denique mordacitas fatifitæque demonftrant; qui effectus in Bononiensi quoque inefle reperiuntur. Itaque autem ad lucem imbibendam præparatur. Lapis, vel integer, fi purus fit & melioris notæ, in fubtiliſſimo èntrufculo (phoro) vel fi impuriore partes admiffas habeat, in pollinem tenuiffimum redactus, ouorum albumine, vel etiam aqua communij, à quibufdam etiam oleo lini in vna maffam redigetur, quæ, fi poft primam calcinationem, lucem non conceperit; toties huiusmodi calcinatio repetenda eft, donec operam affectum confequatur, quem efflorefcentia quædam, minutilimi roris graua referentis, quæ ad fuperficiem ludare videtur, & in quibus maximè virtus lucis concepiua, fiue alicui rei permiffione refides, figurificat. Hac igitur ratione præparatus lapis, ferrius quibufdam, fiue arcuatis ad id præparatum imponitur; fi itaque fuffratum lucis fplendorem. Anticis ostendere defideres, lapidem cum theca Solis diuio fplendore, vel fi Sol non fulgeat, diuio ne luci, aut etiam crepufculum; nec non fi noctu, igni valido facibusque accenſis expones (ex omnibus enim hifce lucem atrahere, ac in fe deuiare poterit, etfi cum proportione quadam, ita vt quo lux fuerit eminentior, tanto copioſiori, effuſiorique lumine lapis quoque in tenebris conuſcaturus fit) luci expofitus lapides aliquantisper, pura quadrante horæ, ad perfectius & intemius futuram lucem in fe concipiendam theca claufus, in obfcuro mox deferens, apertoque ſcrinio videbis illos, lucem non lecus, ac carbones accenſos de fe diffundere; quæ tamen non

Signa lapidis luminiferi.

Preparatio ad lucem imbibendam.

Quædam inchoanda.

Quædam temporis expone.

Slika 1: Zapis v ARS MAGNA LUCIS ET UMBRAE o luminiferju z opisom "bolonjskega kamna" in opisom Licetiusovega dela

Kircherjevo delo je imelo velik vpliv na sodobnike, posebno v jezuitskih łolah. V ljubljanskem jezuitskem kolegiju so ga dobili že leta 1697. Med požarom 28.6.1774 je bilo bržkone izposojeno, saj 1.3.1775 ni bilo popisano med rešenimi knjigami.

Galilei je v pismu evangelistu Torricelliju (1608-1647) kritiziral in smeŕil Kircherjev pristop k znanosti, v katerem naj bi se ob astrolabu in urah nahajali tudi neznanstveni zapisi o glasbi in zdravilu proti ugrizu tarantele. Galilejeva in tudi Huygensova kritika je poznejŕim znanstvenikom odtujila Kircherjeva fizikalna raziskovanja (Kuznecov, 1964, 276, 278).

Odkritje kemijske prvine: fosfor

Trgovec iz Hamburga Hennig Brandt (tudi Brand, okoli 1630 - po 1710) je med leti 1669-1675 iz veã ton urina, dobljenega v hannoverski vojaŕnici, izloãil fosfor za tamkajŕnjega kneza. Odkritje je prodal prijatelju, doktorju medicine in dvornemu svetniku pri knezu Mainza in Saške, Johannu Danielu Krafftu (tudi Kraft, 1624-1697) za 200 talerjev.

Iste ga leta je Krafft o odkritju obvestil Roberta Boylea (1627-1691) po sveãanosti ob imenovanju Newtona za profesorja fizike v Cambridgeu. Po drugih virih naj bi se Boyle do odkritja dokopal sam po Krafftovem namigu. 17.5.1677 je Krafft predaval o fosforju pred Royal Society v Londonu. Posluŕal ga je tudi Boyle, ki je objavil, da je "mrzla svetloba bolonjskega kamna" odvisna od zraka, gasita pa jo med drugim amonijak in alkohol. Raziskoval je tudi svetlikanje ŕivali in "lignum nephriticum". Podjetje Boylevega asistenta nemŕega rodu

Cöthena Ambrosa Godfreyja Hanckwitzja (1660-1741) je uspeŕno proizvajalo in prodajalo fosfor okoli 50 let na Angleŕkem in v Evropi. Hanckwitz je spretno oglaŕeval svoje izdelke, obogatel in postal baron.

Sin dvornega alkimista na dvoru hollsteinskega kneza Kunckel je ponovno odkril fosfor. Drugi viri poroãajo, da je za skrivnost izvedel od Kraffta oz. od Brandta.

Pomladi 1677 je Krafft priredil javno predstavitev fosforja na dvoru Johanna Friedericha v Hannoverju, kjer ga je posluŕal tudi Gottfried Wilhelm Leibnitz (1646-1716). Ta je leta 1710 s svojo avtoriteto doprinesel, da so Brandtu priznali odkritje fosforja.

Lastnosti fosforja sta raziskovala tudi Johann Joahim Becher (1635 Spier - 1682 London), profesor kemije na univerzi v Mainzu in njegov prijatelj Georg Caspar Kirchmaier (1635-1700 Wittenberg), zdravnik volilnega kneza v Mainzu, ki je poroãal tudi o Kuncklovih raziskovanjih.

Leta 1675 je Balduin odkril, da ostanek destilacije raztopine zdrobljene krede v solitni kislini sveti v temi podobno "bolonjskemu kamnu". Svetlikanje je hitro pojemale na prostem zraku, veliko dlje pa je trajalo v hermetiãno zaprti stekleni cevi. Pripravo Balduinovega "phosphorus hermeticus" je izpopolnil Heinrich (Wilde, 1843, 390). Poznejŕe raziskave so pokazale, da fosfor, obdan z zrakom, sveti zaradi poãasne oksidacije hlapov in ne zaradi luminiscence.

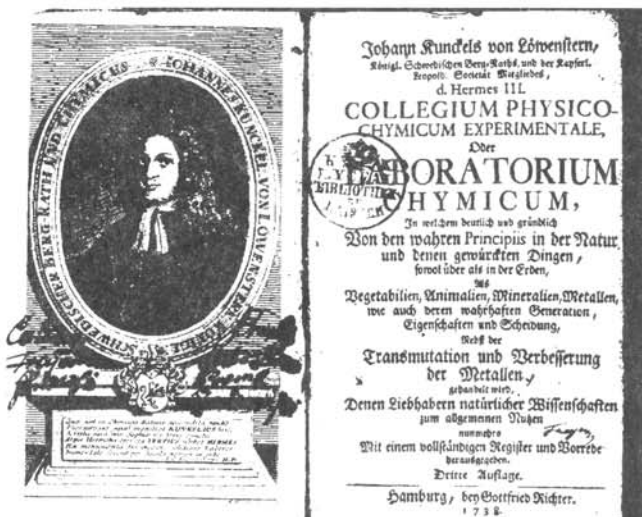
Raziskovanje luminiscence po dokritju fosforja

Luminiscenco so raziskovali vzporedno z drugimi optiãnimi pojavi. Kljub temu ni toliko vplivala na razvoj optike, kot denimo dvojni lom, ki ga je prvi opisal profesor na univerzi v Kopenhagenu Bartholin leta 1669 in obenem objavil tudi raziskovanja bioluminiscence ŕivali.

Veliko pozornosti je vzbujala elektroluminiscenca. Krojaãev sin John Canton (1718-1772), pomoŕni uãitelj na privatni łoli v Londonu, je leta 1768 raziskoval vzbujanje luminiscence z elektriãnim praznjenjem

•Inter inventa nostri saeculi non minimum habendum est Phosphorus igneus...• je priãel spis. •Odkritje svetleãega se fosfora prav gotovo ni nepomembno odkritje naŕe dobe; od drugih teles, ki sama oddajajo svetlobo, se razlikuje po tem, da ni niã drugega kot skriti ogenj (ignis quidam tectus), ki se kaŕe s svetlobo in dimom; ãe ga moãno drgnemo, pa zagori. Odkritje je znano od leta 1677. Za odkritje tega fosfora se moramo zahvaliti kot za toliko odkritij nakljuãju. Neki v Hamburgu ŕiveã nemŕki kemik, po imenu Brandt, neznan moŕ skromnega pokolenja, godrnjavega obnaŕanja, fantastiãne narave in v vsem delovanju skrivnosten; je naŕel svetleão se snov, ko je iskal nekaj drugega. Od mladosti je delal v steklarstvu, od tega pa se je odvrnil, da bi imel ãasa za iskanje kamna modrih (lapis philosophicus), vanj je stavil vse svoje upanje. Ko se je dokopal do spoznanja, da je skrivnost tega kamna v obdelavi urina, je delal dolgo brez uspeha. Konãno je leta 1669 po intenzivni destilaciji urina naŕel v predloŕki svetleão se snov, ki je pozneje dobila ime fosfor. To snov je pokazal nekaterim prijateljem, med drugim tudi Kuncklu, kemiku saŕkega volilnega kneza, varoval pa se je, da bi karkoli povedal, kako je snov dobil, in je umrl, ne da bi komu zaupal svojo skrivnost. Po njegovi smrti se je Kunckel lotil snovi, da jo na novo odkrije, ker mu je bilo ŕal, da ne bi mogel on dobiti tako zanimive snovi, ko je že enkrat bila dobljena. Ker je upoŕteval, da je Brandt celo ŕivljenje delal z urinom, je domneval, da je v njem najti fosfor. Temu se je ves posvetil in po ŕtirih letih tudi reŕ naŕel, kar je iskal. Ni pa bil tako skrivnosten kot Brandt in je skrivnost razodel leta 1679. Na Francoskem in Angleŕkem mislijo, da je Krafft, zdravnik iz Dresdna, odkritelj fosfora, ker ga je on prvi tja prinesel. V resnici pa je kazal tujim uãenjakom le fosfor, ki ga je dobil od Kunckla. Krafft pa takrat, ko je potoval, niti ni poznal naãina pridobivanja fosfora. •

Slika 2: Leibnizov zapis o odkritju fosforja ("Kemiki skozi stoletja", Tita Kovaã-Artemis, Ljubljana 1984 str. 68)



Slika 2.a: Kunckel ob naslovnici 3. izdaje svoje knjige o eksperimentalni kemiji iz leta 1738. Pod sliko je exlibris Ernesta Freyerja, lekarnarja iz Idrije, katerega botanično znanje je cenil tudi Janez Scopoli (1723-1788), rudniški zdravnik v Idriji med leti 1754-1770. Botanik Henrik Freyer (1882-1866), Ernestov vnuk, je bil med leti 1832-1853 kustos Deželnega muzeja v Ljubljani.

(Wilde, 1843, 392). Prior v Rilléu in Anjonu, član Academie Royale abbé Jean Picard (1620-1682) je leta 1675 raziskoval elektroluminiscenco v izpraznjeni stekleni posodi. Opisal je tudi triboluminiscenco živega srebra v barometru (Wilde, 1843, 392, 406). Raziskave je nadaljeval Švicar Johann Bernoulli (1667-1748), berlinski zdravnik in akademik Christian Friederich Ludolf (1707-1763) pa je leta 1745 pojav pojasnil z električnimi naboji.

Prvi umetni luminifor je zaslužil ime "bolonjski" tako po iznajditelju, kot po raziskovalcih, ki so svoje izsledke



Slika 2.b: Naslovnica Kucklovih razprav o kemiji iz leta 1721 z razpravo o fosforju v IV. delu. Tudi to delo je prišlo na ljubljanski licej iz Freyerjeve knjižnice

objavili v bolonjskem akademskem glasilu leta 1731. Galeati je ugotavljal, da fosforescenca v vakuumu oslabi, ne spremeni pa se njeno trajanje. Profesor logike, filozofije in fizike na univerzi in predsednik akademije v bolonji Francesco Marie Zanotti (1692-1777) je leta 1718 opisal lastnosti "bolonjskega kamna". Podpiral je valovno hipotezo, ker je kamen vedno svetil v svoji značilni barvi, ne glede na barvo osvetljevanja.

Razprave o luminiscenci je pri bolonjski akademiji objavljala tudi Beccaria, ki je slovel predvsem po svoji podpori Franklinovi teoriji elektrike. Razlikoval je naravne in umetne "fosforje" in k njim, tako kot pozneje Ambschel, štel luminiforje in element fosfor. Opisoval je barve različnih luminiforjev in ugotavljal, da med njimi ni kovin, pač pa razne vrste soli (1768, 12, 19). V nasprotju z Zanottijem je po poskusu iz leta 1770 menil, da "bolonjski kamen" pod modrim steklom sveti modro, pod rdečim pa rdeče, a je pozneje dvomil o točnosti meritev. Priestley jih je kljub temu navajal leta 1772 v podporo Newtonovi korpuskularni teoriji svetlobe, kar je močno jezilo Seebecka (Goethe, 1810, 342, 709-710, 711-714; Wilde, 1843, 386; Nielsen, 1991, 145).

Švicar Leonhard Euler (1707-1783), profesor matematike na univerzi v Berlinu, je leta 1746 luminiscenco pojasnjeval z lastnimi nihanji telesa, ki jih sproži absorbirana svetloba. Njegovi valovni teoriji je nasprotoval Bošković, po katerem naj bi se delec svetlobe absorbi-



Slika 3: Naslovnica Beccarijeve knjige z dvema razpravama o "fosforjih" Jezuit Gottlieb Leopold Biwald (1731-1805), vplivni zagovornik Boškovičeve teorije, ki je v šestdesetih letih predaval tudi na ljubljanskem liceju, je ob svojih izpitnih tezah v Gradcu leta 1768 ponatisnil tudi Beccarijevi razpravi o "fosforjih". Knjiga je bila leta 1798 popisana v knjižnici Jožefa Klasanca Erberga (1771-1843) v Dolu, leta 1803 pa jo je Franz Wilde (1753-1828) popisal v licejski knjižnici v Ljubljani.

ral v telesu pri razdalji od materialnih točk, v kateri prevladuje privlak. Zaradi notranjega toplotnega gibanja naj bi se isti delec izseval z manjšo hitrostjo nihanja (frekvenco) na razdalji, pri kateri prevladuje odbojna sila. Zakasnitev pri fosforescenci pa je pojasnjeval podobno kot drugi sodobniki: "Po blodnjah vzdolž mnogoštevilnih in raznolikih stez znotraj neprozornih teles svetloba vsaj deloma pride do površinskih delcev in nato odleti. Od tod vsekakor izhaja tista svetloba mnogoštevilnih nam dostopnih fosforescentnih teles, ki se je s Sonca skrila v temo in sveti nekaj sekund. Število sekund nam omogoča ugibanje glede dolžine poti med tolikerimi gibanji sem in tja znotraj teles..." (Bošković, Num.491).

### Odmevi raziskovanja luminiscence v Ljubljani

Med 51 eksperimentalnimi napravami za pouk fizike in matematike v Ljubljani, predloženimi 17.9.1755, je bil verjetno tudi "bolonjski kamen", čeprav je namesto običajnega "lapis" uporabljen izraz "vitra Bononiensia". V Kersnikovem popisu iz leta 1811 pa najdemo tako barit kot fosfor (Južnič, 1994, 27).

Med najstarejšimi v Ljubljani objavljenimi zapisi o luminiscenci so licejske izpitne teze o toploti in svetlobi profesorja fizike Schoettla iz leta 1772. Teze so temeljile na Newtonovem nauku v priredbi Holandca Hermana Boerhaava (1668-1738), profesorja medicine, botanike in kemije v Leydenu od leta 1708.

Luminiscenco je zadevala 26. teza, kjer je Schoettl spraševal študente: "Kakšna je razlika med žarenjem,

vročino in svetlobo? Kaj je pyrophorus? Kaj in kateri so fosforji? Katere so značilnosti umetnih in naravnih fosforjev? Ali je svetloba fosforja sama svetloba Sonca, ali se resnična svetloba (luminiforja) skriva znotraj telesa in jo vzbudi sončni sij, ali naposled (absorbirana) svetloba v (luminiforju) povzroči gibanje svetlobe?"

Po Schoettlu je fizikalno katedro na liceju v Ljubljani prevzel Ambschel, pomemben zagovornik Boškovičeve fizike. V njegovih izpitnih tezah ni vprašanj o luminiscenci, opisal pa jo je v pregledu fizike, ki ga je po ukinitvi ljubljanskega liceja objavil kot profesor fizike in mehanike na dunajski univezi.

Ambschel je razlikoval "fosforje", ki svetijo le v stiku z zrakom, in druge, "ki se ne vežejo ob stiku z zrakom, svetijo tudi v praznem prostoru, tako da morajo dobiti svetlobo od Sonca, ali pa svetijo zaradi povišanja temperature. Bolonjski fosfor sveti na zraku in v praznem prostoru..." (str.284).

Luminiscenco je opazoval skozi prizmo v zatemnjeni sobi z odprtino za vpadno svetlobo. Opisal je kratkotrajno elektroluminiscenco ob praznjenju v zraku (285) in v vakuumu barometerske cevi (290-292). Glede fosforescence diamantov bi "se pri nadaljnjih poskusih splačalo podrobneje poznati sestavne dele diamanta in sile, ki jih združujejo" (285, 290).

### 3 RAZISKOVANJA LUMINISCENCE V NEMČIJI PO ODKRITJU ULTRAVIJOLIČNE SVETLOBE

V teoriji barv je Goethe leta 1810 opisal barve pri fluorescenci "lignum nephriticum". Na koncu dela je priobčil poskuse, s katerimi se je od leta 1806 ukvarjal njegov varovanec Seebeck iz Jene, danes bolj znan po odkritju termoelektričnosti iz leta 1821.

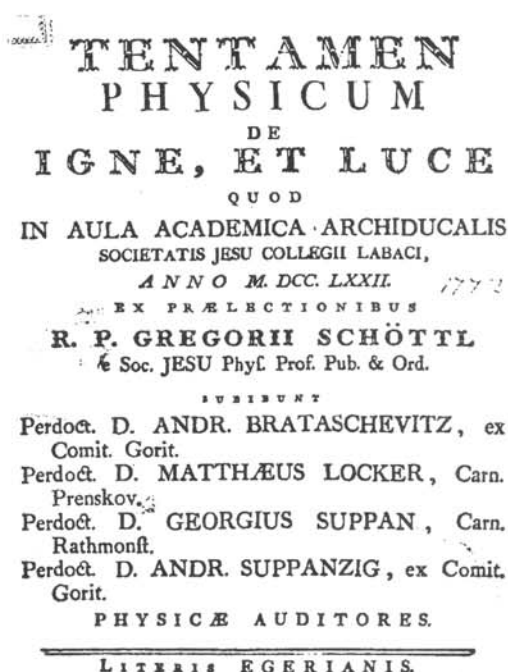
Seebeck je s "posebnim veseljem" potrdil Zanottijevo domnevo, da vsaka vrsta "bolonjskega kamna" oddaja svetlobo značilne barve ne glede na barvo vzbujane svetlobe (Seebeck, 1810, 710).

Po Seebecku imata modra in vijolična barva "vzbujevalno silo", saj povzročata fosforescenco enako lahko in močno kot bela svetloba. Rdeča in rumena svetloba pa imata, nasprotno, "silo depresije", saj naj bi luminiscenčna snov, ki bi sicer svetila še nekaj minut, izgubila svojo svetlobo po nekaj sekundah obsevanja. To je bilo eno prvih poročil o stimulirani emisiji. Seebeck je, podobno kot Goethe, naspotoval Newtonovi ugotovitvi, da je bela svetloba sestavljena iz spektralnih barv (Nielsen, 1991, 143, 144-145).

Heinrich je opazoval fosforescenco skozi majhno odprtino v temni sobi, podobno kot Beccaria in Ambschel. Luminiforje je razdelil v pet vrst, pri katerih fosforescenco vzbuja:

1. sončna svetloba
2. izgorevanje
3. nastane sama po sebi pri rastlinah in živalih
4. tlak, rezanje ali trenje
5. kemijska reakcija

Ker najbolj fosforescirajo ravno negorljive snovi, se je Heinrichu zdel neprimeren opis fosforescence kot počasnega gorenja. Res so pozneje s počasnim gorenjem opisali le svetlikanje elementa fosforja, ne pa



26. In quo discrimen fit inter corpus ardens, calidum, & lucidum? quid pyrophorus? quid, & quotaplex phosphorus? qui precipui phosphori artificiales & naturales? an lux phosphorum fit ipsa lux solis, an vero lux inter eorum interficia delitefcens, & allapfa radiorum solarium excita- sa, an denique lux motu intestino generata?

Slika 4: Naslovnica in 26. izpitna teza pri Schoettlu leta 1772

pravih luminiforjev. Kljub temu naj bi se pri fosforescenci izsevala svetloba in vezal kisik, pri absorpciji svetlobe pa naj bi se kisik sprostil.

Zaradi spremembe barve ob fosforescenci je Heinrich zavračal razlago z večkratnim odbojem svetlobe v snovi. Heinrich je fosforescenco po segrevanju razlagal kot razkroj snovi, ki sprosti Newtonove materialne delce svetlobe. Po drugi strani pa je opisal nihanje etra po analogiji z nihanjem mrežnice očesa ob absorpciji fizioloških barv. Zaradi tega nasprotja pariški Institut leta 1809 ni prisodil nagrade Heinrichovemu raziskovanju fosforescence, temveč manj odmevnim Desaignesovim raziskavam (Wilde, 1843, 386, 406-407). Deset let pozneje pa so pariški akademiki že morali nagraditi Fresnelovo valovno teorijo svetlobe, ki se je v Stokesovem delu uveljavila tudi kot boljša teorija luminiscence.

Po Heinrichu vsaka barva absorbirane svetlobe ne povzroči fosforescence, denimo pri diamantu. Poskuse z diamanti je nadaljeval Riess, ki je leta 1845 potrdil domnevo Angleža Wilsona (1775), Ritterja (1805) in Seebecka (1806), da modra svetloba večje lomnosti (frekvence) povzroča veliko več fosforescence od rdečega dela sončne svetlobe (Riess, 1845, 335). Pozneje je Riess ostro polemiziral o naravi svetlobe v katodni elektronki z Edmundom Reitlingerjem (1830-1882) z dunajske politehniko, ki je nadaljeval Plückerjevo in Hittorfovo delo.

#### 4. SKLEP

Lekarnar in fizik z akademije v Münchnu Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) je leta 1801 opisal ultravijolično svetlobo. Pol stoletja raziskav je pokazalo, da gre za svetlobo višjih frekvenc od vidne. Stokes je potem lahko zapisal, da luminiscenca "daje fizikom oči za opazovanje nevidne svetlobe", ki jih bomo opisali v drugem delu razprave.

#### LITERATURA

- Anton Ambschel (1751 Győr do 1821 Bratislava), profesor fizike na liceju v Ljubljani med leti 1773-1785, zadnja leta tudi rektor, *Anfangsgründe der allgemeinen auf Erscheinungen und Versuche gebauten Naturlehre*, IV. knjiga, Wien, 1792
- Kristoph Adolf Balduini (1632-1682), sodnik iz Grossenhayna na Saškem, *Aurum superius et inferius aurae superioris et inferioris hermeticum, et phosphorus hermeticus sive magnes luminaris*, [Francoforti et Lipsae, 1675
- Erazem Bartholin (1625-1698), *Experimenta crystalli islandici diastylastici quibus mira et insolita refractio detegitur*, Havn. 1669
- Giovanni Batista Beccaria (1716-1781), profesor fizike na univerzi v Torinu, *Comentarii duo, de phosphoris naturalibus et artificialibus, ex actis Bononiensibus excerpti*, Graecii, 1768

- Ruder Josip Bošković (1711-1787), hrvaški jezuit, profesor na Collegio Romano, *Theoria philosophiae naturalis*, Venetis, 1763. Reprint: Zagreb, 1974
- Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832), *Zur Farbenlehre*, Tübingen, 1810. V drugem delu knjige *Geschichte der Farbenlehre* je Thomas Johann Seebeck (1770-1831), član akademije v Berlinu od leta 1818, objavil na str.703-724 *Wirkungen farbiger Beleuchtung*
- Placidus Heinrich (1758-1825), benediktinec, profesor eksperimentalne fizike na liceju v Regensburgu, *Die Phosphoreszenz der Körper usw.*, 5 abhandlungen Nürnberg, 1811-1820
- Stanislav Južnič, *Zgodovina vakuumske tehnike* (III. del), *Vakuumist*, 14/1 (1994) 27-31
- Johann Kunckel von Löwenstern (1630-1703), farmacevt in dvorni alkimist v Dresdenu, *Oeffentliche Zuschrift von der Phosphor mirabili*, Leipzig, 1678, ponatis v: *V. Curiose Chymische Tractätlein*, Franckfurth in Leipzig, 1721. Na knjigi v NUKu ročno vpisan Freyerjev exlibris brez datuma.
- Collegium Physico-chemicum experimentale, oder Laboratorium chymicum, Hamburg und Leipzig, 1716, posthumno. 3. izdaja, Hamburg, 1738
- Athanasii Kircher (1601-1680), jezuit, profesor matematike, fizike in orientalskih jezikov na Collegio Romano, *Ars magna lucis et umbrae*, Romae, 1646. Na knjigi v NUKu ročno vpisan jezuitski exlibris na naslovnici z letnico 1697.
- Tita Kovač-Artemis, *Kemiki skozi stoletja*, MK, Ljubljana, 1984
- Boris Grigorjevič Kuznecov, *Galilei*, Nauka, Moskva, 1964
- Giulio Cesaro Lagalla (tudi La Galla, 1571 Neapelj do 1624 Rim), *De Pheanomenis in Orbe Lunae, novi telescopii usu a Galilaeo nunciterum suscitatis, phisica disputatio. Item de luce et lumine altera disp.* Venetia, 1612
- Fortunius Licetus (1577 Rapallo do 1657 Padova), *Litheophosphorus sive de lapide Bononiens, lucem inse conceptam ab ambiente claro mox in tenebris mire conservante liber*, Utini, 1640 *De Lunae subobscura luce prope conjunctiones et in deliquiia observationes*, ib.1640
- Milorad Mladenović, *Razvoj fizike, Optika, Građevinska knjiga*, Beograd, 1985
- Nicolau Monardis (1493-1570), hispanensi medico, *De simplicibus medicamentis ex occidentali India delatis, quorum in medicina usus est*, Antverpiae, 1574
- Keld Nielsen, *Another kind of light: The work of T.J. Seebeck and his collaboration with Goethe, Part I*, *HSPS*, 20 (1989) 107-178
- Johann Puluj (1845-1918), *Strahlende Elektrodenmaterie*, Wien. Ber. 81 (1880) 864-923. Prevod v *Physical memoirs*, London, 1889
- Peter Theodor Riess (1805-1883), profesor in akademik v Berlinu, *Zur Phosphorescence des Diamants*, *Ann. Phys.* 64 (1845) 334-335
- Gregor Schoettl (1732 Steyr do 1777), profesor fizike na liceju v Ljubljani med 22.10.1768 in 9.10.1773, *Tentamen Physicum de igne, et luce quod in aula academica arhiducalis societatis jesu collegii, Labaci, 1772.*
- Emil Wilde (1793-1859), profesor matematike in fizike na berlinski gimnaziji, *Geschichte der Optik vom Ursprunge dieser Wissenschaft bis auf die gegenwärtige Zeit*, Berlin, Rucker & Püchler, 1843, II del
- Francesco Marie Zanotti (1692-1777), profesor logike, filozofije in fizike na univerzi in predsednik akademije v bolonji, *De Bononiensi scientiarum academia commentarii*, Bononiae, 1731

## In memoriam

### Dr. Borut B. Lavrenčič (1942-1996)



Poslovili smo se od dr. Boruta B. Lavrenčiča. Mnogo prezgodaj je odšel, saj smo ga poznali polnega načrtov. Tudi boleznini ni uspelo uničiti njegove življenjske volje, vzela pa nam je Boruta.

Rojen je bil 7. avgusta 1942 v Ljubljani. Diplomiral je leta 1965 na Oddelku za fiziko Fakultete za naravoslovje in tehnologijo Univerze v Ljubljani. Kot nadarjen študent je takoj po diplomi odšel na študij k profesorju Uehlingu na University of Washington v Seattleu v Združenih državah Amerike. Tu je magistriral kot najboljši študent univerze. Žal se je že tedaj oglasila bolezen in moral je predčasno prekiniti izpopolnjevanje. Vrnil se je v Ljubljano na Institut "Jožef Stefan". Tu so tedaj v Odseku za fiziko trdne snovi potekale raziskave feroelektričnih tekočih kristalov z metodami jedrske magnetne resonance. Borut Lavrenčič je prvi začel optične raziskave feroelektričnih kristalov - postavil je optični laboratorij v okviru odseka. Njegove pionirske članke o ramanskem sipanju v feroelektričnih kristalih še danes citirajo kot pomembna dela. S tega področja obsega njegova bibliografija 21 znanstvenih člankov v mednarodnih revijah in 22

objavljenih prispevkov z mednarodnih strokovnih srečanj. Pozneje se je posvetil tudi aplikativnim raziskavam in vodil skupino za aplikacijo feroelektrikov. Rezultat teh raziskav je bil uspešen razvoj javljalnikov požarov in detektorjev za protivlomno zaščito ter prenos te tehnologije v proizvodnjo. V zadnjih letih se je ukvarjal z raziskavami feroelektričnih tankih plasti, ki jih je še pred kratkim objavil tudi v Vakuumistu. Rezultat aplikativnih raziskav je pet patentov in tehničnih izboljšav.

Za svoje delo je bil dr. Lavrenčič večkrat nagrajen. Leta 1982 je dobil nagrado sklada Borisa Kidriča za raziskave dinamike faznih prehodov s sipanjem laserske svetlobe in istega leta še nagrado sklada za izum "Pasivna infrardeča alarmna naprava". Leta 1984 je prejel nagrado za izum "Naprava in sistem naprav za protipožarno zaščito industrijskih in odpadševalnih kanalov", leta 1987 pa za izum "Optoelektronski javljalnik plamena". Te nagrade je dobil skupaj s sodelavci.

Že med podiplomskim študijem v Ameriki si je nabral računalniškega znanja in potem ves čas spremljal razvoj na tem področju. V zadnjih petih letih se je intenzivno vključil v razvoj sodobnih komunikacijskih sistemov. Bil je eden prvih v Sloveniji, ki je spoznal pomembnost komuniciranja z elektronsko pošto in prenašanja podatkov po računalniških omrežjih. Še v Jugoslaviji je pomagal pri ustanovitvi podjetja YUNAC, ki je uvedlo elektronsko pošto za univerze in inštitute po vsej državi. Širil je znanje o novih možnostih komuniciranja in sodeloval pri tovrstnih seminarjih. Predvsem na Institutu "Jožef Stefan" je pomagal mnogim sodelavcem pri obvladovanju spretnosti pri delu s temi novimi elektronskimi mediji. Med vojno leta 1991 je po elektronski pošti vsakodnevno seznanjal strokovno javnost po vsem svetu o stanju v Sloveniji. Leta 1992 je pomagal pri ustanavljanju akademske in raziskovalne mreže Slovenije ARNES. Ukvarjal se je tudi z varovanjem elektronskih podatkov in s kriptografijo. Priredil je seminarje in izdajal zbornike s to tematiko. Po osamosvojitvi se je vključil v sindikalno gibanje na Institutu "Jožef Stefan" in na ta način postal znan vsem sodelavcem instituta. Zaradi aktivnosti in zaupanja, ki si ga je pridobil pri sodelavcih, so ga le-ti izvolili za svojega predstavnika v upravnem odboru instituta.

Delo, ki ga je začel dr. Lavrenčič, nadaljujejo mladi raziskovalci. Na temeljih, ki jih je on postavil.

Dr. Janez Slak



## BALZERS AG - v 50 letih od vojaške barake do multinacionalke visoke tehnologije

Druge svetovne vojne je bilo konec. V Nemčiji so vladali malodušje, kaos in obup. Dr. Auwärter je takrat delal v kraju Onstmettingen in je med drugim sodeloval tudi z znanim proizvajalcem harmonik Hohner. Dr. Karl Hohner mu je ob nekem srečanju poročal o pogovoru, ki ga je imel s Liechtensteinskim knezom Franzem Jožefom II. Kneza je skrbela prihodnost njegove dežele, saj je bilo gospodarstvo izrazito kmetijsko usmerjeno. Gospod Hohner je knezu predložil razgovor z dr. Auwärterjem, češ da mu bo ta mladi, nadebudni mož lažje svetoval o možnostih razvoja industrije v Liechtensteinu. Do srečanja med knezom in dr. Auwärterjem je pozneje tudi prišlo. Dr. Auwärter poroča v svojih spominih, da ga je knez posebej opozoril na kmečki značaj prebivalstva v Liechtensteinu, ki nikakor ne bi preneslo neke masovne produkcije na tekočih trakovih. Ko sta razmišljala o proizvodnem programu se je dr. Auwärter spomnil svojega starega patenta o rodijevih zrcalih. Takšna zrcala so kemijsko stabilna, odporna so proti razenju in zelo malo sipljejo svetlobo. Nemške tovarne, kjer so proizvajali takšna zrcala, so bile ob koncu vojne popolnoma porušene. Znanje in izkušnje dr. Auwärterja pa so ostale nedotaknjene. Tako sta se s knezom odločila, da bodo tanke plasti osnova nove tovarne. Knez je povabil dr. Auwärterja, da organizira in vodi izgradnjo potrebnih proizvodnih obratov.

Glede na nemogoče poveljne okoliščine v Nemčiji (sankcije, prepoved gibanja) je bil Liechtenstein vabljen kraj, kjer niso poznali omejitev, pot v svet je bila odprta, pomembna je bila tudi bližina Švice. Vse to je vplivalo na odločitev dr. Auwärterja, da sprejme izziv. 22. feb. 1946 je odpovedal službo v firmi W.C. Heraeus iz Hanaua. Prvi koraki, ki jih je naredil v Liechtensteinu, so bili vse prej kot lahki. Skoraj nemogoče je bilo dobiti izkušene delavce iz Švice; za potovanja tja je potreboval vizo. Veliko upanje za dr. Auwärterja je bila odločitev dveh njegovih dolgoletnih prijateljev in sode-

lavcev iz Leybolda, dr. Otta Winklerja in dr. Alberta Rossa, da se mu pridružita, za kar pa sta potrebovala posebno dovoljenje švicarskih oblasti. Medtem ko si je dr. Winkler pridobil začasno dovoljenje, pa ga dr. Ross ni dobil nikoli.

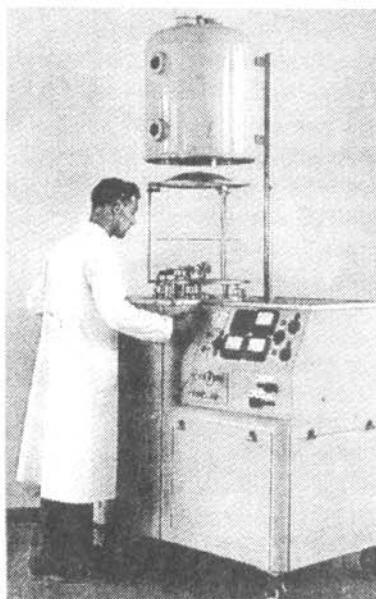
Za najprimernejši kraj postavitve tovarne so izbrali Balzers. Julija so registrirali podjetje z imenom "Gerätebau-Anstalt Balzers". Vodenje podjetja je bilo zaupano dr. Auwärterju, ki je imel 50%-ni delež v tem podjetju, preostalo pa sta imela knez in industrialec Emil Georg Bührle. Z izgradnjo objektov so pričeli meseca oktobra in že v decembru sta bili postavljeni dve vojaški baraki. Konec leta so zaposlili prve delavce. Prve izdelke za naročnike so naredili v letu 1948. Ves ta čas so se financirali s sredstvi, ki jih je zagotavljal solastnik Balzersa, podjetnik E.G. Bührle. Le-ta je očitno imel veliko zaupanje v ljudi, ki so vodili ta, relativno tvegan projekt. Finančni partner in pokrovitelj Balzersa je ostal vse do danes.

Ker proizvajalci vakuumske opreme iz Nemčije niso bili zmožni izpolniti naročil, so se v Balzersu morali sami lotiti proizvodnje vakuumskih naprav in komponent, ki so kmalu postale najpomembnejši del proizvodnje. Pozneje, leta 1957, so proizvodnjo vakuumske opreme prenesli v švicarsko mesto Trübbach. Prvo veliko naročilo so dobili leta 1958, ko so opremili pospeševalnik CERN za vakuumskimi črpalnimi postajami. Leta 1969 so kupili tovarno vakuumskih črpal Arthur Peiffer (Wetzlar, Nemčija), ki je imela dolgo tradicijo v razvoju vakuumskih črpal. Najpomembnejši rezultat tega nakupa je bila razširitev prodajne ponudbe s turbomolekularnimi črpalami.

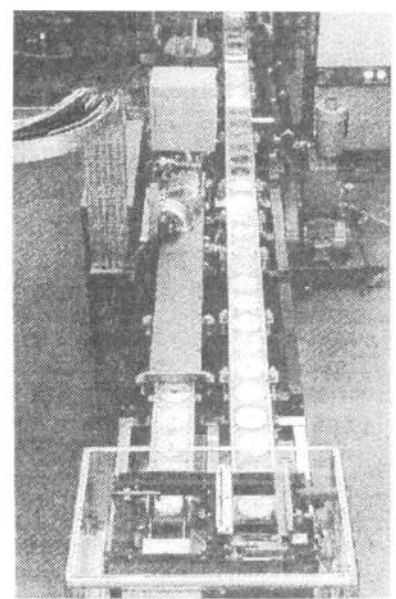
Mlado podjetje so odlikovali mladi ljudje s popolnoma novimi zamislimi. Njihov osnovni cilj je bil razviti postopke za pripravo tankih plasti in zgraditi naprave, potrebne za industrijsko implementacijo teh procesov. Kombinirali so procesno tehniko, hardver in trženje v



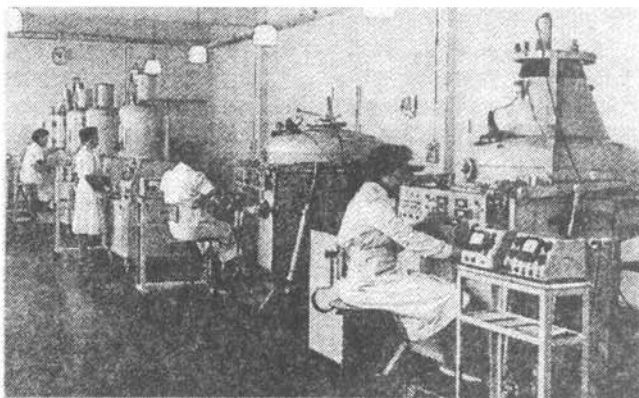
Slika 1. Prof. Dr. Max Auwärter leta 1946 (1908-1995)



Slika 2. Naprava za napajanje optičnih prekrivanj BA 500 (1954)



Slika 3. Naprava CDI 601 za proizvodnjo zgoščen (1985)



Slika 4. Proizvodnja tankih plasti leta 1949

paketu. Še več: uvedli so nove modele sodelovanja, npr. s tovarno Leitz Wetzlar, kjer je Gerätebau Anstalt Balzers (G.A.B.) vzel v najem prostor znotraj Leitzovih proizvodnih prostorov za optične komponente, jih opremil s svojimi napravami, ki jih je upravljalo osebje G.A.B. Leitzova optika je šla skozi prostore G.A.B. samo v fazi prekritja s tankimi plastmi. Na tak način so dosegli učinkovito in hitro integracijo, brez odvečnega transporta in inšpekcijskih pregledov. Vakuumske komponente, vakuumski sistemi in tanke plasti so postali trije oporni stebri razvoja podjetja, ki so se idealno dopolnjevali.

Potreba po zelo čistih materialih za napajanje jih je pripeljala do razvoja naprav za vakuumsko metalurgijo, ki so zelo hitro našle pot na svetovno tržišče. Leta 1959 so prodali 150 takšnih naprav. S trženjem materialov za napajanje so pričeli leta 1960. Leta 1970 so ponudbo razširili s tarčami za naprševalnike. Pri vakuumski metalurgiji so se srečali s problemom merjenja koncentracije plinov v kovinah. V ta namen so razvili instrument "Exhalograph", ki so ga uspešno tržili od leta 1960 do 1975.

Intenzivnejši razvoj na področju ultravisokega vakuuma se je pričel leta 1958, ko so razvili za tržišče prvi kvadrupolni masni spektrometer. Leta 1982 pa so izdelali prvi helijev merilnik puščanja. Takšni instrumenti so našli uporabo ne samo v raziskovalnih inštitucijah, ampak predvsem v industriji hladilnih naprav, žarnic in TV slikovnih elektronk, v proizvodnji polprevodnikov, medicini itd.

Prvih štirideset let svojega obstoja so v Balzersu razvijali univerzalno uporabne naprave za nanos tankih plasti. Takšne so bile zdaj že legendarne naprave BA 500, BA 510 in 710 za nanos optičnih prevlek, ki so jih razvili v petdesetih letih. V tistem času so naredili tudi prve naprave za nanos prevodnih plasti na vzorce za elektronsko mikroskopijo. Leta 1968 pa so razvili naprave iz serije BAK, namenjene tako za uporabo v optiki kot tudi v elektroniki. Tem napravam so sledile tiste z oznako LLS 800 (Load Lock System) in pa naprševalniki za različne vrste uporabe. V zadnjem desetletju so Balzersovi strokovnjaki razvijali naprave, ki so bile namenjene za



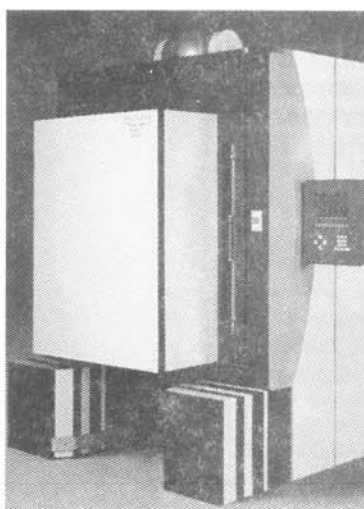
Slika 4 Serijska proizvodnja difuzijskih črpalk (1962)

specifično uporabo, kot npr. CDI 600 in CDI 800, ki pomenita mejnik v industrijski proizvodnji zgoščenk (compact disc). Najnovejše naprave iz te serije, CDI 900, CDI "Swivel", SDS 100 in 131, so v osnovi namenjene za proizvodnjo naprav za shranjevanje podatkov. Novost je tudi naprava KAI za kemijski nanos plasti, podprt z plazmo, ki je namenjen za izdelavo prikazalnikov.

Na področju tankih plasti je šel razvoj prav tako zelo uspešno. V prvih dveh desetletjih so v njihovi proizvodnji prevladovala antirefleksna prekritja za leče. Auwärterjevo odkritje reaktivnega napajanja iz leta 1952, ki je bilo osnova za pripravo trdih kovinskih oksidov, je imelo velik poslovni pomen in je zagotovilo veliko tehnološko prednost Balzersa v daljšem časovnem obdobju. Tanke plasti v elektroniki so začeli uvajati leta 1967, ko so izdelali postopek za pripravo kromovih mask. Leta 1975 so začeli proizvodnjo presojnih prevodnih plasti (ITO plast) za tekočokristalne prikazalnike. Visoko avtomatizirana linija za nanašanje ITO plasti so skupaj z Merckom iz Darmstadta postavili na Tajvanu.

Novo, veliko in obetavno tržišče so osvojili s trdimi zaščitnimi prevlekami konec sedemdesetih let. Te prevleke so bile rezultat intenzivnih raziskav in velikih investicij. Od leta 1983 je Balzers ustanovil posebne centre v glavnih evropskih državah, v ZDA, na Japonskem in v Indiji. Danes deluje 24 takšnih centrov. Naprave in "know-how" pa so prodali številnim proizvajalcem orodja. Na tem področju si je Balzers zagotovil vodilno mesto na svetu.

Konec osemdesetih let, ko je prišlo do zelo močnega povečanja naročil na področju vakuumske tehnologije, so v Balzersu ustvarili največji prihodek v zgodovini podjetja: 549 milijonov švicarskih frankov. Temu obdobju je sledil razpad vzhodnoevropskih gospodarstev, ki je povzročil recesijo gospodarstva tudi na Zahodu. Nastale razmere so prisilile večna tekmeča Balzers in Leybold k skupnemu nastopanju na svetovnih trgih. Do združitve je prišlo, ko je leta 1995 Degussa AG prodala delnice



Slika 6. Najnovejša verzija naprave za nanos trdih zaščitnih prevlek BAI 1200.

Leybolda koncernu Oerlikon-Bührle, ki je bil takrat že edini lastnik Balzersa. Z združitvijo je nastalo eno največjih podjetij s področja vakuumske tehnike in tehnologij ter tankih plasti. Balzers in Leybold sestavljata osem poslovnih enot, od katerih sta dve (Materiali, Instrumenti) združeni. Od preostalih šestih so tri Balzsove, in sicer: Tankoplastne komponente, Procesni sistemi in Trdne zaščitne prevleke.

Ta zapis je nastal iz dveh namenov. Prvič, ob petdesetletnici predstaviti svetovnega velikana na področju vakuumske tehnike in tehnologij. In drugič: podjetje Balzers je šolski primer za vse tiste, ki jih zanima, kako lahko v nekem industrijsko nerazvitem okolju začnemo razvoj najmodernejših tehnologij.

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

### Primer znanstvene industrije za tretje tisočletje

Konec septembra 1996 sem se kot gost udeležil slovesnega praznovanja 50-letnice Balzersa, te svetovno znane multinacionalke na področju vakuumske tehnike in tankih plasti. V tem zapisu bom nanizal nekaj misli, ki so bile izrečene na slovesnosti. Mogoče bo kdo od bralcev našel v njih oporo pri iskanju razvojnih perspektiv svojega podjetja. Preko 450 gostom iz vsega sveta so gostitelji po obhodu razvojnih in proizvodnih obratov prikazali, kako so z izjemnim znanjem, s pravimi idejami in ob idealnih "robnih pogojih" (denar, okolje, šolanje) brez vmešavanja politike, naredili takorekoč iz nič uspešno visoko-tehnološko-znanstveno industrijo. Značilne in za nas aktualne so besede, ki jih je na proslavi izrekel šef vlade Liechtensteina dr. Mario Frick: "Nas, nekaj politikov je ves čas skrbelo samo to, da smo Balzersu ustvarjali čim boljše pogoje za razvoj, dajali okvir, za lepo sliko pa so poskrbeli sami s svojim znanjem in delavnostjo". Prepričani so, da je za specializirano industrijo, kot je Balzers, nujna organizacija v obliki multinacionalke z razvejeno in uspešno proizvodnjo in prodajo, od Evrope, Amerike, Japonske, do najbolj prodornih azijskih držav. Pretok znanja, kapitala in poslovnosti ne potrebuje več meja. Vzorec za Slovenijo? Morda. Naj ob tem poudarim, da Liechtenstein ni član Evropske zveze, je pa član vseh pomembnejših mednarodnih institucij, kot so: UN, EFTA, UNCTAD, Council of Europe, ECE, EBRD, EEA, IAEA, ICJ, ITU, USCE, EPO, WTO, WIPO itd. So tudi podpisniki vseh evropskih konvencij, zato so tesno vpeti v vsa evropska dogajanja.

Ves čas obstoja tovarne delajo raziskovalci in doktorji znanosti ne samo v razvoju, ampak tudi v vodstvu, proizvodnji, kontroli kvalitete in pri prodaji znanja. Vseh 50 let so tovarno vodili svetovno znani znanstveniki. Dr. Auwärter jo je vodil od ustanovitve do leta 1976. Naslednjih 6 let je bil prvi mož Balzersa dr. Albert Ross. Njega je nasledil dr. Gilbert Zinsmeister (znan teoretični fizik na področju površin in tankih plasti). Od leta 1991 do 1994 je tovarno vodil prav tako uveljavljen znanstvenik dr. Jorg Vogel. Od leta 1994 pa Balzers vodi dr. Horst Heidsteck.

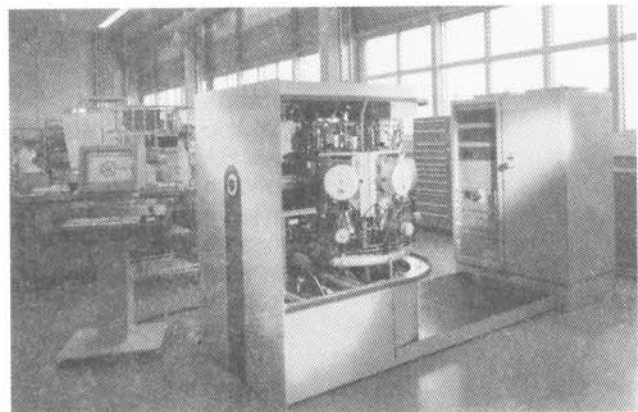
Vzdrževanje Balzsove znanstvene industrije na svetovnem nivoju je vseskozi zahtevalo uporabo širokega spektra znanj in predvsem interdisciplinarnost. Le-ta je bila osnova njihovega dela, saj so uspešno združili znanje s področja vakuumske tehnike, fizike, kemije, strojništva, elektronike, metalurgije in optike. Dr. Auwärter je že pred 50 leti zagovarjal idejo o "solanju skozi vse življenje" (lifelong learning). V tovarni in okolici so zato izsolali preko 1000 specialistov, tehnikov in tudi znanstvenikov. Skrb za zaposlovanje domačinov, njihovo šolanje in uspehi Balzersa so pomemben člen v uspešni industrializaciji Liechtensteina.

Geslo "globalna konkurenca" (global competition) je obvezno vgrajeno v delo Balzsovih sodelavcev na vseh nivojih. Zato so ob 50-letnici izbrali geslo za tretje tisočletje: BEST (Business Excellence Strategy). Zavedajo se, da so tehnološke inovacije ob največji podpori znanosti in interdisciplinarno usposobljenih raziskovalcev do delavcev v proizvodnji ključni faktor uspeha njihovih tehnologij. Odličnost pa lahko zagotovijo samo tako, da imajo v svojih rokah vse faze, od surovin do izdelave komponent, sistemov, kontrole po vseh veljavnih standardih pa do takojšnjega servisa. Strategija BEST dopolnjuje dosedanja Total Quality Management. Zato kvaliteta naprav in tehnoloških procesov že danes presega standarde DIN/ISO 9000.

Večina naprav, ki jih ponujajo na tržišču, ni starejših od 2 do 3 let. Izpopolnitve si ne sledijo letno, ampak kar na nekaj mesecev. Učinkovitost naprav (produktivnost) se mora namreč neprestano večati, cena naprav pa istočasno manjšati. V vsem tem pa je samo znanje, inovacije in še enkrat znanje. Filozofija, ki ji pri Balzersu sledijo, je: ob tesnem sodelovanju z uporabniki razviti naprave za točno določen namen. V Balzersu že ves čas dajejo kupcem možnost, da sodeluje z idejami in predlogi pri izpopolnjevanju tehnologij. Istočasno pa to nudi največje zadovoljstvo tudi zaposlenim, ki so vpeti v svetovna razvojna dogajanja. Na tak način postaja danes majhna skupnost Balzers z nekaj več kot 2000 delavci del globalne tehnološke strategije in tako pomaga uresničiti osnovno idejo dr. M. Auwärterja izpred 50 let, kako fiziko površin in tankih plasti tehnološko in tudi ekonomsko uresničiti, in to samo s svojim znanjem.

Naj za konec omenim se to, da sta na slovesnosti sodelovala tudi slovenska pianista Puhar in Domjanič.

Prof. Dr. Boris Navinšek  
Institut Jožef Stefan,  
Jamova 39, 1000 Ljubljana



Eden od najnovejših izdelkov Balzersa: naprava za proizvodnjo CD plošč. Za izdelavo ene CD plošče je potreben čas 1.4 sekunde.

# NASVETI

## VAKUUMSKI LOVILNIKI IN PASTI

Lovilnike in pasti uporabljamo za lovljenje par z namenom, da bi preprečili ali vsaj močno zmanjšali njihov prodor iz enega dela črpalnega sistema v drugi. Pri vakuumskih sistemih z oljnimi difuzijskimi črpalkami so to pare pogonske tekočine, tj. specialnega olja, ki zaradi povratnega toka iz difuzijske črpalke uhaja v smeri proti vakuumski posodi. Da bi torej preprečili onesnaženje le-te, vstavimo nad difuzijsko črpalko lovilnik par, nad njim pa lahko še past. Razlika med njima je, da lovilnik (angl. baffle) vrača kondenzirane pare, tj. kondenzat, pogonske tekočine v črpalko, med tem ko jih past (angl. trap) zadrži. Pri obeh je princip delovanja enak: pare, ki zadenejo njune hladne površine, se na njih kondenzirajo. Konstrukcija teh vakuumskih elementov mora ustrezati vsaj dvema glavnima zahtevama, in sicer: da je njihova zaščitna sposobnost pred onesnaženjem vakuumске posode kar se da velika in da je zmanjšanje črpalne hitrosti čim manjše. Lovilniki in pasti so namreč ovira za pretok oz. črpanje iz vakuumске posode. Dobre konstrukcije naj ne bi zmanjšale črpalne hitrosti, ali bolje, pretoka plina (zraka), za več kot 30 in največ do 50 %. Drugače povedano, njihova specifična prevodnost mora biti med 3 in 4  $\text{ls}^{-1}\text{cm}^2$ . So pa še druge zahteve, kot npr., da jih lahko čistimo, da jih je možno pregrevati (pri UVV sistemih), da imajo minimalno porabo hladilnega sredstva itd.

Osnovni tipi vakuumskih lovilnikov in pasti so naslednji:

1) Mehanični lovilniki so hlajeni z vodo, oljne pare povratnega toka se kondenzirajo na hlajenih "rebrih", ki so postavljena tako, da nobena molekula pare ne more prodreti iz difuzijske črpalke v vakuumsko posodo, ne da bi vanje nekajkrat zadela in se na njih kondenzirala. Nekaj zgledov lovilnikov je na sliki 1.

*Nasvet.* Če tak lovilnik npr. pogledamo z vrha ali od spodaj, ni mogoče videti skozenj. Ta nasvet velja za razstavljive lovilnike, in sicer takrat, ko jih po čiščenju ponovno sestavimo.

Mehanični lovilnik je tudi ploščni ventil, ki se odpira tako, da se nekoliko dvigne nad svoj sedež (baffle valve) in tudi vsaka krivina ali koleno v vakuumskem vodu od difuzijske črpalke do vakuumске posode. Splošno velja, da so "lovilniki" vse tiste hladne površine, na katere priletijo molekule pare in se tam kondenzirajo. Kondenzacija par pa je seveda najbolj učinkovita na profesionalnih "lovilnikih oz. pasteh.

V skupino mehaničnih lovilnikov spada tudi "hladna kapa" (sl. 2), ki je navadno montirana nad 1. stopnjo večstopenjske difuzijske črpalke, da preprečuje povratni tok oljnih par. Taka hladna kapa (temp. 10 do 20°C), ki se ne sme dotikati 1. šobe (temp. okoli 200°C), zmanjša povratni tok oljnih par od 10 do 100-krat, vendar pa zmanjša tudi črpalno hitrost difuzijske

črpalke (za okoli 10 %). Kapa je lahko nameščena samostojno ali pa je spojena z lovilnikom par, npr. V-tipa.

2) Pasti so navadno hlajene s tekočim dušikom. Na hladnih površinah se pare kondenzirajo, kondenzat pa na njih tudi zmrzne. Uporabljamo jih za znižanje končnega tlaka. V bistvu delujejo v visokovakuumskih in ultra visokovakuumskih sistemih.

Pravzaprav delujejo kot sorpcijske črpalke za vodne in druge pare ter nekatere pline, ki imajo zmrzišče nad -196°C. So veliki porabniki hladilne tekočine. Tudi kriočrpalke so v bistvu sorpcijske pasti, hlajene s tekočim helijem, vendar jih navadno uporabljamo kot črpalke in ne kot pasti v prej opisanem smislu.

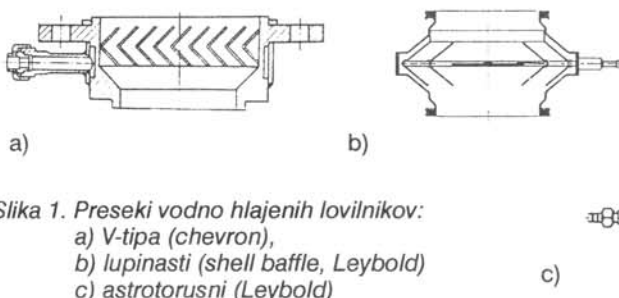
3) Adsorpcijske pasti za grobi vakuum, imenovane tudi molekularna sita. Kadar uporabljamo rotacijske črpalke, ki so mazane in tesnjene z oljem, in ne želimo, da le-to pride v druge dele vakuumskega sistema (npr. v vakuumsko posodo ali v turbomolekularno oz. krio črpalko), potem na sesalno stran črpalke vgradimo adsorpcijsko past, ki je posoda, napolnjena z zeolitom (alumosilikati) ali aktivno glinico ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Te snovi adsorbirajo povratne oljne pare iz rotacijske črpalke, ki jih je največ takrat, ko črpalka dela blizu končnega tlaka. Te pasti ali molekularna sita zmanjšajo povratni tok oljnih par iz rotacijske črpalke za 99 %. Njihova slaba lastnost pa je, da se sčasoma nasitijo, zato jih moramo regenerirati, tj. pregrevati pri 250°C na zraku. Pozor! Ne regenerirajte jih pod vakuumom, ker boste s tem močno onesnažili olje črpalke, ki ga boste morali takoj zamenjati (nepotrebno delo in stroški!). Če se vam regeneriranje ne ljubi, potem zamenjajte vložek, tj. adsorpcijsko snov (zeolit ali glinico). Sedaj bolj kot zeolite priporočajo uporabo aktivne glinice, ki ima lastnost, da lahko istočasno poleg ogljikovodikov adsorbirajo tudi veliko količino vodne pare iz črpanega zraka.

3) Električne (ionske) pasti so zelo neobičajne, zato jih v tem sestavku ne bomo posebej obravnavali. Delujejo na osnovi polimerizacije ogljikovodikov v plazmi.

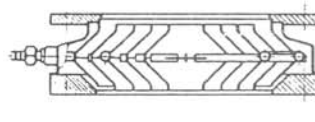
Za sklep tega sestavka pa še to. Noben lovilnik ali past vam ne bo koristila, če jih boste poskušali preobremeniti. V takem primeru se bodo vedli pasivno oz. bodo "štrajkali" ter bodo spustili vse pare v vakuumsko posodo, kjer se bodo kondenzirale in tako onesnažile vse, kar je v njej. To se prav rado zgodi pri visokovakuumskih sistemih z oljnimi difuzijskimi črpalkami, če delujejo pri predtlakah, ki so večji od kritičnega oz. mejnega. O tem pa smo že pisali v prejšnjih Nasvetih v Vakuumistu.

Dr. Jože Gasperič,

Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana



Slika 1. Preseki vodno hlajenih lovilnikov:  
a) V-tipa (chevron),  
b) lupinasti (shell baffle, Leybold)  
c) astrotorusni (Leybold)



Slika 2. Hladna kapa, navadno izdelana iz bakra in ponikljana, postavljena nad 1. šobo oljne difuzijske