



**UNIVERSITATEA DE STAT „ALECU RUSSO”**

**ISSN 1857-0437**

# **FIZICĂ ȘI TEHNICĂ:** **procese, modele, experimente**

**Revistă științifică a profilului de cercetare  
„Proprietățile fizice ale substanțelor în diverse stări”**

**1**  
**2007**

**Bălți**

**Fondatorul:** Universitatea de Stat „Alec Russo”

**Colegiul de redacție:** Nicolae Filip, *Academician al Academiei Internaționale a Școlii Superioare, Universitatea „Alec Russo”, Moldova (redactor-șef)*  
Dumitru Ghițu, *Academician al A.Ș. din Moldova*  
Petru Stoicev, *conf. dr. hab., Universitatea Tehnică, Moldova*  
Gheorghe Popa, *prof. dr., Universitatea „Al.I.Cuza”, România*  
Valeriu Ureadov, *dr. hab., Institutul de Radiofizică, Nijnii Novgorod, Rusia*  
Eugen Plohotniuc, *conf. dr., Universitatea „Alec Russo”, Moldova*  
Virgil Cheptea, *conf. dr., Universitatea „Alec Russo”, Moldova*  
Alexandru Balanici, *conf. dr., Universitatea „Alec Russo”, Moldova (secretar științific)*

**Tehnoredactare:** Eugeniu Cabac, *magistru*

**Design și aspectul paginii de titlu:** Ghenadie Cabac, *asist. univ.*

**Redactori:** Ala Sainenco, *conf. dr.*  
Elena Sirota, *conf. dr.*  
Lara Aladin, *lect. sup.*

**Recenziți:** Mihai Caraman, *prof. dr. hab., Universitatea de Stat din Moldova*  
Petru Stoicev, *conf. dr. hab., Universitatea Tehnică, Moldova*  
Veaceslav Ursachi, *prof. dr. hab., Universitatea Tehnică, Moldova*  
Florentin Paladi, *conf. dr., Universitatea de Stat din Moldova*  
Alexandru Balanici, *conf. dr., Universitatea de Stat „Alec Russo”, Moldova*  
Petru Gașin, *prof., dr. hab., Universitatea de Stat din Moldova*  
Valentina Nicorici, *conf., dr., Universitatea de Stat din Moldova*

**Adresa redacției:** Universitatea de Stat „Alec Russo”,  
str. Pușchin 38, 3100, Bălți, Republica Moldova  
Tel.: (231)24561, fax: (231)33039  
E-mail: [tfmi@usb.md](mailto:tfmi@usb.md)

**Tiparul:** Tipografia Universității de Stat „Alec Russo”

© Universitatea de Stat „Alec Russo”,  
Presa universitară bălțeană, 2007

**ISSN 1857-0437**

## CUPRINS

<i>Eugen Gheorghiuță, Igor Postolachi, Leonid Guțuleac, Olga Zlotea</i> Proprietățile fizice ale antimonidului de galiu dopat cu fier . . . . .	5
<i>Vasile Jitari, Stepan Muntean, Galina Volodina, Tatiana Shemiakova, Efim Aramă</i> Fotoluminescența compușilor ceramici $\text{CdIn}_2\text{O}_4$ și $\text{CdGa}_2\text{O}_4$ . . . . .	11
<i>Efim Aramă</i> Proprietățile optice și fotoelectrice ale monocristalelor $\text{ZnIn}_2\text{S}_4:\text{Ni}$ . . . . .	18
<i>Mihail Popa, Gheorghe Ioan Rusu</i> Fotoluminescența straturilor subțiri de $\text{ZnSe}$ . . . . .	24
<i>Mihail Popa, Gheorghe Ioan Rusu</i> Dispozitiv pentru studiul dependenței de temperatură a conductivității electrice la straturile subțiri semiconductoare . . . . .	30
<i>Virgil Cheptea</i> Caracterul tensiunilor anizotropice în probe cu suport lateral supuse comprimării de volum . . . . .	37
<i>Eugeniu Plohotniuc</i> Optical and radio systems for investigation of the ionosphere . . . . .	43
<i>Lupașco Andrei, Stoicev Petru, Bernic Mircea, Moșanu Aliona, Lupu Olga, Balea Vitalie, Cazacu Olesea, Terzi Ilie, Netreba Natalia, Rotari Oxana</i> Instalația de laborator pentru cercetarea caracteristicilor cinetice în procesul de uscare a produselor vegetale . . . . .	78
<i>Balanici Alexandru, Topala Andrian</i> Metode de măsurare a parametrilor uzurii la cercetarea cuplurilor cinematice aplicate în construcția de mașini-unelte . . . . .	83
Exigențe privind prezentarea lucrărilor științifice pentru revista „Fizică și tehnică: procese, modele, experimente” . . . . .	89

## CONTENTS

<i>Eugen Gheorghita, Leonid Gutuleac, Igor Postolachi, Olga Zlotea</i> Physiscal properties of gallium antimonide doped with iron . . . . .	5
<i>Vasile Jitari, Stepan Muntean, Galina Volodina, Tatiana Shemiakova, Efim Arama</i> Photoluminescence of ceramic compounds $\text{CdIn}_2\text{O}_4$ and $\text{CdGa}_2\text{O}_4$ . . . . .	11
<i>Efim Arama</i> Optical and photoelectrical properties of the monocrystals $\text{ZnIn}_2\text{S}_4:\text{Ni}$ . . . . .	18
<i>Mihail Popa, Gheorghe Ioan Rusu</i> The fotoluminescence spectra of $\text{ZnSe}$ thin films . . . . .	24
<i>Mihail Popa, Gheorghe Ioan Rusu</i> The unit for research temperature dependence of the electrical conductivity of semiconductors thin films . . . . .	30
<i>Virgil Cheptea</i> Character of anisotropic tensions in probes with lateral support subject to volume compression . . . . .	37
<i>Eugeniu Plohotniuc</i> Optical and radio systems for investigation of the ionosphere . . . . .	43
<i>Lupasco Andrei, Stoicev Petru, Bernic Mircea, Mosanu Aliona, Lupu Olga, Balea Vitalie, Cazacu Olesea, Terzi Ilie, Netreba Natalia, Rotari Oxana</i> Laboratory installation for studying of kinetic characteristics during drying of vegetative materials . . . . .	78
<i>Balanici Alexandru, Topala Andrian</i> Methods of wear parameters measurement in the study of kinematic couples applied in machine tools construction . . . . .	83
Requirements for the presentation of scientific papers for the journal „ <i>Physics and Technics: Processes, models, experiments</i> ” . . . . .	89

C.Z.U. 538.911

## PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE ANTIMONIDULUI DE GALIU DOPAT CU FIER

**Eugen Gheorghiiță, Igor Postolachi, Leonid Guțuleac, Olga Zlotea**  
(Universitatea de Stat din Tiraspol, Republica Moldova)

S-au studiat condițiile tehnologice de obținere, omogenizare și purificare a antimonidului de galiu dopat cu fier. În baza cercetărilor proprietăților galvanomagnetice ale antimonidului de galiu nedopat și dopat cu fier în concentrații de până la 3% atomice pentru intervalul de temperaturi ( $4,2 \div 300\text{K}$ ) s-au analizat mecanismele de împrăștiere a purtătorilor de sarcină. Se demonstrează că pentru explicarea datelor experimentale obținute pentru funcția  $U=U(T)$  este necesară aplicarea unui mecanism suplimentar de împrăștiere a purtătorilor de sarcină specific incluziunilor formate în antimonidul de galiu – clustere. Cu ajutorul acestui mecanism s-au calculat caracteristicile de bază ale împrăștierii purtătorilor de sarcină determinate de clustere.

### Introducere

Problema comportării dopanților din grupa elementelor de tranziție, spre exemplu Fe, Ni, Cr, Mn, în antimonidul de galiu este actuală și controversată. Sunt cunoscute doar două lucrări în care se analizează particularitățile proprietăților fizice ale antimonidului de galiu dopat cu fier [1] și dopat cu mangan [2]. În lucrarea [2] se demonstrează că manganul formează în antimonidul de galiu incluziuni orientate de-a lungul direcției deplasării zonei topite, care modifică mecanismele de împrăștiere a purtătorilor de sarcină. Proprietățile fizice ale antimonidului de galiu dopat cu elemente din grupa de tranziție, practic, nu sunt studiate.

În prezenta lucrare se analizează proprietățile fizice ale antimonidului de galiu dopat cu fier în diapazonul de concentrații ( $0,01 \div 3\%$  atomare) și intervalul de temperaturi ( $4,2 \div 300\text{K}$ ).

### Rezultatele experimentale și discuția lor

Antimonidul de galiu, dopat și nedopat, studiat în această lucrare s-a obținut printr-un proces tehnologic, derulat în următoarele etape: sinteza antimonidului de galiu în eprubete evacuate din cuarț optic din elementele (galiu, stibiu) pure și dopantul fier concentrații prestabilite; containerului cu componentele respective a fost instalat în cuptorul electric în care se menținea temperatura  $900^\circ\text{C}$  conectat cu un vibrator mecanic de frecvența 50Hz. În condițiile tehnologice enunțate mai sus, procesul de sinteză a durat 24 ore, apoi cuptorul electric cu containerul în care a decurs sinteza s-a răcit în regim liber. Următoarea etapă a procesului tehnologic de obținere a antimonidului de galiu este omogenizarea și procesul de creștere a monocristalelor în instalația de topire zonală.

Pentru măsurările galvanomagnetice s-au pregătit eșantioane în formă de paralelipiped, prelucrate preliminar chimic cu 6 contacte sudate. În experiment, s-

au măsurat conductivitatea electrică și efectul Hall. În baza acestor date, s-a calculat mobilitatea purtătorilor de sarcină. Toate probele studiate de antimoniduri de galiu, nedopat și dopat cu diferite concentrații de fier, au avut conductivitatea de tipul **p**. Concentrația impurităților în probele studiate variază în intervalul  $(N_A - N_D) = (1,2 \div 3,0) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

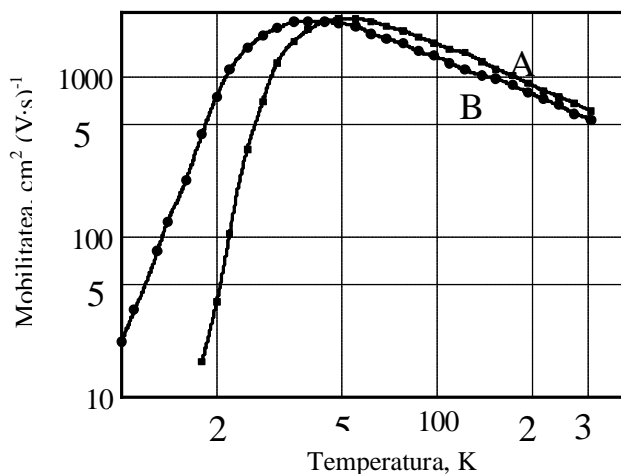


Fig. 1. Spectrul mobilității antimonidului de galiu nedopat (curba A) și dopat cu Fe în concentrație 0,01% atomice (curba B).

În figura 1 sunt prezentate dependențele mobilităților purtătorilor de sarcină de temperatură pentru două eșantioane: antimonidul de galiu nedopat (consemnată convențional F-0) curba A, antimonidul de galiu dopat cu fier în concentrație de 0,01% atomice (proba F-2) curba B. Diapazonul de temperaturi este  $4,2 \div 300 \text{ K}$ .

Comparînd spectrele mobilităților pentru probele A și B, observăm că doparea GaSb cu fier duce la o modificare considerabilă a dependenței mobilității de temperatură în diapazonul temperaturilor joase (de până la cca 50K) și la o modificare neesențială pentru intervalul de temperaturi ridicate.

Se cunoaște [3] că mobilitatea purtătorilor de sarcină este influențată de diferite mecanisme de împrăștiere. La temperaturi joase predomină împrăștierea de către impuritățile ionizate, la temperaturi mai ridicate predomină împrăștierea de către oscilațiile rețelei cristaline (fononi acustici și fononi optici).

Studiile metalografice ale probelor obținute înregistrează incluziuni orientate de-a lungul deplasării zonei topite, care pot fi, după structură, niște combinații ale fierului cu oxigenul.

Analizîndu-se dependența mobilității de temperatură pentru diferite mostre, s-a observat că aceste mecanisme nu sunt suficiente pentru a explica dependența. Se cunoaște că în *GaSb* există tendința de formare a clusterilor (regiuni cu concentrare a sarcinilor spațiale). Mobilitatea este influențată deci de următoarele mecanisme de împrăștiere:

- 1) oscilații acustice ale rețelei;
- 2) oscilații optice ale rețelei;

3) clusteri (un mecanism suplimentar specific antimodnidului de galiu dopat cu fier).

Mobilitatea condiționată de împrăștierea purtătorilor de sarcină pe impuritățile ionizate se calculează utilizând relațiile:

$$U_i = \frac{3,68 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}}{N_i} \cdot \frac{1}{Z^2} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{16}\right)^2 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{m^*}{m_0} \ln(1 + \beta^2)}}, \quad (1)$$

unde:

$$\beta = \frac{1}{Z} \cdot \frac{\varepsilon}{16} \cdot \frac{T}{100} \cdot \left(\frac{2,35 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}}{N_i}\right)^{\frac{1}{3}}; \quad (2)$$

unde:  $N_i$  - concentrația impurităților ionizate;  $\varepsilon$  - permeabilitatea dielectrică statică;  $T$  - temperatura absolută;  $m^*$  - masa efectivă a golurilor;  $m_0$  - masa de repaus a electronului;  $Z$  - numărul de sarcină al impurității.

Mobilitatea condiționată de împrăștierea pe oscilațiile acustice ale rețelei cristaline se calculează astfel:

$$U_A = \frac{3,6 \cdot 10^4}{\left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{\frac{5}{2}} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot E_A^2} \cdot \frac{C_L}{10^{12}}, \quad (3)$$

unde:  $E_A$  - energia oscilațiilor acustice;  $C_L$  - coeficientul longitudinal de elasticitate.

Mobilitatea condiționată de împrăștierea pe oscilațiile optice ale rețelei cristaline se calculează astfel:

$$U_o = \left( \frac{2,6 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(\theta / T)}{\left(\frac{m^*}{m_0}\right) \cdot \sqrt{\theta} \cdot 397,4 \left(\frac{1}{\varepsilon_{op}} + \frac{1}{\varepsilon}\right)} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

unde:  $\theta$  - temperatura lui Debye;  $\varepsilon_{op}$  - permeabilitatea dielectrică optică.

Mobilitatea condiționată de împrăștierea de către clusteri se calculează astfel:

$$U_c = \frac{e}{N_c \cdot A \cdot \sqrt{2m \cdot k_B \cdot T}}, \quad (5)$$

unde:  $e$  - sarcina elementară;  $k_B$  - constanta Boltzmann;  $N_c$  - concentrația clusterilor;  $A$  - secțiunea efectivă a clusterilor.

Această formulă nu poate fi utilizată direct, deoarece nu se cunosc parametrii  $N_c$  și  $A$  (secțiunea depinde de temperatură). La calcule, poate fi folosită o formulă empirică aproximativă:

$$U_c = \frac{b}{T^a}, \quad (6)$$

unde parametrii  $\beta$  și  $\alpha$  pot fi determinați prin metode numerice.

În cazul acțiunii mai multor mecanisme, mobilitatea se calculează astfel:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{f} \left( \frac{1}{U_i} + \frac{1}{U_A} + \frac{1}{U_o} + \frac{1}{U_c} \right), \quad (7)$$

unde  $f$  este un factor ce caracterizează partea de spațiu ocupată de clusteri.

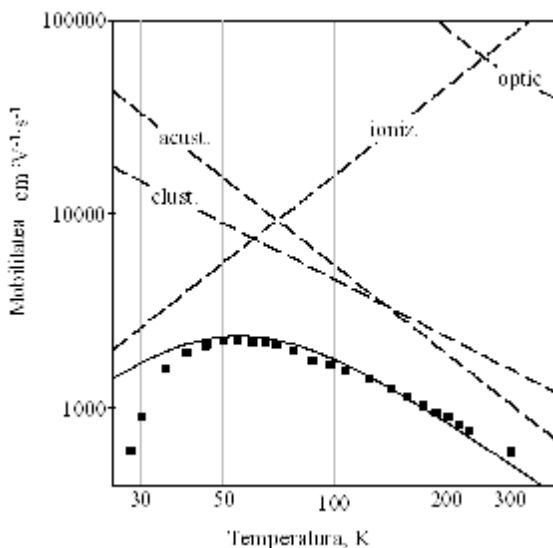


Fig.2. Spectrul mobilității purtătorilor de sarcină în antimonidul de galiu nedopat: linii segmentate – calcule teoretice utilizând formulele (1,2,3,4,5); ■ – date experimentale; linia continuă – calcule teoretice utilizând formula (7).

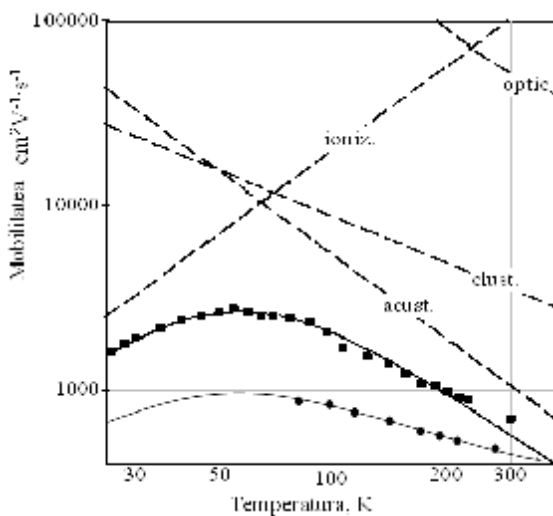


Fig.3. Dependența mobilității purtătorilor de sarcină în antimonidul de galiu dopat cu fier în concentrația 0,03% atomică (■) și 2% atomică (●): linii segmentate – calcule teoretice utilizând formulele (1,2,3,4,5); puncte – date experimentale; linia continuă – calcule teoretice utilizând formula (7).

Mărimile  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $f$  au fost determinate prin metode numerice de analiză regresională astfel încât mobilitatea teoretică calculată prin formula (7) să coincidă cu cea experimentală. La calcule, au fost folosite următoarele valori ale parametrilor pentru  $GaSb$ :

$$Z = 1; \varepsilon = 15,6; \varepsilon_{op} = 14,44; m^* = 0,55 \cdot m_0; E_A = 4eV; \theta = 340 K; C_L = 0,64 \cdot 10^{12} \text{ dyn/cm}^2.$$



În figura 2 sunt prezentate, drept exemplu, rezultatele obținute pentru mostra F-0 (antimonidul de galiu nedopat). Rezultatele experimentale sunt notate prin pătrățele, prin linii discrete sunt prezentate dependențele  $U_I(T)$ ,  $U_A(T)$ ,  $U_O(T)$  și  $U_S(T)$ . Linia continuă exprimă dependența rezultantă  $U_S(T)$  calculată prin formula (7). Se evidențiază o corelare suficientă a datelor experimentale cu calcule teoretice.

În figura 3 sunt prezentate spectrele mobilităților pentru eșantionul F-3 antimonidul de galiu dopat cu 0,03% atomice de fier. Calculele teoretice pentru mobilitatea integrală corespund formulei (7). În baza principiilor expuse în lucrarea [3] și a rezultatelor experimentale pentru antimonidul de galiu au fost estimați principalii parametri ai clusterilor:  $V_S$  – volumul;  $R_S$  – raza;  $N_S$  – concentrația clusterilor. În calcule s-a presupus că clusterii sunt identici și au sarcini determinate de  $Z=35$  și au fost folosite formulele:

$$V_S = \frac{Z}{N_A - N_D}; \quad (8)$$

$$R_S = \left( \frac{3}{4} V_S \right)^{\frac{1}{3}}; \quad (9)$$

$$N_S = \frac{f}{V_S}; \quad (10)$$

$$m_s = e \left[ N_S A \sqrt{2mkT} \right]^{-1}. \quad (11)$$

Ultima formulă corespunde teoriei clusterilor.

Rezultatele calculelor pentru parametrii clusterilor probelor studiate în această lucrare sunt prezentate în tabelul 1.

Tabelul 1.

Caracteristicile de bază ale clusterilor în antimonidul de galiu

Mostra	Dopant, (Fe) % at.	f	$N_A - N_D, 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$R_S, \text{ \AA}$	$V_S, 10^{-16} \text{ cm}^3$	$N_S, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
F-0	0	0.83	1.7	536	2.1	4.0
F-1	0.005	0.81	1.9	517	1.8	4.4
F-2	0.01	0.72	2.2	492	1.6	4.5
F-3	0.03	0.56	2.1	500	1.7	3.4
F-4	0.10	0.67	3.1	439	1.1	5.9
F-5	0.30	0.72	2.5	472	1.4	5.1
F-6	1.00	0.55	3.6	418	1.0	5.7
F-7	2.00	0.62	4.2	397	0.8	7.4
F-8	3.00	0.81	6.3	347	0.6	14.6
FT-9	0.01+0.10 Te	0.69	2.2	492	1.6	4.3

## Concluzii

1. S-a modificat tehnologia de obținere, omogenizare, purificare și dopare a antimonidului de galiu cu fier în concentrații de până la 3%; s-au studiat proprietățile galvanomagnetice ale antimonidului de galiu dopat cu fier și nedopat în intervalul de temperaturi (4,2 ÷ 300K).

2. S-au analizat mecanismele de împrăștiere a purtătorilor de sarcină în raport cu antimonidul de galiu nedopat. Rezultatele experimentale obținute ale dependenței  $U=U(T)$  se explică prin aplicarea unui mecanism suplimentar de împrăștiere și formarea unor incluziuni numite clustere. Bazându-ne pe concepțiile expuse în lucrarea [4] s-au calculat toate caracteristicile de bază ale clusterilor:  $V_S$  – volumul ocupat de clustere,  $R_S$  – raza,  $N_S$  – concentrația, reieșind din presupunerea că clusterii sunt identici și au sarcini determinate de  $Z=35$ .

P.S. Autorii aduc sincere mulțumiri profesorului V.Ivanov-Omskii de la Institutul Fizico-Tehnic "A.Ioffe" Sankt-Petersburg pentru ajutorul acordat în efectuarea măsurătorilor la temperaturi joase și pentru discuțiile fructuoase.

Lucrarea este îndeplinită în cadrul programului de cercetări științifice finanțate din bugetul Republicii Moldova.

### Bibliografie

1. Л.П.Круковская, И.Ф.Миронов, А.Н.Титков, ФТП, 1978, т12, с.689
2. Е.И.Георгицэ, В.И.Иванов-Омский, В.Ф.Мастеров, Ф.М.Мунтяну, ФТП, 1991, т25, В.9, с.1589
3. Т.И.Воронина, Б.Е.Джуртанов, Т.С.Лагунова, М.А.Сиповская, В.В.Шерстнев, Ю.П.Яковлев, ФТП, 1998, т32,с.278

## PHISSYCAL PROPERTIES OF GALLIUM ANTIMONIDE DOPED WITH IRON

**Eugen Gheorghita, Leonid Gutuleac, Igor Postolachi, Olga Zlotea**  
(Tiraspol State University, Republic of Moldova)

Technological conditions for obtaining, homogenizing and purifying gallium antimonide doped with iron were studied.

Mechanisms of charge carriers dispersion using the research results of galvanometric properties of gallium antimonide undoped and doped with iron in a concentration up to 3 atomic % in the temperature interval (4,2 ÷ 300K) were analyzed. It is demonstrated that the experimental results for function  $U=U(T)$  were explained with the implication of an additional mechanism of dispersion determined by the formation of some inclusions called clusters. Using the physical conceptions of this mechanism the basic characteristics of charge carriers dispersion determined by clusters were calculated.

Prezentat la redacție la 15.09.07

C.Z.U. 538.546

## FOTOLUMINESCENȚA COMPUȘILOR CERAMICI $CdIn_2O_4$ și $CdGa_2O_4$

**Vasile Jitari, Stepan Muntean, Galina Volodina, Tatiana Shemiakova**

(Institutul de Fizică Aplicată, Republica Moldova)

**Efim Aramă**

(Universitatea de Medicină și Farmacie „Nicolae Testemitanu”,  
Republica Moldova)

Probele cristaline de  $CdIn_2O_4$  și  $CdGa_2O_4$  de singonie cubică au fost preparate printr-o metodă similară celei aplicate la prepararea materialelor ceramice. Spectrele de fotoluminescență au fost măsurate la temperatura 77 și 300 K sub influența excitației laserului de argon. Ele constau din benzi intensive înguste roșii, generate datorită recombinației.

### Introducere

În prezent, conform relațiilor autorilor [1, 2], obiectul cercetărilor științifice în domeniu îl constituie diferite tipuri de oxizi în formă de cristale, pelicule și ceramice. Un interes deosebit îl prezintă, în acest sens, compușii de tipul  $A^{II}B_2^{III}C^{VI}_4$ , datorită proprietăților lor fotoluminescente excelente în domeniul vizibil al spectrului, excitate de radiația laser sau razele X [3,4]. Din categoria acestora fac parte compușii cu spectrele liniare în domeniul roșu al spectrului [5]. În acești compuși a fost observată, de asemenea, radiația stimulată, fapt care a condus la utilizarea lor în laserele ce funcționează în domeniul vizibil [6]. În ceramica  $ZnGa_2O_4$  a fost depistată și descrisă o singură bandă intensivă cu maximum ce variază de la 520 până la 580 nm, a cărei poziție depinde de condițiile de excitație [4]. Pornind de la faptul cunoscut că în sistemul  $In_2O_3-CdO$  se conține compusul  $CdIn_2O_4$ , s-a pus problema obținerii, prin metode simple, a compușilor ceramici  $CdIn_2O_4$  și  $CdGa_2O_4$  și a studierii fotoluminescenței lor.

### Experimentul

Ambii compuși au fost obținuți prin coacere în decurs de 50 ore din materialele oxizilor presați  $CdO$  și  $In_2O_3$ ,  $CdO$  și  $Ga_2O_3$  luați în cantități stoechiometrice la temperatura 1070 și, respectiv, 1179 K. Analiza difracției razelor X a fost efectuată cu ajutorul difractometrului DRON - UMI. Analiza probelor de difracție a produselor finale a demonstrat că ele conțin linii spectrale caracteristice policristalelor  $CdIn_2O_4$  și  $CdGa_2O_4$  (în corespundere cu ASTM 12-675 și 20-863). Ambele materiale sunt de culoare albă. Compușii au structură cubică cu grupa spațială  $Fd3m$ , parametrii cristalografici fiind de 9.115 și, respectiv, 8.602 Å. Monocristalele acestor tiocompuși analogi au fost supuse, în condiții identice, tratamentului termic în rezultatul căruia s-au transformat în structuri policristaline. Structura tetragonală  $CdGa_2S_4$  se transformă în structură cubică  $CdGa_2O_4$ , iar

structura cubică  $CdIn_2S_4$  nu se transformă în  $CdIn_2O_4$ , ci se formează un amestec de  $In_2O_3$  și  $CdO$ .

În materialele ceramice  $CdGa_2O_4$  a fost măsurată dependența rezistivității de întuneric ( $\rho_i$ ) de temperatură, valorile ei fiind de ordinul a 30 și 40  $\Omega \cdot cm^{-1}$  la 4 și 300  $K$  respectiv. Caracteristica conține o particularitate slabă la 75  $K$ . Spectrele de fotoluminescență au fost ridicate în domeniul lungimilor de undă 500-900  $nm$  la temperaturile 77 și 300  $K$ , utilizând și filtrele 2-60 și 3-71. Excitarea fotoluminescenței s-a produs cu ajutorul radiației laser cu lungimea de undă  $\lambda=479.5 \text{ nm}$  (laser cu Argon). Ridicarea spectrelor fotoluminescenței s-a efectuat la instalația cu rezoluție spectrală înaltă în regim automat de înscriere.

### Rezultatele și discuția lor

Într-un șir de lucrări sunt descrise condițiile ce permit obținerea probelor monofazice ale compușilor  $CdGa_2O_4$  și  $CdIn_2S_4$ . Rezultatele obținute nu confirmă afirmațiile din [7] cu privire la calificarea drept condiții optime pentru  $CdIn_2O_4$  a duratei tratamentului termic de 10 ore și a temperaturii de 1070  $K$ . S-a constatat că, după 24 de ore de prelucrare termică, materialul obținut încă nu are structură monofazică. În lucrarea [8] se menționează posibilitatea sintetizării mai multor compuși, inclusiv ai celor studiați în prezenta lucrare, printr-o metoda diferită de cea utilizată de noi. În particular, după cum se menționează în [8], componentele stoechiometrice de  $CdO$  și  $In_2O_3$  au fost încărcate în fiole din Pt și supuse tratamentului termic timp de 16 ore la temperatura 1270  $K$  la presiunea de 3  $Kbar$ . Apoi, prin metoda fluxului în sistem echicurent, la temperatura de 1320  $K$ , în decurs de 4 ore au fost obținute cristale ce aveau culoare verde. În lucrările menționate au fost publicate date referitor la conductivitatea și energia internă a compușilor sintetizați. Noi am obținut compusul  $CdGa_2O_4$  prin mai multe metode, inclusiv prin metoda de recoacere a monocristalelor tiocompușilor respectivi. Spectrele fotoluminescenței compusului  $CdIn_2O_4$ , măsurate la temperaturile 300 și, respectiv, 77  $K$  în aer și la temperatura 300  $K$  în vid sunt prezentate în figura 1. Ele sunt analogice după formă. Cele mai intensive s-au dovedit a fi benzile înguste cu maximurile între 688 și 712  $nm$  ( $T=300 \text{ K}$ ), având semilățimea  $\Delta hn \approx 0.04 \text{ eV}$ . La micșorarea temperaturii până la 77  $K$ , intensitatea primei fâșii descrește aproximativ de două ori și se despică, deplasarea de temperatură fiind  $\frac{dE}{dT} = -1.06 \cdot 10^{-4} \text{ eV} \cdot K^{-1}$ . Intensitatea celei de-a doua fâșii în vid este slabă, însă atât la 77  $K$ , cât și la 300  $K$ , crește. În toate cazurile cercetate această fâșie nu este elementară. Dacă ea este considerată drept o singură bandă, atunci coeficientul deplasării termice are valoarea  $\frac{dE}{dT} = -1.05 \cdot 10^{-4} \text{ eV} \cdot K^{-1}$ . În condițiile aerului, este depistată o fâșie slabă cu maximul la 512  $nm$  (2.42  $eV$ ), observată atât la 77, cât și la 300  $K$ , însă slab vizibilă când măsurările se efectuează în vid. A fost studiat modul în care filtrele influențează spectrele de fotoluminescență. Spectrele au fost ridicate, folosind filtrul 3-71, după cum este prezentat în fig. 2. La temperatura 300

$K$  se observă benzi compuse intensive cu maximurile la 695, 728 și una slab evidențiată la 735 nm. Micșorarea temperaturii duce la creșterea intensității primei fâșii și deplasarea maximului acesteia până la 686 nm. Pentru fâșia a doua, viceversa, intensitatea se micșorează, iar maximul ei atinge 718 nm. Fâșia slab pronunțată la 77 K se manifestă slab. Spectrele de fotoluminescență au fost măsurate utilizându-se filtrul 2 – 60 după cum este prezentat în fig. 3.

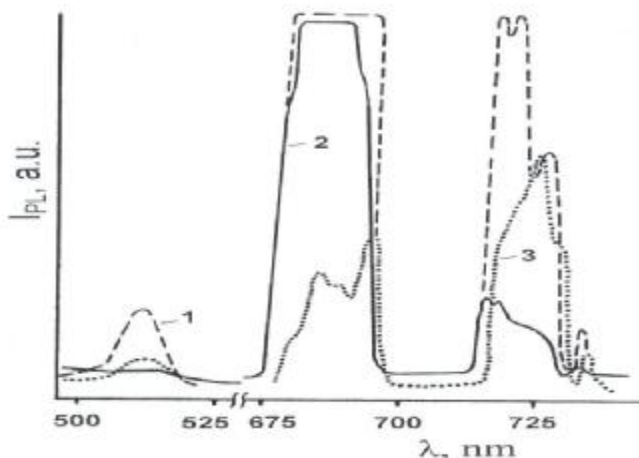


Fig. 1. Spectrele de fotoluminescență a ceramicii  $CdIn_2O_4$ :  
1 -  $T=300$  K în aer, 2 -  $T=300$  K în vid, 3 -  $T = 77$  K în aer.

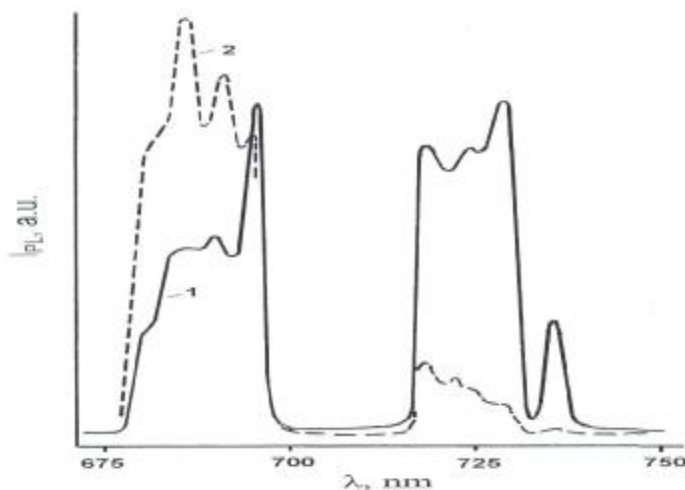


Fig. 2. Spectrele de fotoluminescență a probelor  $CdIn_2O_4$  ridicate utilizând filtrul 3 - 71:  
1 -  $T=300$  K, 2 -  $T=77$  K.

În aceste condiții se observă câteva particularități ale spectrelor. Benzile intensive au fost înregistrate la 300 K cu maximurile la 665 nm (fâșie îngustă), 751 nm (4 linii spectrale), 797 nm (3 linii) și 840 nm (fâșie îngustă). Descreșterea temperaturii până la 77 K duce la descreșterea intensității lor și la o deplasare

nesemnificativă a valorii acestor maximuri, și anume: 665, 750, 809 și 840 nm, respectiv.

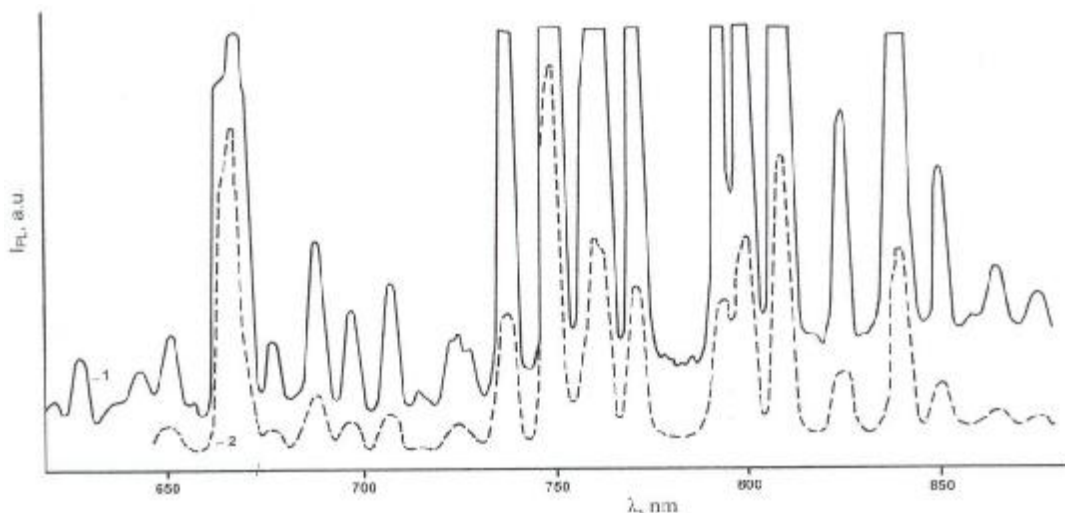


Fig. 3. Spectrele de fotoluminescență a compusului  $CdIn_2O_4$  măsurate cu filtrul 2 - 60: 1 -  $T=300$  K, 2 -  $T=77$  K.

De obicei pentru a elucidate rezultatele experimentale obținute ele trebuie să fie comparate cu hotarul de absorbție și datele obținute din spectrele fotoconductivității. Analiza complexă poate explica originea liniilor de fotoluminescență. Menționăm că compusul  $CdIn_2S_4$  poate fi considerat analog cu  $CdIn_2O_4$ . Este cunoscut faptul că tiocompusul are banda interzisă directă  $E_g=2.62$  eV [9]. Emisia de margine în cristale a fost înregistrată la  $T=105$  K în domeniul de lungimi de undă  $\lambda \approx 500$  nm ( $E_g \approx 2.5$  eV) a cărei intensitate este cu 3÷4 ordine de mărime mai slabă decât intensitatea condiționată de centre impuritate ale fotoluminescenței. Pentru oxizi se poate obține  $E_g > 2.6$  eV, deci fâșiile înregistrate de noi aparțin domeniilor fotoluminescenței de lungimi de undă lungi. Ca regulă, acești compuși includ defecte structurale cum ar fi vacanțele  $V_o$ ,  $In_{Cd}$  (ce se manifestă ca donor), pe când vacanțele  $Cd_m$ ,  $V_{Cd}$  și  $V_m$  au rolul de acceptori. Cu toate că cristalele  $CdIn_2S_4$  posedă un grad înalt de perfecțiune de lungă durată, autorii [10] au menționat că și în probele stoechiometrice concentrațiile defectelor de antistructură ( $Cd_m$ ,  $In_{Cd}$ ) variază într-un domeniu larg și pot atinge valoarea de  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>. Centrii impuritari de suprafață în acest compus pot fi puși în legătură anume cu aceste defecte. Este mult mai probabil că benzile de fotoluminescență în  $CdIn_2O_4$  sunt datorate recombinației cu participarea nemijlocită a acestor centri. Pentru stabilirea gradului de certitudine a acestei afirmații sunt necesare însă cercetări suplimentare.

Spectrele fotoluminescenței compusului  $CdGa_2O_4$  la 300 și 77 K sunt prezentate în fig. 4. Ele conțin o fâșie îngustă intensivă cu maximumul la 684 nm ( $T \approx 300$  K), având semilărgimea  $\Delta h\nu \approx 0.01$  eV. Pe panta ascendentă, au fost rezoluționate două benzi satelit înguste slab intensive. Mai mult, poate fi observată

prezența unei benzi slabe la lungimea de undă  $718\text{ nm}$  cu sateliți vizibili intensivi. La descreșterea temperaturii până la  $77\text{ K}$ , intensitatea primei fâșii înguste crește și are loc dublarea ei în două fâșii cu maximurile la  $684$  și  $694\text{ nm}$ . Crește și intensitatea fâșiei cu lungime de undă mare; maximul ei rămâne în aceeași poziție  $718\text{ nm}$  și sateliții săi slabi, de asemenea, se păstrează și rămân pe poziții neschimbate. Ambele benzi, indiferent de temperatură, sunt fâșii compuse, iar coeficientul deplasării energiei odată cu variația temperaturii are o valoare nesemnificativă, abia observabilă. Spectrele de fotoluminescență măsurate la  $300\text{ K}$  folosind filtrul 3 – 71 sunt redată în fig. 5.

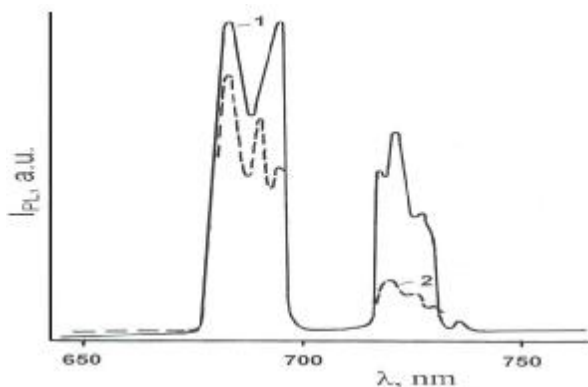


Fig. 4. Spectrele de fotoluminescență a ceramicii  $CdGa_2O_4$ : 1 –  $T = 77\text{ K}$ , 2 –  $T = 300\text{ K}$ .

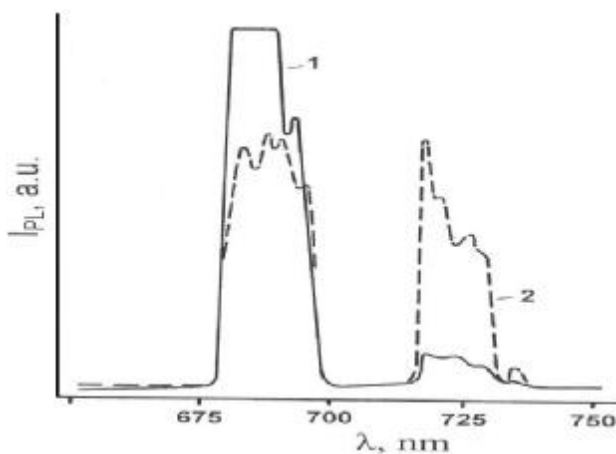


Fig. 5. Spectrele de fotoluminescență a probelor de  $CdGa_2O_4$  ridicate utilizând filtrul 3 - 71: 1 –  $T = 300\text{ K}$ , 2 –  $T = 77\text{ K}$ .

Spectrele conțin o fâșie roșie intensivă cu maximul la  $684\text{ nm}$  și  $\Delta h\nu \approx 0.04\text{ eV}$ . Pe panta dinspre lungimile de undă lungi se observă un satelit de intensitate slabă cu maximul la  $682\text{ nm}$ . A fost depistată o fâșie complexă slabă cu maximul la  $718\text{ nm}$ . La temperatura  $77\text{ K}$ , intensitatea primei fâșii descrește ~ cu o treime din valoarea sa, banda descompunându-se în 4 sateliți cu centrul la  $688\text{ nm}$ . Cea de a doua fâșie rămâne la  $718\text{ nm}$ , intensitatea ei se mărește ~ de trei ori și conține maximuri slabe pe panta dinspre lungimile de undă lungi. Spectrul a fost

măsurat folosind filtrul 2 – 60. Benzile intensive măsurate la 300 K au maximurile la 665, 752, 810 și 836 nm. Aceste maximuri, suportând o deplasare mică de-a lungul spectrului și întrucâtva micșorate după intensitate, se păstrează și la temperatura 77 K.

Catodoluminescența condiționată de tranziția bandă – bandă cu maximul la  $E_g=3.80$  eV a fost observată și la 80 K în monocristalele de  $CdGa_2S_4$  [11]. În lucrarea [11] se constată existența unei fâșii cu maximul la 3.19 eV care apare datorită tranzițiilor optice ale electronilor din banda de conducție  $E_c$  pe nivelul acceptor în apropiere de banda de valență  $E_v$ . Desigur,  $E_g^{min} \geq 3.80$  eV pentru  $CdGa_2O_4$ , adică toate particularitățile de fotoluminescență descrise mai sus se atribuie la lungimi de undă lungi și sunt generate de defecte analogice celor din  $CdIn_2O_4$ , cu o singură diferență: atomii de *In* din semiconductor sunt înlocuiți cu atomii de *Ga* în ceramică. Menționăm că fotoluminescența în semiconductorii de acest tip, cât și posibilitatea de a elabora laseri pe baza lor sunt suficient de studiate. În particular, rezultate similare sunt menționate în lucrările [12] pentru monocristale și policristalele  $CaGa_2S_4:Eu^{2+}$ .

### Concluzii

$CdIn_2O_4$  și  $CdGa_2O_4$  au fost obținute prin metoda folosită tradițional la prepararea ceramicelor. Sunt prezentate condițiile experimentale de creștere a lor, măsurate și prezentate spectrele de fotoluminescență. S-a constatat că în spectrele de fotoluminescență se manifestă fâșii înguste intensive care sunt generate de recombinarea centrilor de structură. Prin posibilitatea activării cu elemente impuritate, compușii  $CdIn_2O_4$  și  $CdGa_2O_4$  sunt materiale de perspectivă pentru domeniul ingineriei biomedicale, în special, în domeniul elaborării laserilor și luminoforilor efectivi, similari cu  $ZnGa_2O_4$ ,  $CaGa_2S_4$ .

### Bibliografie

1. Mikhail, P., Hulliger, J., Ramseyer, K., *Cathodoluminescence and photoluminescence of  $Sm^{n+}$  ( $n=2,3$ ) in oxide environments* // Sol. State Commun., 1999, V. 112, p. 483 – 488.
2. Zou, Z., Je., J., Sayama, K., Arakawa, H., *Direct splitting of water under visible light irradiation with an oxide semiconductor photocatalyst* // Nature, , 2001, V. 414, p. 625-627.
3. Tagiev, V.G., Guseinov, G.G., Dzhabbarov, R.B. et al., *Synthesis and luminescent properties of  $ZnGa_2S_4:Eu,F$  and  $ZnGa_2O_4:Eu,F$*  // Inorganic Materials, 2000, V. 36, n. 12, p. 1189-1191.
4. Volodina, G., Muntean, S., Zhitar, V., Arama, E., *Preparation and luminescence in  $ZnGa_2O_4$*  // Abstracts International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, Chisinau, Moldova, 2001, p. 76.
5. Zhitar, V., Ursaki, V., Muntean, S., Arama, E., Shemyakova, T., *Photoluminescence in  $ZnGa_2O_4$*  // Abstracts 2<sup>nd</sup> International Conference on



- Materials Science and Condensed Matter Physics, Chisinau, Moldova, 2004, p. 89.
6. Kuleshov, N.V., Scherbitskii, V.G., Mihailov, V.P. et al., *Stimulated emission and excited-state absorption in Co:ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub> single crystals* // Optics and Spectroscopy, 1999, V. 87, n. 1, p. 76-80.
  7. Morozova, L., Komarov, A., *Interaction of oxides and phase ratio in the system In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – CdO* // Journal of Inorganic Chemistry, 1991, V. 36, n. 1, p. 240-243.
  8. Shannon, R., Gillson, J., Bouchard, R., *Single crystal synthesis and electrical properties of CdSnO<sub>3</sub>, Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>, In<sub>2</sub>TeO<sub>6</sub> and CdIn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>* // J. Phys. Chem. Solids, 1977, V. 38, p. 877-881.
  9. Kulikova, O., Kulyuk, L., Radautsan, S. et al., *Influence of defect generation processes in CdIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> single crystal on the photoluminescence and RS* // phys. stat. sol. (a), 1988, V. 107, n. 2, p. 373-377.
  10. Budyanu, V., Damaskin, I., Zenchenko, V. et al., *Long-term ordering processes in partly inversed spinel crystals* // Reports of the Academy of Science of the USSR, 1990, V. 311, n. 4, p. 874 – 877.
  11. Machuga, A.I., Zhitar, V. F., Arama, E.D., *Interband emission of cadmium thiogallate* // Semiconductors, 2000, V. 34, n. 6, p. 626 – 628.
  12. Iida, S., Matsumoto, T., Morita T. et al., *Lasing possibility in rare-earth element doped thiogallate compounds* // Proc. 12<sup>th</sup> International Conference Ternary and Multinary Compounds, Japan. J. Appl. Phys., 2000, V. 1. 39, Suppl. 39-1, p. 429-433.

## PHOTOLUMINESCENCE OF CERAMIC COMPOUNDS $CdIn_2O_4$ AND $CdGa_2O_4$

**Vasile Jitari, Stepan Muntean, Galina Volodina, Tatiana Shemiakova**  
(Institute of Applied Physics, Republic of Moldova)

**Efim Arama** (Universitatea de Medicină și Farmacie „Nicolae Testemitanu”,  
Republic of Moldova)

Crystalline samples of  $CdIn_2O_4$  and  $CdGa_2O_4$  of cubic syngony have been prepared using a method similar to that commonly used for preparation of ceramic materials. Photoluminescence spectra measured at temperature 77 and 300 K under Ar laser excitation consist of intensive narrow red bands generated due to recombination involving centers defined by the intrinsic defect structure.

Prezentat la redacție la 06.04.07

CZU 621.315.592

## PROPRIETĂȚILE OPTICE ȘI FOTOELECTRICE ALE MONOCRISTALELOR $ZnIn_2S_4:Ni$

**Efim Aramă**

(Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie „Nicolae Testemițanu”,  
Republica Moldova)

S-a elaborat tehnologia de dopare a monocristalelor de  $ZnIn_2S_4$  dopat cu  $Ni$ . A fost stabilită influența impurității de  $Ni$  asupra marginii de absorbție, spectrelor fotoconductibilității și de excitare a fotoluminiscenței la temperatura de 300 K. Au fost identificate nivelurile energetice 2.50, 2.64 și 2.81 eV. Este prezentată dinamica caracteristicilor în funcție de concentrația dopantului și interpretarea lor.

### Introducere

Sulfizii multicompenți stratificați  $ZnIn_2S_4$  posedă fotosensibilitate mai mare atât pentru radiația din domeniul vizibil al spectrului, cât și în UV apropiat [1, 2]. Pe baza lor s-au elaborat detectoare de radiație UV, fotovaricapi ș.a. [3, 5]. Elaborările menționate motivează necesitatea investigării parametrilor electrofizici ale acestor materiale, ținându-se cont de importanța lor atât pentru cercetările fundamentale, cât și pentru aplicate.

În faza inițială a studierii influenței impurităților dopante asupra proprietăților fizice, au fost efectuate cercetări ale unor compuși, rezultatele obținute însă s-au dovedit a fi contradictorii, situație care putea fi explicată atât prin calitatea nesatisfăcătoare a cristalelor cercetate, cât și prin modificarea politipului utilizat în acest scop. De exemplu, în lucrarea [6] s-a ajuns la concluzia că impuritățile de dopaj cu concentrația de până la  $5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  influențează nesemnificativ proprietățile compușilor  $In_2Te_3$ ,  $Ga_2Se_3$ , dopați cu impurități. Folosind adausul de  $CuS$  în calitate de dopant, S. Shionoya a obținut monocristalele compusului  $ZnIn_2S_4:Cu$ . Cercetând spectrele fotoluminiscenței la temperatura 300 K, cercetătorul a observat un maximum pronunțat cu energia 2,5 eV, cauzat de atomii impuritari de  $Cu$  [7].

În lucrarea [8] s-a stabilit influența slabă a impurităților de dopaj  $In$ ,  $Cu$ ,  $Fe$ ,  $Mn$  asupra parametrilor electrofizici ai compusului  $Hg_3In_2Te_6$ , concentrația lor ajungând până la  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Totodată, în cadrul aceleiași lucrări, s-a menționat o influență semnificativă a elementelor impuritate cu 3d-orbitali incompleți asupra transparenței optice. În legătură cu cele relatate, în prezenta lucrare se analizează unele proprietăți ale cristalelor de  $ZnIn_2S_4:Ni$  care conțin vacanțe cationice în rețeaua cristalină stoechiometrică.

## Metodele de cercetare a monocristalelor $ZnIn_2S_4:Ni$

Monocristalele de  $ZnIn_2S_4$  dopate cu  $Ni$  au fost preparate din faza gazoasă prin metoda reacțiilor chimice de transport, folosind iodul în calitate de agent de transport. Analogic compusului special nedopat [4], în încărcătura inițială se utilizau elemente chimice cu un grad înalt de curățenie. Analiza conținutului dopantului în cristale s-a efectuat cu microanalizorul spectral de masă cu laser „Lamma-1000” cu limita de rezoluție pe suprafață  $1,0 \mu m$  care asigură obținerea informației despre prezența în monocristale a atomilor de  $Ni$  obținută din aceste analize, coincide cu datele încărcăturii stoechiometrice inițiale.

Ridicarea spectrelor absorbției de margine s-a efectuat la instalație ce conținea monocromatorul de difracție M3Д-2 cu rezoluția  $\pm 0,02 eV$ . Coeficientul de absorbție a fost determinat conform metodologiei descrise în lucrarea [8]. Instalația pentru ridicarea spectrelor de excitare a luminiscentei include o sursă halogenă (iod) de incandescență, un modulator de lumină, un monocromator M3Д-2, un condensator, un filtru de lumină, un multiplicator, detector de înregistrare sincronică și dispozitiv de înscriere pe hârtie. Frecvența de modulare a radiației excitante de la sursă e de  $300 Hz$ . Radiația de excitare (în cazul luminiscentei  $< 10^{-3}$ ) emisă de sursă se separă cu ajutorul filtrului respectiv. Pentru eșantioanele dopate cu  $Ni$ , semnalul de la fotomultiplicator a fost înregistrat în curent continuu cu electrometrul, deoarece luminiscenta dura câteva  $ms$ . Pentru o mai mare precizie măsurările s-au efectuat pe cristale de diferite grosimi. Semnalul a fost ridicat de pe muchia (0001).

## Rezultatele obținute și discuția lor

Monocristalele obținute aveau rezistență înaltă (rezistivitate de întuneric  $\rho_{i>10}^9 Ohm cm$ ) și conductibilitate electronică (de tipul  $n$ ). În tabelul ce urmează sunt prezentate concentrațiile impurității de  $Ni$  în cristale, rezistivitatea de întuneric, raportul rezistivităților de întuneric și la iluminare ( $\rho_i/\rho_l$ ), parametrul caracteristic  $\Delta$  și lățimea benzii interzise  $E_g$ .

Parametrii principali ai monocristalelor  $ZnIn_2S_4:Ni$

N/r	Concentrația impurității de $Ni$ , $cm^{-3}$	$\rho_i$ , $Ohm cm$	$\rho_i/\rho_l$ (la $100 lx$ )	$\Delta$ , $meV$	E, $eV$
1	$1.2 \cdot 10^{19}$	$8.5 \cdot 10^9$	$7.5 \cdot 10^2$	52	2.45
2	$3.7 \cdot 10^{19}$	$6.6 \cdot 10^9$	$3.0 \cdot 10^3$	44	2.30
3	$1.0 \cdot 10^{20}$	$1.6 \cdot 10^7$	21	38	2.31
4	$1.9 \cdot 10^{20}$	$7.0 \cdot 10^8$	29	39	2.25

La doparea monocristalelor cu elemente de tranziție influența impurităților se manifestă, în primul rând, prin modul de amplasare a atomilor impuritari în rețeaua cristalină și, în al doilea rând, prin valența ce se modifică pentru formarea legăturilor chimice.

În figura 1 sunt prezentate spectrele de absorbție ale monocristalelor  $ZnIn_2S_4$  dopate cu  $Ni$  pentru diferite concentrații. Se observă o corelare strictă dintre

concentrația  $Ni$  și coeficientul de absorbție  $\alpha$ , iar marginea de absorbție se deplasează corespunzător spre lungimile de undă lungi ale spectrului. O particularitate remarcabilă a acestor spectre este că, la concentrații mici ale impurității dopante, concomitent cu deplasarea pragului de absorbție, are loc și micșorarea înclinației caracteristicii ( $\Delta$ ). Menționăm că, pentru concentrația  $1.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , marginea de absorbție este mai abruptă decât în cazul cristalelor special nedopate, pentru care  $\Delta=98.0 \text{ meV}$ . Posibil că la concentrații relativ mici impuritatea dopantă de  $Ni$  remediază acele defecte care se formează în procesul de preparare fără adausuri dopante.

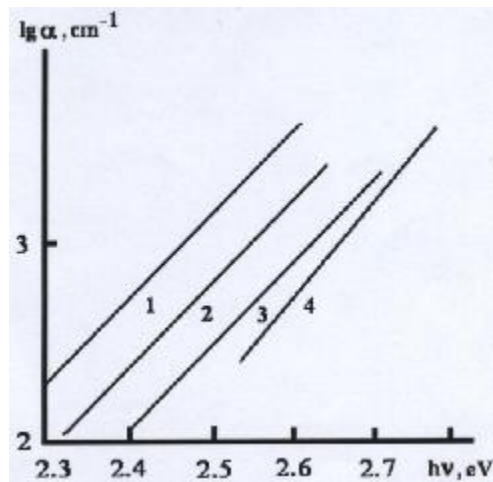


Fig. 1. Coeficientul de absorbție a monocristalelor  $ZnIn_2S_4:Ni$  cu concentrația,  $\text{cm}^{-3}$ :  $1,9 \cdot 10^{20}$  (1),  $1,0 \cdot 10^{20}$  (2),  $3,7 \cdot 10^{19}$  (3),  $1,2 \cdot 10^{19}$  (4).

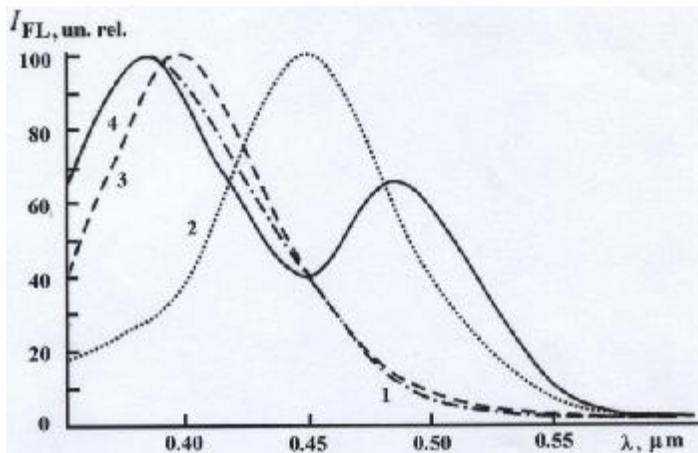


Fig. 2. Spectrele de excitare a fotoluminiscenței  $ZnIn_2S_4:Ni$  cu concentrația,  $\text{cm}^{-3}$ :  $1,9 \cdot 10^{20}$  (1),  $1,0 \cdot 10^{20}$  (2),  $3,7 \cdot 10^{19}$  (3),  $1,2 \cdot 10^{19}$  (4).

Dependența spectrală a excitării fotoluminiscenței cristalelor dopate cu  $Ni$  este prezentată în figura 2. În spectru se poate evidenția un maximum intensiv cu energia  $3.9 \text{ eV}$  ( $\lambda=0,4 \mu\text{m}$ ), ce este în legătură cu excitarea purtătorilor de sarcină

din banda de valență și trecerea lor în banda de conducție ( $E_v \rightarrow E_c$ ). Micșorarea eficienței excitării la lungimi de undă mai mici este condiționată, probabil, de creșterea coeficientului de absorbție în acest domeniu al spectrului. În consecință, lumina în cristal pătrunde la adâncimi mai mici și purtătorii de sarcină neechilibrați recombină fără emisie în stratul din apropierea nemijlocită a suprafeței.

Micșorarea nivelului de excitare în panta descendentă a maximumului dinspre undele lungi ale spectrului este condiționată de micșorarea exponențială a coeficientului de absorbție  $\alpha$ .

În domeniul de unde lungi se observă maximume intensive cu energia de 2.81 și 2.64 eV, și o particularitate mai puțin pronunțată la 2.5 eV. La concentrații mari particularitățile nu se manifestă, cu excepția uneia: la mărirea concentrației impurității dopantului, are loc deplasarea pantei descendente a spectrului dinspre lungimile de undă lungi. De regulă, metalele de tranziție creează nu unul, ci câteva niveluri energetice adânci. Rezultatele obținute confirmă această regularitate. Deoarece procesele de emisie sunt supuse stingerii legate de concentrația impurității, nivelul impuritar poate să se manifeste în spectru numai într-un anumit interval de concentrații. Particularitatea cu energia 2.5 eV poate fi condiționată de impuritatea  $Ni$  sau, după cum este menționat în [6], de impuritățile necontrolate de  $Cu$ . Benzile cu maximumele de 2.81 și 2.64 eV, sunt condiționate de prezența impurităților de  $Ni$ .

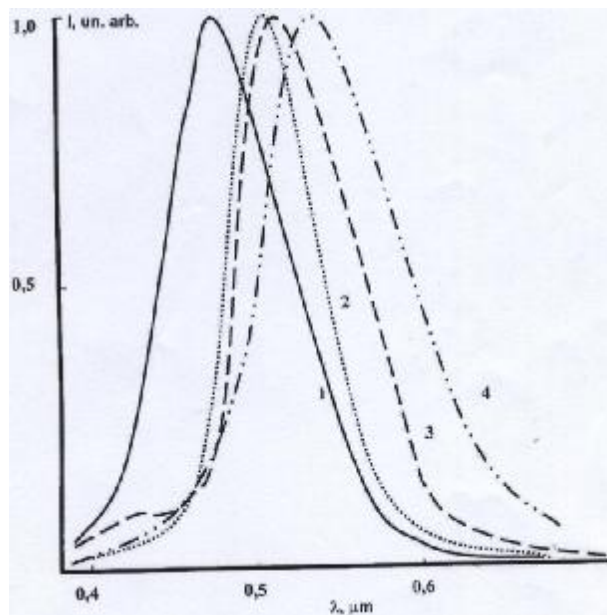


Fig. 3. Spectrele fotoconducției monocristalelor  $ZnIn_2S_4:Ni$  cu concentrația,  $cm^{-3}$ :  $1,9 \cdot 10^{20}$  (1),  $1,0 \cdot 10^{20}$  (2),  $3,7 \cdot 10^{19}$  (3),  $1,2 \cdot 10^{19}$  (4).

În figura 3 sunt prezentate spectrele fotoconducției (FC) monocristalelor  $ZnIn_2S_4$  dopate cu  $Ni$  pentru diferite concentrații. După cum se poate observa, maximumul FC propriu se stinge, iar cel condiționat de impuritate se deplasează în domeniul lungimilor de undă mici, în așa fel încât cea mai mare deplasare se

observă la concentrații mici (curba 2, tabel E = 2.45 eV). La concentrații mari, valorile energiei maximurilor impuritate și a celor proprii spectrelor FC coincid cu maximurile similare ale cristalelor special nedopate. Caracteristicile luxamperice (CLA;) și a FC proprii sunt liniare ( $n=1$ ) la iluminări slabe, și supraliniare ( $n=2$ ) la iluminări mai intensive [9]. La doparea cu  $Ni$ , indicele de putere  $n$  al CLA nu depinde de iluminare, astfel încât la mărirea concentrației înclinația se micșorează ( $n=0.65$ ). Aceasta mărturisește despre schimbarea mecanismului de recombinare din donor-acceptor în cel impuritar. Analiza datelor demonstrează că proprietățile studiate se modifică cel mai efectiv atunci când concentrația atomilor de  $Ni$  este  $1,2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Astfel, în rezultatul comparării datelor obținute cu datele lucrărilor [6, 7] se demonstrează că impuritatea de  $Ni$  influențează cel mai efectiv asupra proprietăților studiate ale  $ZnIn_2S_4$ .

Din analiza dependenței spectrale a fotoconducției în monocristalele de  $ZnIn_2S_4$  dopate cu  $Ni$  rezultă că ele posedă o particularitate comună ce constă în nedepistarea unor niveluri suplimentare în comparație cu cristalele special nedopate. Aceste particularități permit să presupunem că, la introducerea impurității de dopaj, are loc interacțiunea atomilor impuritari cu defectele proprii cristalului și că, de asemenea, se manifestă o dependență slabă a energiei de ionizare de natura donatorilor și acceptorilor introduși. Se poate conchide că atomii impuritari pot ocupa diferite poziții în rețeaua cristalină. Centrii acceptori adânci se pot afla atât în stare ionizată, cât și neutră, iar donorii de pe nivelurile mici sunt complet ionizați.

Interacțiunea coulombiană între centrii cu particule încărcate duce la apariția unor unități structurale noi ce au spectrul nivelurilor energetice situate foarte aproape unul de altul. Din această cauză, depistarea pozițiilor energetice ale acestor niveluri din spectrele fotoconducției este dificilă. Mărirea semilărgimii maximului, odată cu creșterea concentrației dopantului, este un indiciu al posibilității formării benzilor impuritate ce se pot contopi cu benzile permise.

Cel mai spectaculos efect în creșterea conductivității are loc atunci când doparea se face cu metale alcaline, inclusiv cu  $Cs$  [10]. Probabil, aceste elemente generează niveluri donor mici, grație electronului de valență slab legat cu atomul. În favoarea acestei ipoteze vorbește și faptul că rezistivitatea materialelor de tipul  $n$  se micșorează la dopare.

Luând în considerare existența nivelurilor de captare repartizate exponențial, putem conchide că captarea de către capcane a purtătorilor eliberați de la donorii mici duce la o creștere relativ slabă a conductivității cristalelor (comparativ cu concentrația impurităților introduse  $-10^{18} \div 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ). Într-adevăr, în cristalele special nedopate concentrația electronilor în banda de conducție  $n_0 \approx 10^6 \text{ cm}^{-3}$ , iar coeficientul de adiționare  $\theta \approx 10^6$ . Prin urmare, prezența nivelului donor mic cu concentrație  $N \sim 10^{18}$  stimulează mărirea concentrației electronilor în banda de conducție până la  $N_D \theta \approx 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , iar multiplul micșorării rezistivității va fi  $N_D \theta / n_0 \approx 10^6$ , fapt care a fost observat și în cazul dopării cu cezium [11].

## Concluzii

S-a demonstrat că doparea compusului  $ZnIn_2S_4$  cu  $Ni$  duce la deplasarea marginii absorbției fundamentale în domeniul lungimilor de undă lungi a spectrului și generează mărirea de câteva ori a coeficientului de absorbție în comparație cu cristalele nedopate. Dependența marginii de absorbție este strict exponențială.

Odată cu mărirea concentrației dopantului, crește și deplasarea marginii de absorbție în domeniul undelor lungi. Cea mai mare influență a impurității de  $Ni$  asupra proceselor de recombinare s-a depistat la concentrația de  $1.2 \cdot 10^{19}$ , la care se schimbă și mecanismul recombinării. S-au determinat valorile nivelurilor energetice 2.50, 2.64 și 2.81 eV condiționate de impuritatea de  $Ni$ .

## Bibliografie

1. Алиев, В. О., Гусейнов, Э. Р., Алиев, О. М., Алиев Р. Я., *Синтез и свойства монокристаллов  $LnIn_2S_6$*  // Изв. РАН, сер. Неорганические материалы, 2000, Т. 36, №8, стр. 908-912.
2. Aramă, E., *Proprietățile optice ale sulfizilor multicompozenți stratificați*. Chișinău, 2004, 200 p.
3. Zhitar, V.F., Moldovyan, N.A., Arama, E., Radautsan S., *S. Short-wavelength radiation detection on the layered sulphides*. // Annual Semiconductor conference, Sinaia, Romania, ICCE, 1992, p. 267-270.
4. Ababii, I., Arama, E., Zhitar, V., *UV Dosimeter for medical Application* // Analele Științifice ale USM, seria „Științe fizico-matematice”, 2002, p. 45-49.
5. Ababii, I., Aramă, E., *Dozimetru pentru recepționarea Ultravioletului în Medicină* // Analele științifice al USMF, 2002, V.1, p. 164-171.
6. Кокшин, В. М., Атрощенко, Л. В., *Термодинамическое исследование растворимости примесей в полупроводниках* // Изв. АН СССР, сер. Неорганические материалы, 1970, Т., №4, стр. 714-719.
7. Shionoya, S., Tamoto, Y., *Luminescence of  $ZnIn_2S_4:Cu$  Single Crystals* // Phys. Soc. Jap., 1964, V.19, n. 7, p. 1142-1149.
8. Герасименко, В.С., Грушка, Г.Г., Шеремет, Г.П., *Решеточное поглощение в модифицированном примесями телуриде индия* // Изв. АН СССР, сер. Неорганические материалы, 1984, Т. 20, №8, стр. 1323-1326.
9. Житарь, В.Ф., Дону, В.С., Молдовян, Н.А., *Рекомбинационные центры и ловушки в монокристаллах  $ZnIn_2S_4$*  // Сб. Всесоюз. Конф. «Тройные полупроводники и их применение». Кишинев, изд. «Штиинца», 1976, стр. 156-158.
10. Aramă, E. *Note nepublicate*.
11. Житарь, В.Ф., Молдовян, Н.А., Арама Е.Д., *Эффект прилипания в монокристаллах  $ZnIn_2S_4$*  // Известия АН МССР, серия физ. тех. и матем. наук, 1977, 3, стр. 84-86.

## OPTICAL AND PHOTOELECTRICAL PROPERTIES OF THE MONOCRYSTALS $ZnIn_2S_4:Ni$

**Efim Aramă**

(Universitatea de Medicină și Farmacie „Nicoale Testimițanu”,  
Republic of Moldova)

The method of doping of the monocrystals  $ZnIn_2S_4:Ni$  has been elaborated. The influence of this doping substance on the margin of absorption was established, spectra of photoconductivity and the existence of luminescence at the temperature of 300 K. The energetical levels of energies 2.50; 2.64; 2.81 eV were identified. The dynamics of the characteristics depending on the concentration of doping substance and their interpretation is presented.

Prezentat la redacție la 06.04.07

CZU: 535.37

## FOTOLUMINISCENȚA STRATURILOR SUBȚIRI DE ZnSe

**Mihail Popa** (Universitatea de Stat „Alecu Russo”, R. Moldova)

**Gheorghe Ioan Rusu** (Universitatea „Al. I. Cuza”, România)

Straturile subțiri de ZnSe au fost depuse pe suporturi de sticlă prin metoda evaporării termice în vid în volum cvazi-închis.

Au fost studiate curbele de relaxare a fotoluminiscentei straturilor subțiri de ZnSe. Timpul de viață a purtătorilor de sarcină de neechilibru, determinat din panta dependenței de tip  $\ln(J_{FL} / J_{FL}(0)) = f(t)$  este de circa 15.38μm.

Dependența spectrală a fotoluminiscentei straturilor subțiri de ZnSe prezintă o curbă cu un maxim localizat la aproximativ 2.01eV. Diferența dintre lărgimea benzii interzise ( $E_g = 2.67\text{eV}$ ) și energia acestui maxim ne indică un nivel de localizare al centrelor de recombinare.

### Introducere

Prin luminescență se înțelege fenomenul prin care o substanță dată transformă energia primită în lumină vizibilă. Acest proces are loc la o temperatură la care radiațiile vizibile încă nu pot fi generate prin radiații termice.

Luminescența se deosebește de radiația termică a corpului dat, deoarece este o emisie excedentară în raport cu radiația termică.

Emisia fotonului are loc în două cazuri:

- când un electron liber din banda de conducție se recombina cu un gol din banda de valență (recombinare bandă-bandă);
- când un electron liber se recombina cu o impuritate din banda interzisă sau un gol liber se recombina cu un electron localizat (recombinare prin intermediul capcanelor).



În procesul recombinării semiconductorul trece dintr-o stare cu energie mai ridicată într-o stare cu energie scăzută prin emisia surplusului de energie sub forma radiațiilor electromagnetice. Luminiscența este o emisie de neechilibru.

Substanțele care au proprietatea de luminiscență se numesc *luminofori*. Aceștia se folosesc la ecranele tuburilor cinescop (osciloscop, televizor), la diferiți contori de scintilație, contori pentru particule nucleare, tuburi luminiscente etc.

Pentru a se produce recombinarea sistemului dat, semiconductorul, dielectricul trebuie să treacă într-o stare de *neechilibru* (într-o stare excitată). Dacă energia de excitare este obținută prin iradierea corpurilor cu radiații electromagnetice, atunci astfel de luminiscență se numește *fotoluminiscență* [1, 2].

Din caracteristicile și parametrii radiației de fotoluminiscență se pot obține informații referitoare la centrele de recombinare, care influențează atât proprietățile radiative, cât și cele fotoelectrice ale eșantioanelor [3 – 5].

Seleniura de zinc (ZnSe) este un material semiconductor din grupa  $A^{II}B^{VI}$  cu mai multe caracteristici importante (bandă interzisă largă, rezistivitate electrică mică, fotosensibilitate și transmisie optică mare, etc.). În consecință, acest compus oferă o largă varietate de aplicații ca fotodetectori, celule solare, dispozitive emițătoare de lumină albastră etc. [3].

Investigațiile de structură (difracția de radiații X, difracția de electroni, microscopia electronică prin transmisie și microscopia de forță atomică) au demonstrat că straturile sunt policristaline și au o structură de tip blendă de zinc. Cristaliții au o orientare preferențială după planul (111) paralel cu suportul [9].

Scopul acestei lucrări este de a ridica curbele de relaxare ale fotoluminiscenței și de a determina unele caracteristici semiconductoare; de a le compara cu alte caracteristici obținute din curbele de relaxare ale fotoconductivității. O altă sarcină consta în a obține informații utile și din dependențele spectrale ale fotoluminiscenței.

### Metodica experimentală

Straturile de ZnSe au fost obținute prin evaporare termică în vid pe suporti de sticlă aflați la temperatura camerei. Deasupra straturilor s-au depus electrozi de  $AuCl_2$  la distanță de 1mm unul de altul și eșantioanele obținute au fost răcite în vapori de azot până la temperatura azotului lichid (78K) [6 – 9].

Dependența spectrală a fotoluminiscenței straturilor subțiri de ZnSe a fost cercetată la temperatura de 78K. Fotoluminiscența a fost excitată cu fasciculul de radiație a laserului molecular  $N_2$  ( $\lambda_{ex} = 0.337\mu m$ ,  $P = 1.6kW$ ,  $\Delta t = 10^{-8}s$ ). Densitatea de putere de excitare a luminiscenței atinge valoarea de  $\sim 10^5 W/cm^2$ , iar frecvența de modulare – 25Hz.

Schema bloc a instalației de determinare a distribuției spectrale a luminiscenței este prezentată în fig.1 [6-8].

Fasciculul laser a fost focalizat pe suprafața stratului subțire de ZnSe cu ajutorul unei lentile din cuarz  $L_1$  cu distanță focală de 75 mm.

Stratul de ZnSe, preparat pe suportul de sticlă, a fost introdus într-un criostat optic și răcit cu vapori de azot până la temperatura de 78K.

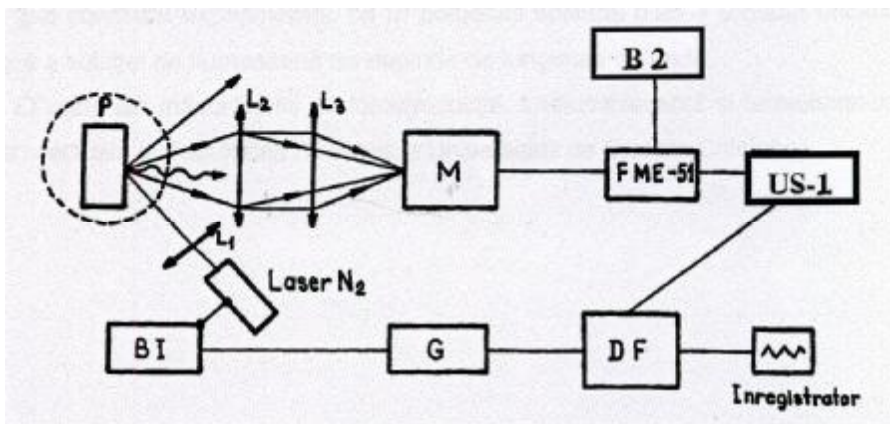


Fig. 1. Schema instalației pentru măsurarea caracteristicii spectrale a fotoluminiscenței.

Suprafața activă a probei P a fost așezată astfel încât, cu ajutorul unei lentile  $L_2$ , cu distanța focală  $f_2 \approx 50\text{mm}$  și cu diametrul  $D = 50\text{mm}$ , fasciculul de radiație normal la probă să fie colectat, iar cel reflectat să nu nimerească pe lentila  $L_2$ .

De asemenea, lentila  $L_2$  a fost situată la o distanță egală cu distanța focală față de sursa luminiscentă.

O lentilă  $L_3$  focalizează fasciculul luminiscent pe o fantă de intrare a monocromatorului M. La ieșirea din monocromator, fasciculul este înregistrat cu ajutorul unui fotomultiplicator electronic de tip FME-51, sensibil în domeniul lungimilor de undă  $0.33 - 0.85 \mu\text{m}$ .

Sistemul de înregistrare este alcătuit dintr-un amplificator selectiv US-1, un detector de fază DF și un înregistrator.

În fig.1, B1 și B2 sunt blocuri de alimentare, iar G este un generator. Amplificatorul selectiv și detectorul de fază sunt reglate astfel încât frecvența lor să coincidă cu frecvența impulsurilor de lumină laser.

Întrucât fotomultiplicatorul FME-51 este un receptor cu sensibilitate diferită la diferite lungimi de undă, instalația se calibrează utilizând o sursă luminiscentă cu distribuție spectrală cunoscută.

S-a constatat experimental că în domeniul spectral  $0.25 - 0.65 \mu\text{m}$  eficacitatea cuantică a soluției de fluorescență nu depinde de lungimea de undă.

Măsurătorile de fotoluminiscentă au fost efectuate la Facultatea de Fizică a Universității de Stat din Chișinău.

## Rezultate experimentale

Curba de relaxare a fotoluminiscenței reprezintă variația cu timpul a intensității luminiscente,  $J_{FL} = f(t)$ , măsurată din momentul întreruperii iluminării probei. Aceasta se supune legii exponențiale de forma

$$J_{FL}(t) = J_{FL}(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

unde  $J_{FL}(0)$  reprezintă intensitatea luminiscentă la momentul întreruperii iluminării ( $t = 0$ ),  $J_{FL}(t)$  - intensitatea luminiscentă peste intervalul de timp  $t$ , iar  $\tau$  - timpul de viață a purtătorilor de neechilibru.

În fig. 2 este reprezentată curba de relaxare a fotoluminiscenței unui strat subțire de ZnSe. Valoarea  $J_{FL}(0)$  se mai numește valoarea staționară a fotoluminiscenței, iar  $J_{FL}(\text{rem})$  - valoarea remanentă a luminiscentei. Logaritmand ambele părți ale relației (1) și făcând transformările de rigoare, putem determina timpul de viață al purtătorilor de sarcină conform relației

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{J_{FL1}}{J_{FL}(0)}\right) - \ln\left(\frac{J_{FL2}}{J_{FL}(0)}\right)}, \quad (2)$$

unde  $J_{FL1}$  reprezintă fotoluminiscența staționară a eșantionului la momentul  $t_1$ , iar  $J_{FL2}$  - fotoluminiscența staționară a eșantionului la momentul  $t_2$ .

Pentru aceeași probă de ZnSe s-a construit dependența  $\ln(J_{FL}/J_{FL}(0)) = f(t)$  (Fig.2). Timpul de relaxare calculat din panta porțiunii liniare este egal cu  $15.38\mu\text{s}$ . Această valoare, precum și cele obținute din curbele de relaxare a fotoconductivității [9] sunt în bună concordanță cu cele obținute de Șeikman și Șik [10] pentru cristalele de ZnSe.

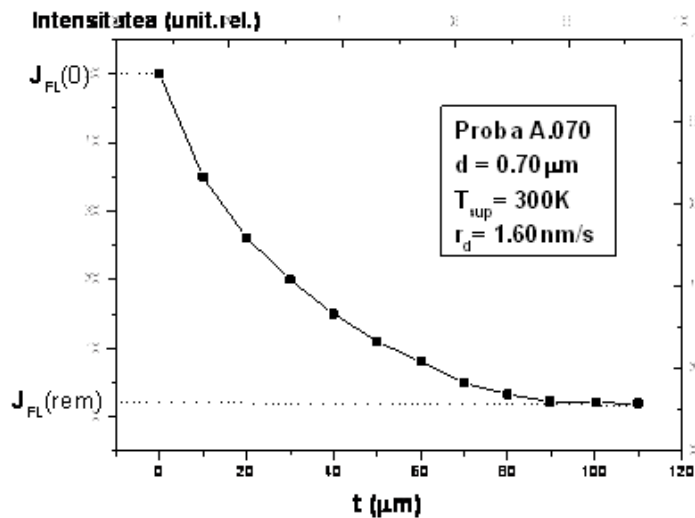


Fig. 2. Curba de relaxare a fotoluminiscenței unui strat subțire de ZnSe.

A fost cercetată, de asemenea, a dependența spectrală a fotoluminiscenței straturilor subțiri de ZnSe la temperatura de 78K (Fig.3). Mărima  $\Sigma_{FL}$  se numește sensibilitatea spectrală relativă a fotoluminiscenței. Curba are un singur maxim, care este localizat la aproximativ 2.01eV. Cunoscând această valoare, putem determina poziția centrelor de recombinare ca diferența dintre lărgimea benzii interzise ( $E_g = 2.67\text{eV}$ ) [1 – 5] și energia acestui maxim. Astfel, putem concluziona:

În straturile subțiri de ZnSe un nivel energetic al centrelor de recombinare este localizat la distanța de 0.66eV de la marginea superioară a benzii de valență.

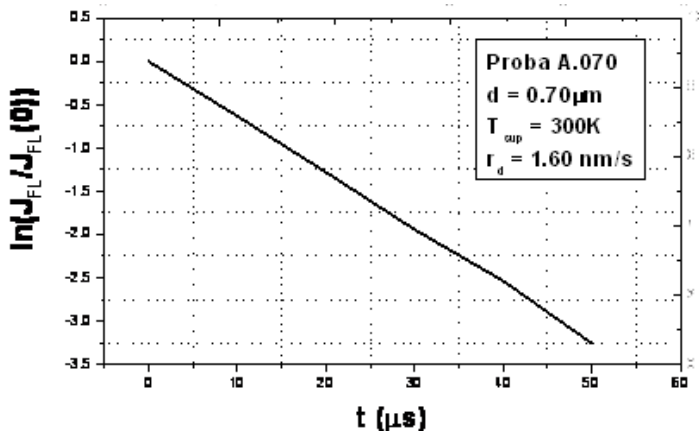


Fig. 3. Dependenta  $\ln(J_{FL}/J_{FL}(0)) = f(t)$  pentru un strat subțire de ZnSe.

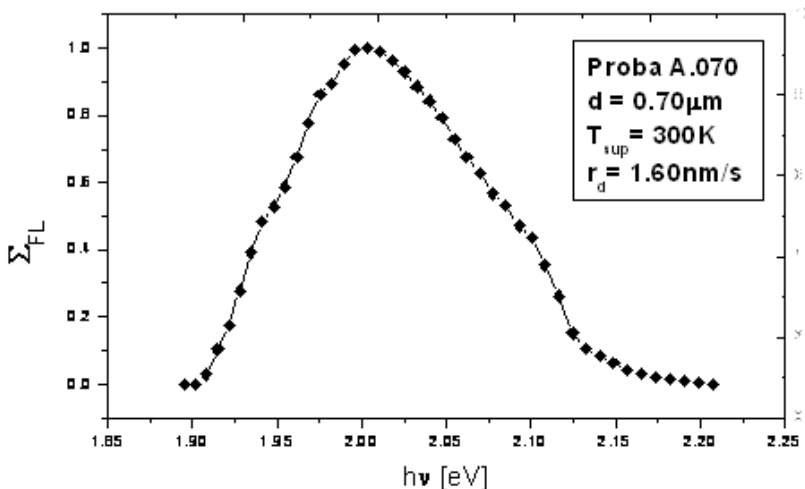


Fig. 3. Dependenta spectrală a fotoluminiscentei unui strat subțire de ZnSe.

Gașin P. și colaboratorii săi [11] au depistat picul respectiv pentru cristalele de ZnSe recoapte în topitură de Zn și apoi răcite până la temperatura azotului lichid. Ei presupun că apariția acestei benzi este determinată de tranzițiile radiante tip  $Zn_i^+ \rightarrow V_{Zn}$ . Energia de activare a vacanțelor de zinc este  $\approx 0.63\text{eV}$ , aproximativ egală cu valoarea maximă a fotoluminiscentei din domeniul “roșu” al spectrului.

### Concluzii

Au fost studiate curbele de relaxare a fotoluminiscentei straturilor subțiri de ZnSe. Valoarea timpului de viață a purtătorilor de sarcină de neechilibru, determinat din aceste curbe, este în bună concordanță cu valorile obținute din curbele de relaxare a fotoconductivității. Dependenta spectrală a fotoluminiscentei

straturilor subțiri de ZnSe ne permite să determinăm un nou nivel energetic de localizare al centrelor de recombinare.

### Bibliografie

1. Bube, R.H., *Photoconductivity of solids*, New York, Wiley, 1960, 485p.
2. Moss, T.S. (Ed), *Handbook on Semiconductors*, vol.2: *Optical Properties of Semiconductors*, (Ed. M.Balkanski), Amsterdam, Elsevier, 1994, 523p.
3. Недеогло, D.D., Симашкевись, A.B., *Электрические и люминисцентные свойства селенида цинка*, Кишинев, Штиинца, 1984.
4. Rusu, G.I., Rusu, I., Stamate, Marius, *Introducere în fizica semiconductorilor*, v.1, Vacău, Ed. „Plumb”, 1997, 244 p.
5. Nicolaescu, I.I., *Introducere în fizica corpului solid*, Pitești, Ed. „Cultura”, 1997, 648 p.
6. Павлов, Л.П., *Методы измерения параметров полупроводниковых материалов*, Москва, Высшая школа, 1987.
7. Ковотонюк, Н.Ф., Концевой, И.А., *Измерения параметров полупроводниковых материалов*, Москва, Металлургия, 1970.
8. Лисов, В.Ф., *Практикум по полупроводникам*, Москва, Металлургия, 1976.
9. Popa, M. E., *Contribuții la studiul proprietăților electrice și optice ale unor compuși semiconductori binari în straturi subțiri: Rezumatul tezei de doctorat*, Universitatea “Al. I. Cuza”, Iași, 2003, 56p.
10. Шейнкман, М.К., Шик, А.Ю., *Физ. Тех. Полупров.*, 1976, т.10(2), стр.209-215.
11. Гашин, П.А., Иванова, Г.Н., Иванова, Т.Л., *Физ. Тех. Полупров.*, 1981, т.15(9), стр. 1841-1845.

## THE FOTOLUMINISCENCE SPECTRA OF ZnSe THIN FILMS

**Mihail Popa** („Alecus Russo” State University, Republic of Moldova)

**Gheorghe Ioan Rusu** („Al. I. Cuza” University, Romania)

ZnSe thin films were deposited onto glass substrates by the quasi-closed volume evaporation technique under vacuum.

The relaxation curves of the photoluminescence of the thin films of ZnSe were studied. The lifetime of charge carriers of unbalance, determined from dependence slope of type  $\ln(J_{FL} / J_{FL}(0)) = f(t)$  is about 15,38 $\mu$ m.

Spectral dependence of the photoluminescence of the thin films of ZnSe presents a curve with an maximum located at about 2.01eV. The difference between the width of the forbidden band [ $E_g = 2.67$ eV] and this maximum energy indicates the level of the location of the recombination centers.

Prezentat la redacție la 20.04.07

CZU: 538.9

## **DISPOZITIV PENTRU STUDIUL DEPENDENȚEI DE TEMPERATURĂ A CONDUCTIVITĂȚII ELECTRICE LA STRATURILE SUBȚIRI SEMICONDUCTOARE**

**Mihail Popa** (Universitatea de Stat „Alec Russo”, R. Moldova)

**Gheorghe Ioan Rusu** (Universitatea „Al. I. Cuza, România)

În lucrare se descrie construcția și principiul de funcționare a unui dispozitiv experimental utilizat pentru măsurarea rezistenței electrice a straturilor subțiri semiconductoare la diferite temperaturi. De asemenea, se prezintă metodica determinării conductivității electrice și a altor parametri caracteristici straturilor subțiri.

### **Introducere**

Dintre parametrii caracteristici ai materialelor semiconductoare, cel mai intens studiat în prezent este conductivitatea electrică.

Depinzând de o serie de factori ale căror acțiuni nu pot fi separate (forma și dimensiunile eșantionului, valoarea tensiunii electrice aplicate, temperatura, presiunea, natura materialului din care sunt confecționați electrozii, natura și presiunea gazului din incinta de măsurare etc.), măsurarea conductivității electrice a straturilor subțiri semiconductoare constituie o problemă deosebit de dificilă.

Marea majoritate a datelor experimentale referitoare la conductivitatea sau rezistivitatea electrică a straturilor subțiri se obțin în urma măsurărilor efectuate în curent continuu prin metoda celor două sonde [1].

Prin utilizarea metodei celor patru sonde se obțin date mai sigure, însă în cazul straturilor subțiri, folosirea acestora este de multe ori limitată de existența la suprafața lor a unui strat de sarcină spațială care influențează mult precizia măsurărilor [1].

Scopul acestei lucrări este de a prezenta construcția și principiul de funcționare a unui dispozitiv experimental utilizat pentru determinarea conductivității electrice a straturilor subțiri semiconductoare la diferite temperaturi. De asemenea, este important de a prezenta metodica de determinare și a altor parametri caracteristici straturilor subțiri.

### **Considerații teoretice**

Conductivitatea electrică constituie un parametru important în studiul fenomenelor de transport ale straturilor subțiri semiconductoare.

Într-un semiconductor conductivitatea electrică este egală cu suma conductivităților electrice datorate electronilor  $\sigma_n$  și a golurilor  $\sigma_p$  [2-4], adică

$$\sigma_i = \sigma_n + \sigma_p = ne\mu_n + pe\mu_p, \quad (1)$$

unde  $\mu_n$  și  $\mu_p$  reprezintă mobilitatea electronilor și, respectiv, a golurilor, iar  $n$  și  $p$  – concentrațiile purtătorilor de sarcină respectivi.

Pentru un semiconductor intrinsec concentrațiile celor două tipuri de sarcină sunt egale

$$n = p = n_i \quad (2)$$

și în consecință relația (1) devine:

$$\sigma_i = ne(\mu_n + \mu_p). \quad (3)$$

În domeniul conducției intrinseci concentrația electronilor liberi din banda de conducție și respectiv a golurilor din banda de valență se poate exprima prin relația [2, 3]

$$n = p = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right), \quad (4)$$

unde  $N_C$  și  $N_V$  reprezintă densitățile efective de stări în benzile respective,  $k_B$  – constanta Boltzmann, iar  $E_g$  – lărgimea benzii interzise.

În domeniul temperaturilor mai mari predomină împrăștierea purtătorilor pe vibrațiile rețelei și dependența de temperatură a mobilităților se poate scrie sub forma [2-4]

$$\mu_n = B_n T^{-\frac{3}{2}} \quad \text{și} \quad \mu_p = B_p T^{-\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

în care parametrii  $B_n$  și  $B_p$ , practic, nu depind de temperatură.

Înlocuind relațiile (5) și (4) în (3) obținem:

$$\sigma_i = \left[ e\sqrt{N_C N_V} (B_n T^{-\frac{3}{2}} + B_p T^{-\frac{3}{2}}) \right] \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right). \quad (6)$$

Notăm cu  $\sigma_0$  expresia din parantezele pătrate ale relației (6). Aceasta reprezintă o constantă caracteristică fiecărui semiconductor. Astfel, relația (6) poate fi scrisă sub forma [2-4]

$$\sigma_i = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B \cdot T}\right) \quad (7)$$

Dependența conductivității electrice de temperatură, descrisă de relația (7), este comod să fie reprezentată grafic în coordonate semilogaritmice.

Logaritmăm relația (7) și obținem:

$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k_B} \cdot \frac{1}{T}. \quad (8)$$

De regulă, expresia (8) se scrie sub forma:

$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k_B \cdot 10^3} \cdot \frac{10^3}{T} \quad (8/)$$

Reprezentând această dependență în coordonate  $(\ln \sigma, \frac{10^3}{T})$ , se obține o dreaptă care intersectează axa ordonatelor în punctul  $\ln \sigma_0$  (Fig.1), iar panta porțiunii liniare a dependenței  $\ln \sigma_i = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$  este egală cu  $\frac{E_g}{2k_B \cdot 10^3}$  :

$$\frac{[\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1]}{\left(\frac{10^3}{T_2} - \frac{10^3}{T_1}\right)} = -\frac{[\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1]}{\left(\frac{10^3}{T_1} - \frac{10^3}{T_2}\right)} = -\frac{E_g}{2k_B \cdot 10^3} \quad (9)$$

În acest caz, lărgimea benzii interzise,  $E_g$ , se poate calcula după relația:

$$E_g = 2k_B \cdot 10^3 \frac{[\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1]}{\left(\frac{10^3}{T_1} - \frac{10^3}{T_2}\right)} \quad (10)$$

Înlocuind în relația (10) constanta lui Boltzmann ( $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K} = 8,6172 \text{eV/K}$ ) se obține o relație care dă valoarea lui  $E_g$  în eV:

$$E_g \cong 0,1725 \frac{[\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1]}{\left(\frac{10^3}{T_1} - \frac{10^3}{T_2}\right)}, \text{eV} \quad (11)$$

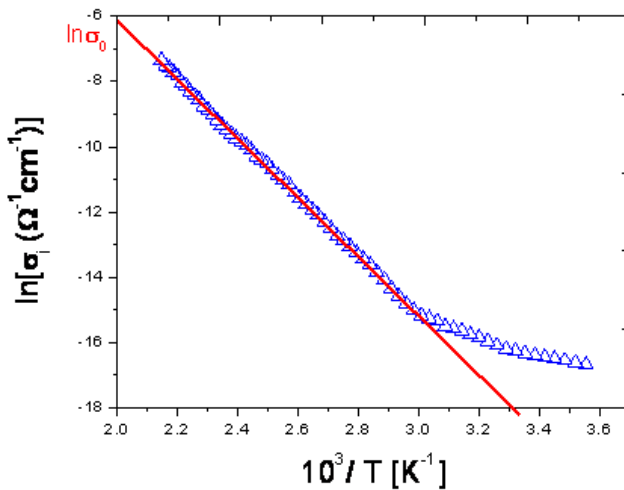


Fig. 1. Dependența de temperatură a conductivității electrice pentru un strat subțire semiconductor.



### Detalii experimentale

Pentru determinarea conductivității electrice a straturilor subțiri, rezistența electrică a acestora a fost măsurată în mod direct cu un megaohmmetru, conectat prin intermediul cablurilor ecranate (14) la sondele de măsură (11) (Fig. 3), iar temperatura probei a fost determinată cu ajutorul unui termocuplu de cupru-constantan (12) fixat pe suprafața stratului (Fig. 3) [5].

Rezistivitatea electrică a unui strat subțire poate fi determinată din relația:

$$\rho = R \frac{A}{\mathbf{1}}, \quad (12)$$

unde  $A$  este aria secțiunii transversale,  $A = d \cdot L$ ,  $d$  este grosimea stratului,  $L$  – lățimea stratului, iar  $\mathbf{1}$  – lungimea stratului (distanța dintre electrozi) (Fig. 2). Obținem

$$\rho = R \frac{d \cdot L}{\mathbf{1}}, \quad (13)$$

și, respectiv, conductivitatea electrică

$$\sigma = \frac{\mathbf{1}}{d \cdot L} \cdot \frac{1}{R}. \quad (14)$$

Temperatura stratului subțire de ZnSe a fost calculată din relația

$$T_{str} = T = \frac{U_s(mV)}{\alpha_s} + T_{cam} + 273,15 \text{ (K)}, \quad (15)$$

unde  $\alpha_s = 0,033 \text{ mV/}^\circ\text{C}$  reprezintă coeficientul Seebeck pentru termocuplu de cupru-constantan, iar  $T_{cam}$  este temperatura camerei.

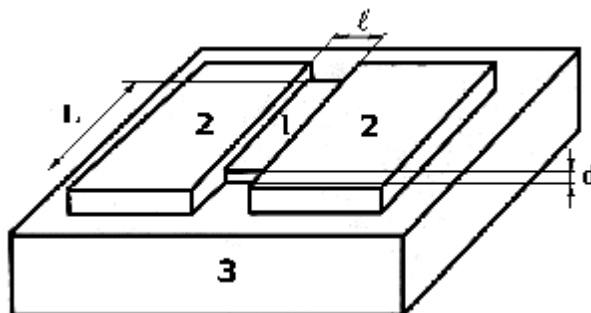


Fig. 2. Schița unui eșantion: 1 – strat subțire de ZnSe; 2 – electrozi de In; 3 – suport de sticlă.

### Descrierea dispozitivului experimental

Pentru studiul dependenței de temperatură a conductivității electrice, în laboratorul Fizica Semiconducătorilor, Catedra Fizica Corpului Solid, Universitatea „Al. I. Cuza” din Iași, România, s-a proiectat și construit dispozitivul experimental prezentat schematic în fig. 3 și 4 [5].

Partea principală a acestuia o constituie corpul (1) fixat pe un suport (2), iar pe acesta prin intermediul a patru tije metalice (13) se instalează un cuptor electric (3).

Contactele cu electrozii eșantionului se realizează cu ajutorul unor sonde (11) (cu suprafață mare de contact), fixate pe niște suporturi mobile (10) care pot aluneca pe un ax orizontal (9), modificându-se astfel distanța dintre sonde. Sistemul de susținere suporturi – sonde (8) este atașat unui braț mobil (5), care se poate roti în plan vertical și orizontal, fiind acționat de o manetă (6). Drumul de culisare a brațului mobil este strict determinat de o canelură (7) practică în peretele cilindric al corpului metalic (1).

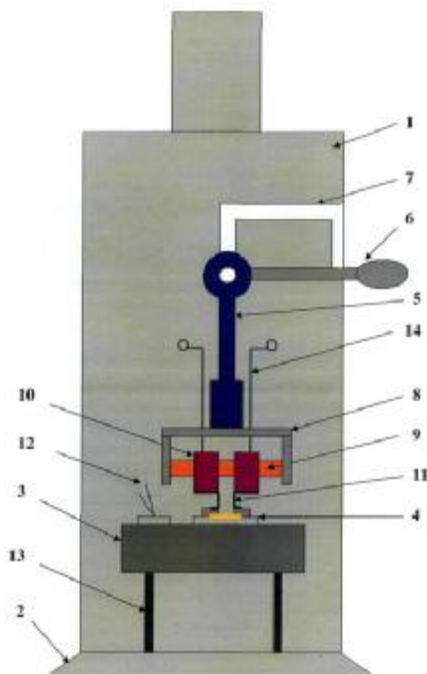


Fig. 3. Dispozitivul experimental (vedere din față). Elemente componente: 1 – corpul dispozitivului, 2 – suportul dispozitivului, 3 – cuptorul electric, 4 – eșantion (suport + strat + electrozi), 5 – braț mobil, 6 – maneta de acționare a brațului mobil, 7 – drum culisare braț – mobil, 8 – sistem de susținere suporturi-sonde, 9 – tijă izolatoare, 10 – suportii sondelor, 11 – sonde electrice, 12 – termocuplu, 13 – picioarele cuptorului electric, 14 – cabluri ecranate.

Rezistența electrică a straturilor subțiri poate fi măsurată cu ohmmetre de precizie, care contactează cu sondele electrice (11) prin intermediul cablurilor ecranate (14). Pentru măsurări directe noi am folosit un multimetru KEYTHLEY 2010 care poate măsura rezistențe electrice cu valori cuprinse între  $10^{-6}\Omega$  și  $10^8\Omega$  (cu o rezoluție pentru valoarea maximă de  $10\Omega$ ), iar pentru probe cu rezistențe electrice mai mari de  $10^7\Omega$  se poate folosi un electrometru de tip KEITHLEY 6517A, care poate măsura rezistențe maxime de  $10^{14}\Omega$ .

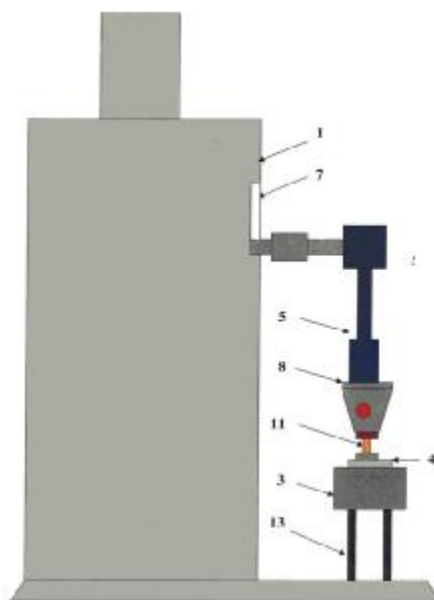


Fig. 4. Dispozitivul experimental (vedere dintr-o parte). Elemente componente: 1 – corpul dispozitivului, 3 – cuptorul electric, 4 – eșantion (suport + strat + electrozi), 5 – braț mobil, 7 – drum culisare braț – mobil, 8 – sistem de susținere suport-sonde, 11 – sonde electrice, 13 – picioarele cuptorului electric.

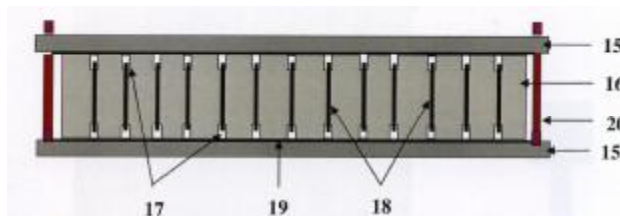


Fig. 4. Cuptorul electric. Elemente componente: 15 – plăci metalice, 16 – placă de steatit, 17 – caneluri, 18 – sîrmă de kantal, 19 – foiețe subțiri de mică, 20 – șuruburi de fixare.

Cuptorul (3) pentru încălzirea probelor a fost confecționat dintr-o placă de steatit (16) (Fig.4), în care au fost practicate (înainte de a fi tratată termic) o serie de caneluri (17), prin care a fost bobinată o sârmă

de kantal (18) cu diametrul de 0,5 mm. Placa de steatit (16) a fost izolată de plăcile metalice (15) cu ajutorul unor foițe subțiri de mică (19). Cu ajutorul șuruburilor (20) elementele cuptorului electric se fixează într-o anumită poziție.

Alimentarea cuptorului electric se face cu un autotransformator, ce permite obținerea temperaturii de circa 500-600K. În scopul uniformizării temperaturii, placa metalică (15) prezintă o suprafață mare.

### **Concluzii**

Dispozitivul experimental descris în lucrare are o serie de avantaje față de alte dispozitive bazată pe metoda celor două sonde:

- 1) maneta (6) are o lungimea ce permite culisarea lină a brațului mobil;
- 2) sondele electrice (11) asigură un contact destul de bun cu eșantionul, nedeteriorând suprafața acestuia;
- 3) cuptorul electric permite încălzirea eșantioanelor pînă la 500-600K;
- 4) dispozitivul poate fi utilizat și în incinte izolate, adică în condiții diferite de temperatură și presiune.

### **Bibliografie**

1. Spînulescu, I., *Fizica straturilor subțiri și aplicațiile acestora*, București: Ed. Științifică, 1975, 458 p.
2. Rusu, G.I., Rusu, I., Stamate, Marius, *Introducere în fizica semiconductorilor*, v.1, Bacău, Ed. „Plumb”, 1997, 244 p.
3. Nicolaescu, I.I., *Introducere în fizica corpului solid*, Pitești, Ed. „Cultura”, 1997, 648 p.
4. Епифанов, Г.И., *Физика твердого тела*, Москва, Высшая школа, 1975. 223p.
5. Popa, M. E., *Contribuții la studiul proprietăților electrice și optice ale unor compuși semiconductori binari în straturi subțiri: Rezumatul tezei de doctorat*, Universitatea “Al. I. Cuza”, Iași, 2003. – 56p.

---

## THE UNIT FOR RESEARCH TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SEMICONDUCTORS THIN FILMS

**Mihail Popa** („Alec Russo” State University, Republic of Moldova)  
**Gheorghe Ioan Rusu** („Al. I. Cuza” University, România)

The work describes the construction and the principle of working of an experimental unit for measurement of electrical resistance of semiconducting thin films at different temperatures. The methodology of electrical conductivity determination and of other characteristic parameters of thin films are also presented.

Prezentat la redacție la 20.04.07

C.Z.U.: 539.893

## CARACTERUL TENSIUNILOR ANIZOTROPICE ÎN PROBE CU SUPORT LATERAL SUPUSE COMPRIMĂRII DE VOLUM

**Virgil Cheptea**

(Universitatea de Stat “Alec Russo”, Republica Moldova)

Sunt determinate tensiunile anizotropice, care apar în probe din bismut, supuse comprimării de volum, la răcirea lor. Aceste tensiuni au o natură de comprimare și ating valori de  $65-70 \text{ MPa}$  când proba este supusă unei presiuni hidrostatice de  $0.2 \text{ GPa}$ . La creșterea ulterioară a presiunii, ele rămân constante și se adaugă presiunii din bomba în care este situată proba.

Metoda inelului de obținere a deformațiilor uniaxiale (anizotropice) presupune că sistemul probă-inel este supus unei comprimări hidrostatice. Deformația sistemului probă-inel va fi cu atât mai omogenă, cu cât comprimarea de volum va fi mai uniformă. Pentru obținerea presiunilor hidrostatice, în practică, se utilizează mai frecvent metoda "presiunii fixate" [1]. Presiunea este creată într-un cilindru (al cărui diametru interior este de ordinul a 3-6 mm) cu piston, apoi se fixează mecanic. Acest sistem se mai numește bombă.

Metoda presupune crearea presiunii la temperatura camerei, temperatură la care plasticitatea mediilor ce transmit presiunea către probă este înaltă, asigurând o comprimare hidrostatică a probei.

Pentru măsurări la temperaturi joase, de obicei, se folosește un amestec de gaz lampat-ulei, sau pentan-ulei (50% ulei). În acest caz, pentru mărirea ulterioară a presiunii, este necesară încălzirea, de fiecare dată, a bombei pînă la temperatura camerei. În procesul răcirii, mediul care transmite presiunea către probă se solidifică. Majoritatea lichidelor trec în fază solidă la temperaturi mari, cu excepția amestecului ulei-pentan, care la presiune normală se solidifică la temperatura de  $\approx$  -

140 °C și a amestecului gaz lampat-ulei care se solidifică la  $\approx -80$  °C. Cu cât este mai joasă temperatura de solidificare a mediului și cu cât mai încet are loc răcirea, cu atât mai mare va fi gradul de uniformitate a comprimării de volum.

Menționăm că, chiar dacă măsurările se efectuează la temperatura camerei, la care plasticitatea mediilor ce transmit presiunea spre probă este mare, cu creșterea presiunii aceste medii devin mai puțin plastice și se solidifică. De exemplu, gazul lampat la temperatura camerei se solidifică la presiunea de  $\approx 2$  MPa, iar pentanul la  $\approx 3$  MPa. Gradul de omogenitate al presiunilor obținute prin această metoda depinde de mecanismul solidificării (la răcire și la creșterea presiunii) și de variația volumului legat de el. Datorită acestor procese, presiunea nu se transmite uniform în toate direcțiile (nu mai este hidrostatică), fapt ce condiționează apariția unor tensiuni anizotropice suplimentare, de care trebuie să se țină cont, deoarece ele influențează caracterul deformației probei. În [1], s-a constatat că, la temperatura camerei, apar salturi apreciabile ale presiunii din bombă (apariția tensiunilor anizotropice) la presiuni  $p \geq 1.6$  GPa. De asemenea, se cunoaște [2] că aceste tensiuni apar datorită procesului neuniform de solidificare a mediului în procesul răcirii și diferenței mari dintre valorile coeficienților dilatării termice a mediului și a materialului din care este confecționată bomba. Neuniformitatea presiunii în bombă este influențată și de alți factori: amenajarea probei în canalul bombei, diametrul canalului bombei, viteza de răcire etc. Pentru mărirea gradului de omogenitate a presiunii se utilizează medii de transmitere a presiunii către probă care au o temperatură de solidificare mai joasă, se micșorează viteza de răcire, se utilizează bombe cu diametrul mai mare al canalului, se micșorează dimensiunile probei. Scopul prezentei lucrări constă în analiza calitativă a mărimii și a caracterului acestor tensiuni suplimentare, în special, a tensiunilor cauzate de forma, dimensiunile și felul de amenajare a probelor în bombă.

### Metodica experimentului

S-a studiat regimul de lucru în bombe confecționate din aliaj bronză-beriliu BRB-2 cu diametrul canalului  $d = 4$  mm. Ca mediu de transmitere a presiunii s-a utilizat un amestec de ulei-pentan (50% ulei), iar răcirea bombei pînă la temperatura de 80 K a avut loc în decurs de 2-3 ore. Acest regim asigură gradul de omogenitate necesar studiului efectelor cuantice și galvanomagnetice. În calitate de captoare pentru măsurarea presiunii au fost folosite manometre din manganin, precum și manometre supraconductoare din staniu. Datorită dimensiunilor mici ale probelor și, în general, ale sistemului probă-inel (de ordinul 2-3 mm), măsurarea directă a mărimii deformației reprezintă o problemă complicată. Din această cauză, s-au utilizat metode indirecte. În această lucrare, caracterul și mărimea deformațiilor probelor se determina prin analiza modificării secțiunii suprafeței Fermi în funcție de mărimea deformației probei. Calculele efectuate în cadrul modelului McClure (legea dispersiei) permit obținerea informației despre mărimea deplasării granițelor zonelor energetice la aceste deformații. În acest scop au fost studiate probe monocristaline din bismut, ale căror proprietăți fizice sunt bine

cunoscute atât la comprimarea hidrostatică [3], cât și la deformarea lor uniaxială [4]. Utilizînd potențialele de deformare, cunoscute pentru bismut, putem analiza atât calitativ cât și cantitativ caracterul tensiunilor suplimentare ce apar în probă. Variația relativă a secțiunilor minimale ale suprafeței Fermi  $\frac{\Delta s}{s}$  în funcție de mărimea efortului axial s-a determinat după metoda descrisă în [5]. S-au cercetat trei tipuri de probe, avînd forma de paralelipiped. Amenajarea lor în canalul bombei este prezentată în fig. 1.

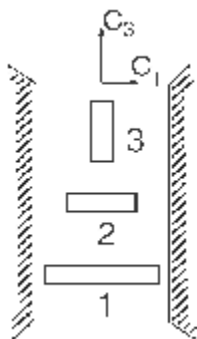


Fig. 1. Amenajarea schematică a probelor în canalul bombei.

Probele 1 și 2, pentru care raportul dintre lungimea lor  $l$  și diametrul canalului bombei  $d$  este egal, respectiv, cu 0.9 și 0.5, au fost amenajate în bombă perpendicular pe axa ei. Probele 3, pentru care  $\frac{l}{d} = 0.2$  au fost amenajate de-a lungul axei bombei, la mijlocul canalului, unde omogenitatea presiunii este maximală. Axa bisectoare  $C_1$ , în toate cazurile, a fost orientată perpendicular pe axa bombei, iar axa trigonală  $C_3$  - de-a lungul ei. Pentru înregistrarea oscilațiilor Shubnikov-de Haas în câmpul magnetic, s-a folosit metoda de modulație descrisă în [6]; câmpul magnetic este modulată de un semnal cu frecvența de 22 Hz și amplitudinea de 90 Oe cu ajutorul unor bobine alimentate de la un generator sonor.

### Rezultatele experimentale și analiza lor

Rezultatele experimentale sunt prezentate în fig. 2 și fig. 3. Se observă o deosebire cantitativă în dependența  $\frac{\Delta s}{s}(p)$  pentru probe de diferite tipuri; la o presiune în bombă  $p \approx 0.1 \text{ GPa}$ , variația secțiunii suprafeței Fermi la probele de tipul 1 este de aceeași natură ca și în cazul comprimării uniaxiale în lungul axei  $C_1$  [4]: secțiunea elipsoidului electronic  $S_1$  crește cu 60%, iar secțiunile celorlalți doi elipsoizi ( $S_2$  și  $S_3$ ) se micșorează.

La creșterea de mai departe a presiunii în bombă, efectul de comprimare uniaxială a probelor de tipul 1 rămîne constant și se suprapune efectului caracteristic comprimării hidrostactice (micșorarea echivalentă a secțiunilor celor trei elipsoizi electronici). În probe de tipul 2, efectul comprimării uniaxiale este

pronunțat mai puțin: creșterea secțiunii  $S_1$  la presiunea în bombă de  $p \approx 0.1 \text{ GPa}$  este de numai  $\sim 10\%$ .

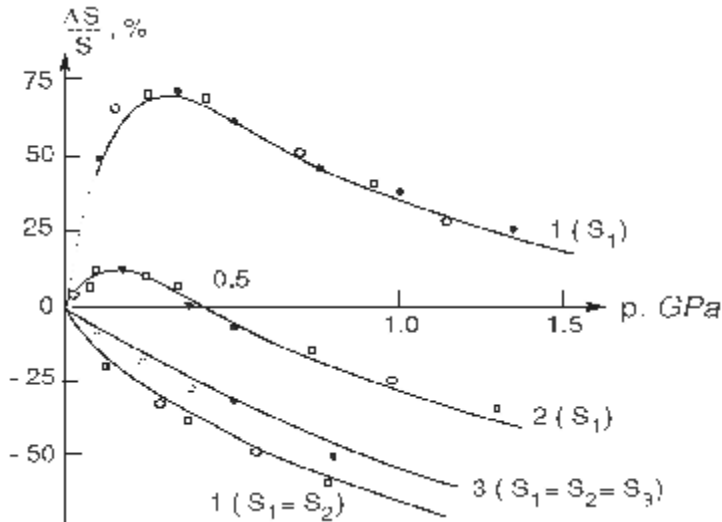


Fig. 2. Variația secțiunilor suprafeței Fermi la bismut în dependență de presiunea din bombă pentru diferite amenajări ale probelor în canalul bombeii.

La probele de tipul 3, cum era de așteptat (acestea sunt amenajate în regiunea unde presiunea este mai omogenă - centrul canalului bombeii), are loc o micșorare echivalentă a secțiunilor tuturor celor trei elipsoizi electronici cu viteza

$$\frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial p} = -0.06 (\text{GPa})^{-1}.$$

Felul de amenajare a probelor în canalul bombeii nu influențează amplitudinea oscilațiilor.

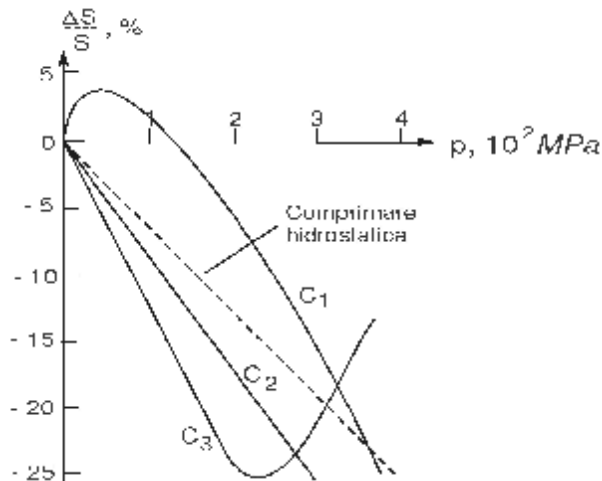


Fig. 3. Dependența variației relative a secțiunii suprafeței Fermi de efortul aplicat de-a lungul axelor  $C_1$ ,  $C_2$  și  $C_3$  [7].



Calculul tensiunilor care acționează asupra probelor s-a efectuat presupunându-se că ele sunt rezultatul acțiunii sumare a comprimării de volum și a celei uniaxiale în direcția  $C_1$ . Pentru celelalte direcții, de-a lungul cărora proba este amenajată la o distanță relativ mare față de pereții canalului bombei, efectele comprimării uniaxiale sunt mici.

Aceste calcule ale tensiunilor uniaxiale  $\sigma$  de comprimare, care acționează în lungul probei, au fost efectuate în baza datelor experimentale prezentate în fig. 2 și fig. 3 și a potențialelor de deformare pentru bismut [5]. Dependența acestor tensiuni de presiunea din bombă este prezentată în fig. 4.

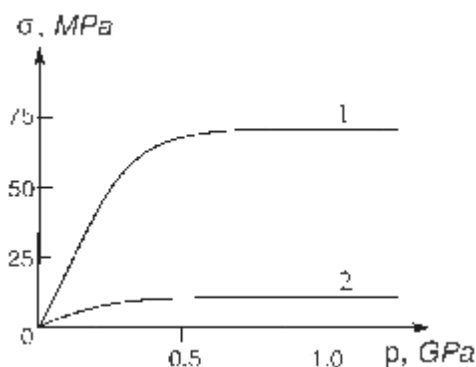


Fig. 4. Dependența tensiunii uniaxiale în lungul probelor de presiunea în bombă pentru probele de tipul 1 și 2.

Se observă că pînă la presiunea  $p \approx 0.25$  GPa, tensiunea crește, practic, proporțional cu presiunea, dar în mod diferit (în dependența de felul amenajării probelor în canalul bombei): pentru probele de tipul 1, raportul  $\frac{\sigma}{p} = 0.2$ , iar pentru cele de tipul 2 -  $\frac{\sigma}{p} = 0.04$ . Pentru probele de tipul 2, această creștere încetează începînd cu  $p \approx 0.4$  GPa, atingînd o valoare maximală 5.5 - 6.5 MPa și rămîne constantă la mărirea ulterioară a presiunii în bombă. Pentru probele de tipul 1, creșterea tensiunii  $\sigma$  are loc pînă la presiuni  $p = 0.55$  GPa și atinge valoarea maximală de 65 - 70 MPa; la creșterea de mai departe a presiunii din bombă, mărirea tensiunii rămîne constantă [8] și se adaugă presiunii hidrostatice.

## Concluzii

Rezultatele obținute permit de a concluziona că în procesul răcirii probelor din Bi pînă la temperatura de 4.2 K, în probe apar tensiuni uniaxiale cu caracter de comprimare. Valoarea acestor tensiuni poate fi destul de mare (65 - 70 MPa), dacă proba este plasată în apropierea pereților canalului bombei. La valori ale presiunii din bombă de pînă la  $p \approx 0.25 - 0.3$  GPa, probele de tipul 1 și 2 sunt supuse unei comprimări uniaxiale, în timp ce în probele de tipul 3 aceste tensiuni lipsesc. În intervalul 0 - 0.25 GPa a presiunii din bombă, dependența  $\sigma = f(p)$  este liniară. La creșterea în continuare a presiunii hidrostatice din bombă, tensiunile de

comprimare, care apar în probele de tipul 1 și 2, rămân constante și se adaugă presiunii hidrostatice. Rezultatele prezentate în lucrare permit determinarea caracterului deformației obținute cu ajutorul metodei inelului, și, de asemenea, facilitează interpretarea efectelor datorate acestor deformații, permițând separarea efectelor legate de comprimarea uniaxială de cele legate de comprimarea de volum.

### Bibliografie

1. Е.С.Ицкевич, *Физические исследования при высоких давлениях*, т.1, Таллинн (1977), с 146
2. Н.Б.Брандт, С.В.Кувшинников, Н.Я.Минина, Е.П.Скипетров, *Приборы и техника эксперимента*, 1973, №6, с 160.
3. Н.Б.Брандт, Е.С.Ицкевич, Н.Я.Минина, *Влияние давления на поверхность Ферми металлов*, Успехи Физических наук, т.104, №3, (1971), с.459
4. Н.Б.Брандт, В.А.Кульбачинский, Н.Я.Минина, В.Д.Широких *Изменение зонной структуры и электронные фазовые переходы у  $Bi_{1-x}Sb_x$  при деформациях типа одноосного растяжения*, Журнал Экспериментальной и теоретической физики, т.78 (3), 1980, с 1114
5. М.Ю.Лавренюк, Н.Я.Минина *Полный расчет констант деформационного потенциала в висмуте по данным об изменении энергетического спектра при всестороннем и анизотропном сжатии*, Физика низких температур, т 14 (1), 1988, с.53
6. С.М.Чудинов, *Кандидатская диссертация*, МГУ (1972), с. 180
7. В.Кептя, *Новый метод создания сильных анизотропных упругих деформаций монокристаллов и его применение для исследования энергетического спектра висмута*, Кандидатская диссертация, МГУ, 1973, с.143
8. В.Кептя, М.Ю.Лавренюк, Н.Я.Минина, *Оценка негидростатичности сжатия в бомбах фиксированного давления при низких температурах/ Приборы и техника эксперимента*, 1987, №5, с 174.

## CHARACTER OF ANISOTROPIC TENSIONS IN PROBES WITH LATERAL SUPPORT SUBJECT TO VOLUME COMPRESSION

**Virgil Cheptea**

(„Alecu Russo” State University, Republic of Moldova)

Anisotropic tensions, that appear in probes made of  $Bi$ , subjected to volume compression, during cooling, are determined. These tensions are of a compressive nature, and reach values of 65-70 MPa, when a probe is subjected to a hydrostatic pressure of 0.2 GPa. With further growth of pressure, the tensions remain constant, and are added to the pressure inside the bomb that contains the probe.

Prezentat la redacție la 22.09.07

---

CZU 621.391.81

## **OPTICAL AND RADIO SYSTEMS FOR INVESTIGATION OF THE IONOSPHERE**

**Eugeniu Plohotniuc** (State University “Alecu Russo”, Republic of Moldova)

The existing modern optical and radio systems which were successfully used for investigation of the main parameters, various kinds of instabilities and irregularities of the ionospheric plasma are briefly described.

The quickly changing plasma density in the non-regular ionosphere during its perturbations considerably affects propagation of radio waves through it, finally, decreasing the quality and efficiency of wireless communications, land-satellite and satellite-satellite, including positioning of any subscriber, stationary or moving, located in areas of service. An increase in the efficiency of short-wave wireless communication is impossible without a permanent observation of nonlinear processes occurring in the perturbed ionospheric plasma and without taking into consideration radio traces parameters, i.e., the key parameters of ionospheric communication link.

The parameters and dynamical processes occurring in the non-regular ionosphere are possible to investigate using modern radiophysical methods based on different devices and radio systems, such as optical devices, incoherent scatter radars, Global Navigation Satellite Systems (GNSS), superDARN, and ionosondes/digisondes.

The article briefly describes the existing modern optical and radio systems which were successfully used for investigation of the main nonlinear characteristics of the ionospheric plasma, various kinds of its instabilities and the corresponding irregularities of plasma density at various latitudes of the ionosphere without entering into a technical description of devices and systems.

Here, we draw the reader's attention to the possibilities of each corresponding device or system without going into technical details and schematical descriptions (which can be found in the referred literature), describing only their operation characteristics and possibilities to investigate natural and artificial ionospheric phenomena.

### **Optical Devices**

Optical devices, such as photometric and spectrometric devices, digital All-Sky cameras, and TV complexes are used to investigate the atmospheric and ionospheric parameters and processes. These devices are successfully used separately or with radar systems and ionosondes, operating regularly in many places over the world, such as Alaska, Arecibo, Arequipa, Fairbanks, New Zealand, Peru and Puerto Rico, Russia, the North and South Poles [1-16].

For example, at *Arecibo Incoherent Scatter Radar System (AISRS)*, an optical set of equipments includes two *Tilting-Filter Photometers*, an *Ebert-Fastie Spectrometer* with one-meter focal length, two pressure-scanned *Fabry-Perot Interferometers* each having six-inch diameter etalon plates and lidars. The set of optical devices used in investigations of the atmosphere and the ionosphere is presented in Table 1.

Photometers, combined with a set of optical filters, are used to measure the intensities of airglow emissions of the visible and near-infrared part of the optical spectrum [1, 2]. Specific filters are available at Arecibo to measure the airglow lines of various gases in the atmosphere, such as OH, O<sub>2</sub>, O, O<sup>+</sup>, N, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, H, He, and Na.

*Tilting-Filter Photometers* assembled at AISRS have the following parameters: a single channel with bandwidth (at the level of 3 dB) of 0.3 to 1.0nm (depending on the choice of interference filter). The programmable filter tilt is controlled by the stepping motors with 10° tilt range or approximately 2.5-nm scan range with field-of-view varied between 0.25° and 5.0° using selecting field stops.

*Spectrometers* are used to measure spectral blends of airglow emission bands at medium to high spectral resolution [3, 4]. The *Ebert-Fastie Spectrophotometer* arranged at AISRS has the following parameters: one-meter focal length with a bandwidth varied between 0.02nm to 1.0 nm. A programmable wavelength scanning takes place via stepping motors with maximum scan range limited to 100nm (anywhere between roughly 300nm and 900 nm) with variable field-of-view, which varies between 0.1° and 9.0°.

*Interferometers* are generally used to measure Doppler temperature and winds that originate in the *E*- and *F*-regions of the ionosphere, or to measure the spectral distribution and temporal variation of the hydrogen geocorona [5–7]. *Fabry-Perot Interferometers* at AISRS have the following parameters: each interferometer is with 1.2-meter focal length and 0.15-meter clear apertures with typical bandwidth of 0.001nm and free spectral range of 0.01nm. The wavelength change takes place via pressure scanning using pistons and choice of scanning gas of Ar, CO<sub>2</sub>, or SF<sub>6</sub>. The field-of-view depends on the choice of aperture size, but it is typically 0.25° for 630nm observations. It also has He-Ne frequency stabilized laser for linewidth calibration and thermal control of etalon and prefilter.

The Optical Laboratories at AISRS have one *Doppler Rayleigh Lidar* and two *Resonance Fluorescence Lidars*. The *Doppler Rayleigh Lidar* is used to measure the Doppler shifts and widths of the spectrum of the laser light that is broadened and backscattered from the atmosphere and lower ionosphere from about 15 to 70-80 km of altitude and have the following parameters: Nd/YAG-based laser transmitter with the 24-W average power (with 100 MW in its peak) operating at 532 nm and at frequency of 40 Hz with the pulse width of 6ns. It has the 80-cm diameter Cassegrain telescope receiver. All the other details can be found in [8-16]. The corresponding scheme of this lidar is presented in Fig. 1.

Table 1.

## Optical instruments used to investigate atmospheric parameters and processes

Instrument	Observed Item	Altitude	Mode
Photometer (Tiny Ionospheric Photometer)	The airglow lines of various gases in the atmosphere, such as OH, O <sub>2</sub> , O, O <sup>+</sup> , N, N <sub>2</sub> <sup>+</sup> , H, He, and others	Different altitudes of ionosphere	Horizontal distribution
Fabry-Perot Interferometer	Horizontal and vertical wind velocity, and temperature at airglow layers	Upper mesosphere, lower thermosphere (when quiet:85, 95, 250 km; when active:85, 120, 250 km)	Horizontal distribution, night (new moon phase)
Fourier transform infrared spectrometer	Trace constituents	Troposphere, lower stratosphere (10-30 km)	Vertical distribution, day
Rayleigh lidar	Winds, temperature	Stratosphere, lower mesosphere (30-80 km)	Vertical distribution, night
Multiwavelength lidar	Aerosol, cloud	Upper troposphere, lower stratosphere (5-40 km)	Vertical distribution, night
All-sky camera	Luminosity of airglow layer, atmospheric waves	Upper mesosphere, lower thermosphere (when quiet:85, 95, 250 km; when active:85,120, 250 km)	Horizontal distribution, night (new moon phase)
Aurora Web Camera	Aurora Live Image	Operates at different altitudes of ionosphere	Day and night

Temperature profiles observed by Rayleigh lidar and theoretical results obtained with CIRA-86 model are presented in Fig. 2.

*Resonance Fluorescence Lidars* (Alexandrite-laser based, and Dye-laser based) can measure various metallic species of the upper atmosphere and lower ionosphere between about 70 and 115km altitude. An *Alexandrite laser transmitter* can be set between 720 and 800nm with doubled frequency output between 360 and 400nm. It has a 3-W average power (with 0.5 MW at the power peak) operating at 770nm with operational frequency of 28 Hz and the pulse width of 200ns. A *Dye laser transmitter* is tunable between about 300nm and 800nm depending on the dye/solvent used, as well as on the sets of doubling and mixing crystals. It has 4W average power (with 20-MW peak power) operating at 589nm with a working frequency of 40 Hz and the pulse width of 5ns.

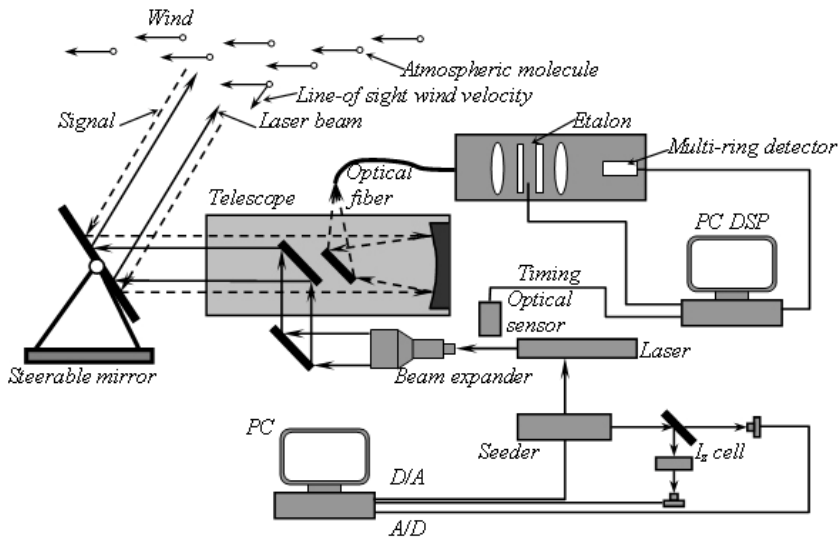


Fig. 1. Scheme of the Rayleigh-Doppler lidar.

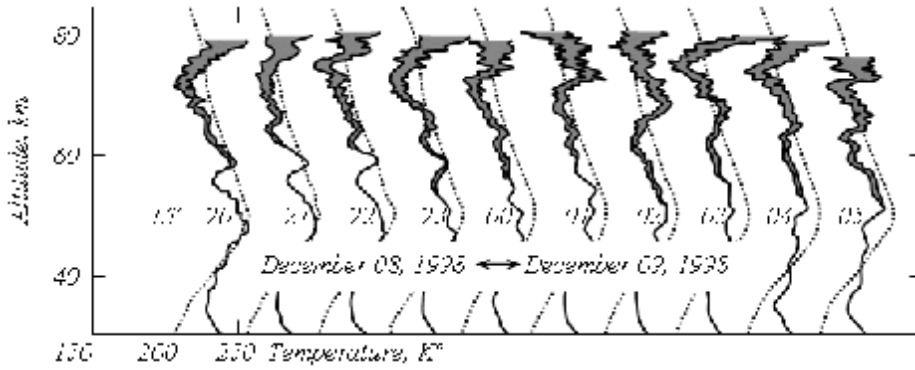


Fig. 2. Temperature profiles at Poker Flat (Average: 4 km).

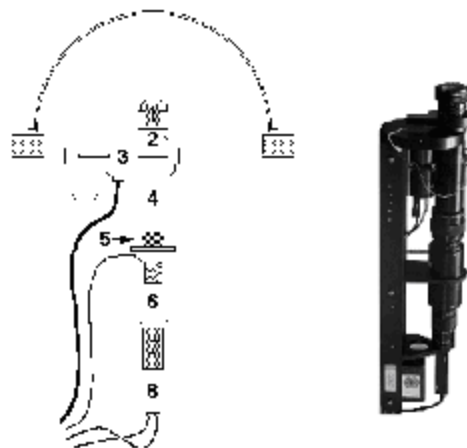


Fig. 3. The schematic diagram of all-sky camera: 1. mamiya all-sky lens; 2. telecentric collimating lens; 3. filter wheel assembly from Keo Consultants; 4. positive diopter lens and tube; 5. Canon 50-mm f/1.2 lens; 6. Varo image intensifier tube assembled with refocusing optics; 7. zoom lens; 8. Pulnix TM-745 CCD camera with NTSC video output.

Both lidar systems employ 80-cm diameter, point-able Cassagrain telescopes and gated photomultiplier tube detectors with low-altitude choppers. The results obtained by *Doppler Rayleigh Lidar* and *Resonance Fluorescence Lidar* are presented in [8–16].

Both lidar systems employ 80-cm diameter, point-able Cassagrain telescopes and gated photomultiplier tube detectors with low-altitude choppers. The results obtained by *Doppler Rayleigh Lidar* and *Resonance Fluorescence Lidar* are presented in [8–16].

Simultaneous imaging observations of several airglow layers are very important to study vertical propagation of atmospheric gravity waves, which is one of the main aspects in bubbles structures generation in the equatorial layer *F*.

Moreover, simultaneous observations of wind, temperature, and airglow images are needed to study the dynamics of short-period waves [17]. Figure 3 presents a schematic diagram showing one of the all-sky camera systems. The all-sky imagers that are used in the new Finnish all-sky cameras are manufactured by *KeoConsultants*. Each imager has telecentric and non-vignetting optics, and the field of view of the fish-eye lens is 180 degrees. The technical specifications of all-sky camera systems are presented in Table 2.

Table 2.

Technical specifications of all-sky camera systems

ITEM	DESCRIPTION
Fish-eye lens	Canon 15mm/F2.8
Additional optics	Telecentric lens elements
Filter wheel	7-position filter wheel for 2" filters
Filters	Interference filters, wavelengths 557.7nm, 427.8nm, and 630.0 nm (BW 2.0 nm)
Intensifier lens	Canon 85mm/F1.2
Image intensifier	Varo 25mm MCP Gen II Image Intensifier model 3603
Reimaging optics	Canon 100mm/F2
CCD camera lens	Fujinon 25mm/F0.85
CCD camera	Pulnix 765E, 756(H)x581(V)

The filter wheel can accommodate seven narrow bandwidth interference filters. In normal operation one filter holder is left "free" to be able to acquire nonfiltered images. Every station has three filters: green, blue, and red.

The faint images are intensified before the final image is acquired by the CCD camera (B&W) and digitised by the frame grabber card of the station computer. This intensification allows shorter exposure times with less expensive CCD cameras, and typically an exposure takes 500ms. Example of the auroral images, representing observations along a North-South meridian versus latitude and time periods are presented on Fig. 4a. This particular data example is taken from a test operation of the new Finnish digital *All - Sky Camera* operated at

Kiruna Observatory, Sweden. Figure 4b is an optical intensity map of the red auroral light at wavelength 630nm emitted by oxygen atoms.

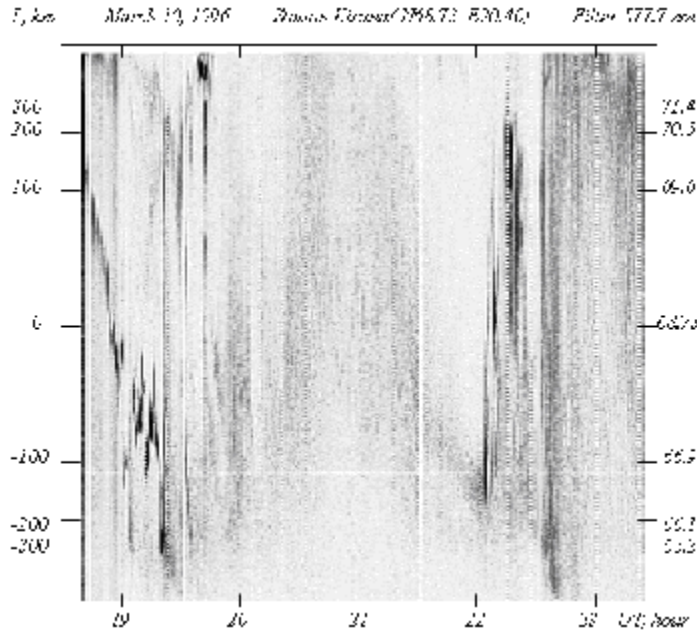


Fig. 4a. Example of an auroral Keogram, representing auroral observations along a north south meridian versus latitude and time (the scale is inverted, i.e. dark zones represent auroral emissions).

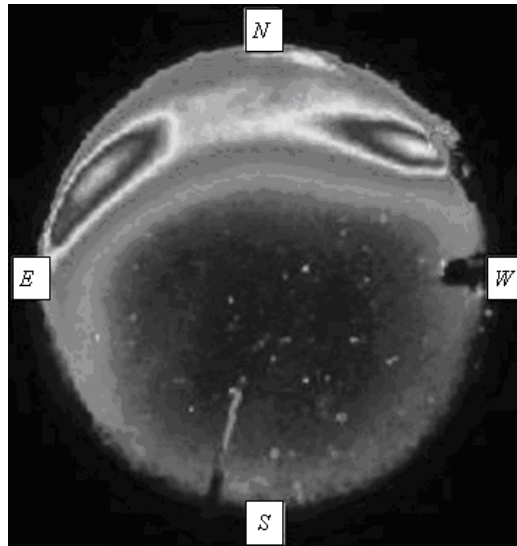


Fig. 4b. The false-colour intensity map of the red auroral light at wavelength 630 nm emitted by oxygen atoms.

### **Incoherent Scatter Radars**

For ionospheric remote sensing from the ground the most refined and most modern equipment at present time is probably the incoherent scatter radar.



*Incoherent Scatter Radar (ISR)* is a technique for detecting and studying remote targets by transmitting a radio wave in the direction of the target, observing the reflection of the wave and providing direct information about electron densities, line-of-sight (LOS) drift velocities, the height of ionospheric layers and ratio electron and ion temperatures,  $T_e/T_i$  [18-35]. They also provide indirect measurements of a number of additional parameters, the most reliable of which is the neutral wind below ionospheric altitudes of  $130\text{km}$ . The placements of incoherent scatter radars around the world are presented in Fig. 5.



Fig. 5. World incoherent scatter radars placements.

Initially, ISR systems were located at Arecibo and at Jicamarca. The Arecibo [18 - 20] and Jicamarca radars are both monostatic in nature (the transmitter and receiver are co-located).

The *Jicamarca Radio Observatory* was built in 1960-1961 by the Central Radio Propagation Laboratory of the National Bureau of Standards (see Fig. 6). The first incoherent scatter measurements at Jicamarca were made in 1961. The Jicamarca Radio Observatory is the premier scientific facility in the world for studying the equatorial ionosphere. The 49.92 MHz incoherent scatter radar is the principal facility of the Observatory. The radar antenna consists of a large square array of 18,432 half-wave dipoles arranged into 64 separate modules of  $12 \times 12$  crossed half-wave dipoles. Each linear polarization of each module can be separately phased, and the modules can be fed separately or connected in almost any desired fashion. The isolation between the linear polarizations is very good, at least 50 dB, which is important for certain measurements.

An additional antenna module with  $12 \times 12$  crossed dipoles was built in 1996. It is located 204m to the West of the West Corner of the main antenna and increases the lengths of the available interferometer base line to 564m.

There are three additional 50-MHz array antennas with steering up to  $\pm 70^\circ$  of zenith angles in the East-West direction only. Each consists of  $4 \times 2$  half-wave dipoles mounted a quarter wavelength above a ground screen.

The *JULIA Radar* shares the main antenna of the Jicamarca Radio Observatory. *JULIA* is the abbreviation which stands for Jicamarca Unattended Long-term investigations of the Ionosphere and Atmosphere. It has an independent PC-based data acquisition system and makes use of some of the exciter stages of the Jicamarca Radar along with the main antenna array. Since this system does not use the main high-power transmitters, it can operate for a long period of time. With a pair of 30-kW peak power pulsed transmitters driving a 290m x 290m modular antenna array, *JULIA* is a formidable MST/coherent scatter radar. It is uniquely suited for studying day-to-day and long-term variability of equatorial plasma irregularities and neutral atmospheric waves, which until now have only been investigated episodically or in campaign mode.



Fig. 6. Jicamarca Radio Observatory.

The *Jicamarca Radio Observatory* has the following measurement capabilities [21 - 23]:

- 1) From all existing ISR-type radars, the *Jicamarca Radar* gives the most accurate measurements of drift velocity and electric field in the equatorial ionosphere. This is because of its unique equatorial geometry. Pointing perpendicular to the magnetic field makes it possible to measure line-of-sight (LOS) drift velocities with accuracy of the order of 0.5 m/s. Vertical *F*-region plasma drifts measured with such an accuracy allows to obtain information about zonal (e.g., equatorial) electric field with accuracy of about 12  $\mu\text{V/m}$ . By studying the variation of drift velocity with altitude, up to 800-1000km (or perhaps even higher), it is possible to study the electrodynamics of the entire low-latitude ionosphere, up to the anomaly latitudes, because the electric field maps along the geomagnetic field lines.
- 2) The Jicamarca Radar also has a unique capability to probe the ionosphere up to very high altitudes. Because of the long radar wavelength, the incoherent scatter is not affected by problems of the Debye length at low electron

---

densities, and usable signals can be obtained from altitudes of 5000km and higher, giving densities and perhaps temperatures (but not drifts, since the beam cannot be simultaneously pointed perpendicular to **B**).

- 3) Absolute *F*-region measurements of electron density were performed by the Jicamarca Radar using Faraday rotation. Electron and ion temperatures and ion compositions were obtained with a double pulse technique that generates the signal auto-correlation function (ACF). Pulses are transmitted using orthogonal polarization to reduce clutter.
- 4) The Jicamarca Radar is the most sensitive radar in the world. Thus, it is capable of probing even the “gap” region near 45-50km, partly because of its long wavelength and partly because it has the largest power-aperture product compared with any other VHF radar.

The construction of the *Arecibo Radio Observatory* began in the summer of 1960. At present, the Arecibo Observatory has selected a data on ionospheric parameters, processes and phenomena over the 1966-2007 periods. We do not enter in detailed description of Arecibo Radio Observatory because of the wide spectrum of devices and systems arranged there. The reader can find all technical details in the corresponding literature [18-20].

The next generations of incoherent scatter radars (ISR) comprise some of the most advanced radar systems in the world. The best among these are the Millstone Hill and Sondre Strømfjord [27] radars in the American sector and the EISCAT radars (the European Incoherent SCATter Association) in Northern Scandinavia [24 – 26, 32, 33].

The *Millstone Hill Radar System* consists of two antennas of 25m and 68m radius, the operating frequencies for which are 1295 MHz and 440 MHz, respectively. The 68-m dish is fixed in the vertical direction, while the 25-m dish has full steerability in the azimuth and elevation domains. The peak powers are 3 MW for the 68-m dish and 4 MW for the 25-m dish.

Further, incoherent scatter radar, having a 27-m receiver dish and operating at a frequency of 1300 MHz, was developed at Stanford Research Institute, California, during the sixties. This radar, also a steerable monostatic pulsed facility like the smaller of the Millstone Hill system, was subsequently moved to Chatanika, Alaska, where it carried out some ground-breaking observations of the high-latitude ionosphere during the seventies [27- 30], before being moved again to Sondre Strømfjord, Greenland, where it is presently located.

The *EISCAT Radars*, located in Northern Scandinavia and on the Svalbard Archipelago, are currently at the leading edge of incoherent scatter system development. EISCAT is an international collaboration involving the research groups from France, Germany, Finland, Norway, Sweden, the United Kingdom and Japan (which joined this Association in 1996). EISCAT operates using three independent incoherent scatter radar systems: a tristatic UHF “mainland” system, with a transmit/receiver system located at Tromsø, Norway and receiver-only facilities located at Kiruna, Sweden and Sodankylä, Finland.

---

A new monostatic UHF radar (the EISCAT Svalbard Radar or ESR, [26]) is operated close to Longyearbyen, Svalbard. In addition, a monostatic VHF radar is located at Tromsø. All of these radars are pulsed systems, capable of a very wide range of different transmitter modulations and with the most advanced signal processing capabilities for any system of this kind. The mainland UHF system commenced operations in 1981, and the first results from the VHF were obtained in 1985, which is described in detail in Chapters 6 and 7. The EISCAT Svalbard Radar began operations on March 15 1996. The ESR is UHF radar operating at frequencies around 500 MHz with a 10 MHz bandwidth. The antenna is a Cassegrain-fed dish, similar to the dishes used by the mainland UHF radar system. All signal processing operations are performed digitally, so that much of the analogue hardware found for other types of ISR is not required for the ESR.

A *mainland UHF radar* system operates at frequencies close to 933 MHz, with sixteen different frequencies being available at 0.5 MHz intervals. The system comprises three fully steerable dishes of 32-m diameter. Transmission, reception and signal sampling are controlled with microsecond accuracy and a dedicated digital correlator exists to form ACFs.

A *VHF-radar* antenna is a cylindrical in the cross-section plane with the dimensions 120m x 40m. This antenna can only be moved in the elevation domain. Transmission and reception can also be carried out independently on the two halves of the antenna, allowing the VHF to provide a dual beam capability. The operating frequency of the VHF is 224 MHz, and the bandwidth availability is the same as in the *UHF-radar* (16 frequencies separated by 0.5 MHz).

The new system, known as EISCAT\_3D, will retain the unique and powerful multi-static configuration of the mainland EISCAT UHF-system. Phased-array technology will be employed throughout. The design goals include more precise temporal and spatial resolution of the observed data, an extension of the instantaneous measurements of full-vector ionospheric drift velocities from a single point to the entire altitude range of the radar, and built-in interferometric capabilities. For optimal performance in conditions of low-density plasma, and for the middle-latitude ionosphere, a frequency in the high VHF band (~240 MHz) will be used. The facility will provide high-quality ionospheric parameters measured in real time, as well as near-instantaneous response capabilities for researchers who need data to study unusual and unpredictable disturbances and phenomena occurring in high-and middle-latitude ionosphere. The geographic coordinates of incoherent scatter radars are given in Table 3.

To complete the survey of incoherent scatter radars currently operating around the world, we should mention the two systems in the former Soviet Union at Kharkov and Irkutsk, which are capable only of simple long pulse operation.

The long-term ISR observations provide an extremely valuable data about the ionosphere. The EISCAT Scientific Association, as an international research organisation operating with three geophysical research Incoherent Scatter Radar systems, with an Ionospheric Heater located in Northern Scandinavia, has a data basis for the 1997-2007 period. The EISCAT Tromsø Radar system collected data

during the period of 1984-2007, the St.Santin Radar system (France, 44.6N, 2.2E) during 1973-1986, the Millstone Hill Radar during 1970-2007, the Arecibo Radar during 1966-2007, the Shigaraki Middle and Upper atmosphere Radar (MU Radar, Japan, 34.8N, 136.1E) during 1986-2003 [27], and the Sondrestrom Radar during 1990-2007 [31-35].

Table 3.

Geographic coordinates of incoherent scatter radars

Station	Latitude	Longitude	Altitude (km)	Invariant latitude*	Country
ARECIBO	18.34500°	293.24700°	0.00000	32.17857°	Puerto Rico
EISCAT TROMSØRADAR	69.58300°	19.21000°	0.03000	66.40458°	Troms in Norway, Kiruna in Sweden and Sodankyl in Finland (Scandinavia)
SVALBARD RADAR (ESR)	78.09000°	16.02000°	0.43400	74.87426°	Scandinavia
IRKUTSK	52.17000°	104.45000°	0.45500	45.89960°	Russia
JICAMARCA	11.95000°	283.13000°	1.50000	13.90181°	Peru
KHARKOV	50.00000°	36.20000°	0.00000	45.75379°	Ukraine
MILLSTONE	42.61950°	288.50827°	0.14600	53.40967°	USA
MU	34.80000°	136.10000°	0.00000	24.51836°	Japan
SONDRE STROMFJORD	67.00000°	309.00000°	0.00000	73.17249°	Greenland

\* Calculations of the invariant latitude are unstable near the equator.

The scientific purpose of the measurements is to determine the radar operating modes. Different transmitted pulse schemes are used, depending on the need for range resolution, signal strength, time resolution, and frequency resolution. The rapid steering capability of the radar antenna allows to measure not just range, but also latitude and local time. Because of the many data-taking options, there are many ways to display data.

Finishing this paragraph, we present below only a few examples of the results obtained with Sondrestrom Radar (see also details on the website: <http://isr.sri.com/iono/issdata.html>).

Thus, Fig. 7 is a typical display of data from a 120° elevation scan in the plane of the magnetic meridian. The vertical axis shows altitude from ground level to 600km and the horizontal axis shows 1000km of ground range from the South (at the left of the image) to the North (at the right of the image). From left to right and

from top to bottom this figure shows color-shaped electron density, electron temperature, and ion temperature and ion velocity in LOS conditions.

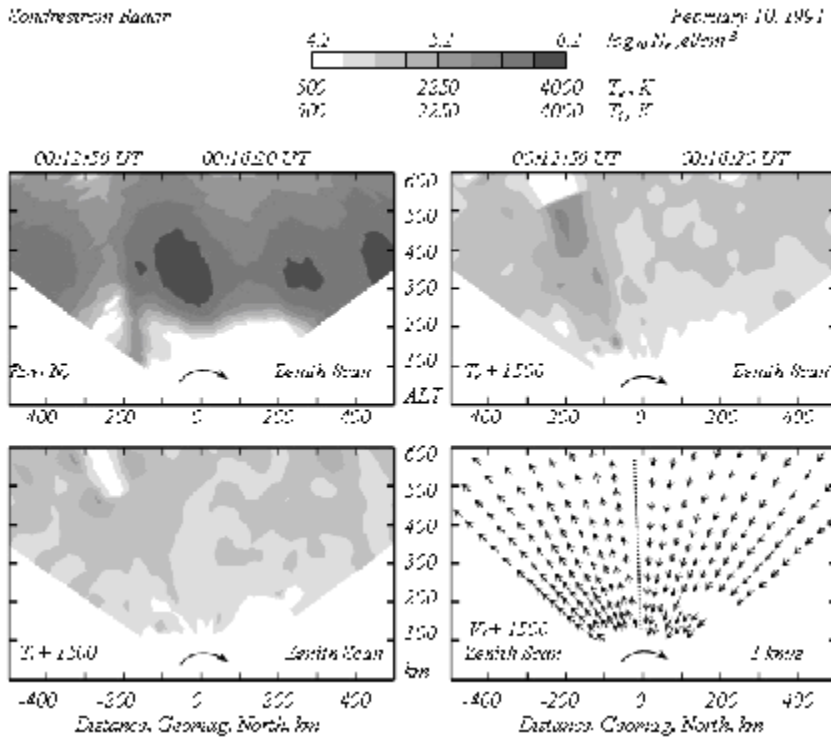


Fig. 7. Data from a 120° elevation scan in the plane of the magnetic meridian.

Figure 8 shows the radar data from a single 3-min integration with the antenna pointing parallel to the local magnetic field. Some of the basic parameters derived from radar records are electron density ( $N_e$ ), ion drift velocity ( $V_i$ ), and electron and ion temperatures ( $T_e$  and  $T_i$ ). All of these quantities are obtained as a function of distance along the radar beam. Because this experiment was studying the E-region (where plasma parameters vary relatively rapidly with position), the pulse pattern used has 3 km range resolution.

In Fig. 9, the variation of electron density is shown as a function of altitude and time for a two-hour period in March of 1992. Because of the large scale heights in the F-region, a 48-km pulse was used. This provided greater signal strength and higher time resolution.

The variations in electron density (Fig. 10a) and ion drift velocities (Fig. 10b) as a function of latitude and time for a fixed altitude (300km) over a 24-hour period of observations during May, 1996 demonstrate the steering capability of the antenna and show measurements as a function of latitude. The radar sits under a doughnut-shaped band of data at 74° invariant latitude. The data are displayed North and South of the radar as the site rotates with Earth.

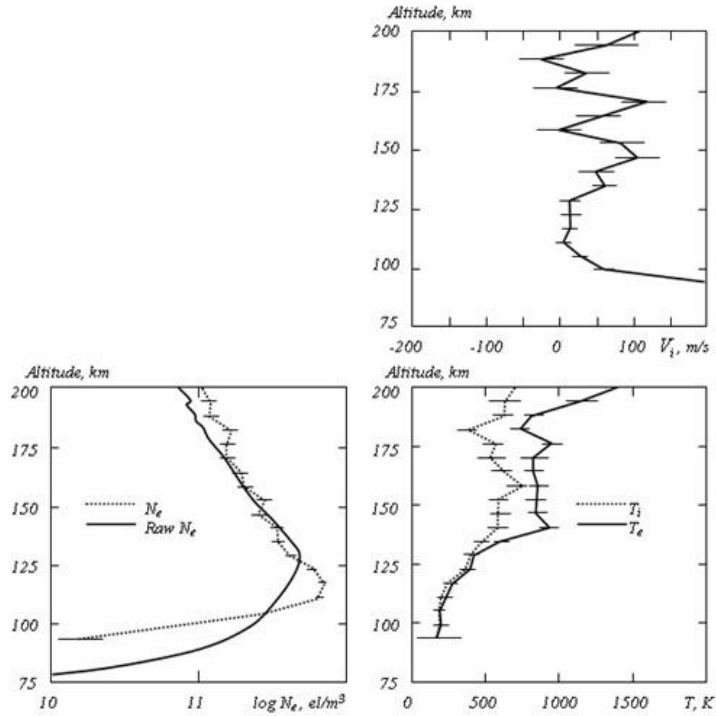


Fig. 8. The electron density ( $N_e$ ), ion velocity ( $V_i$ ), and electron and ion temperatures ( $T_e$  and  $T_i$ ) as a function of distance along the radar beam.

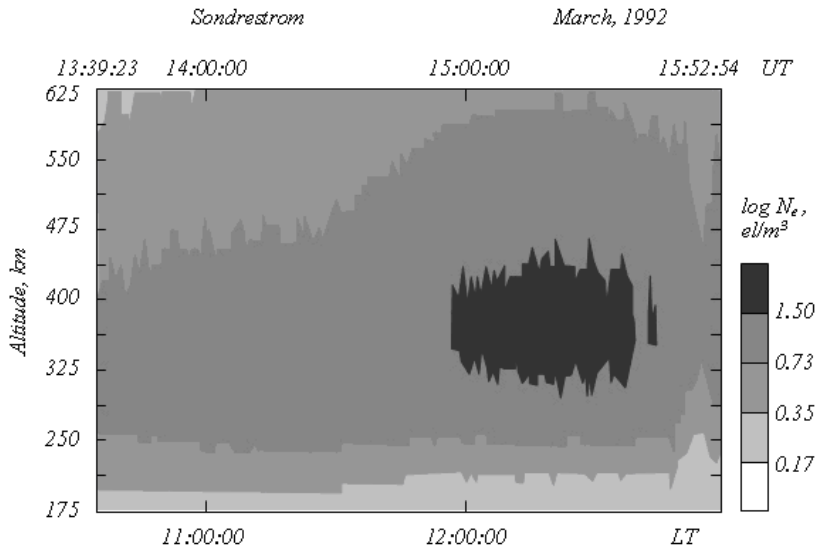


Fig. 9. The variation of electron density as a function of altitude and time for a two hour period in March of 1992.

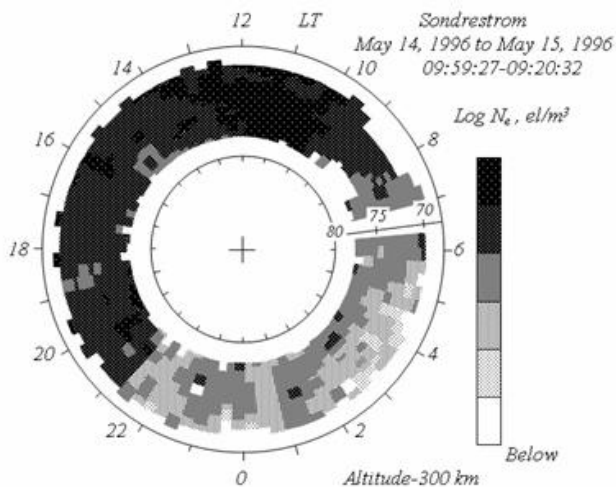


Fig. 10a. This clock dial plot displays the variations in electron density as a function of latitude and time for a fixed altitude (300 km) over a 24 hour period in May of 1996.

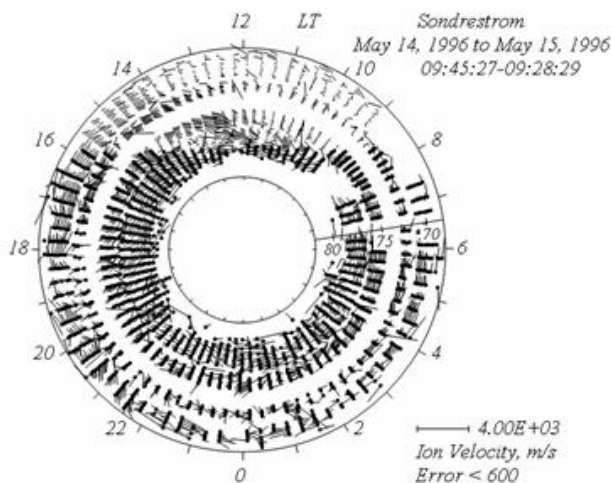


Fig. 10b. This figure displays ion drift velocities from the same time period as figure 10a.

### SuperDARN

The *SuperDARN* network (Super Dual Auroral Radar Network [36]) is an international system for the studying of the Earth's upper troposphere, ionosphere, and their connections with the magnetosphere and outer space surrounding the Earth, which currently consists of a set of radars in the northern and in the southern hemispheres (see Table 4 and Fig. 11).

The construction of all the radars is roughly identical, with some minor differences in antenna design to accommodate the physical conditions at the site (see Fig. 12). Each of the radars has two arrays of antenna towers, the primary array consists of sixteen towers, and the secondary, interferometer array, consists of four towers. A phasing matrix attached to the antenna array is used to form the beam and to electronically steer the radar into one of sixteen different beam



directions. The radar transmits a short sequence of pulses in the HF-band and samples the echo-signals arriving from the ionosphere.

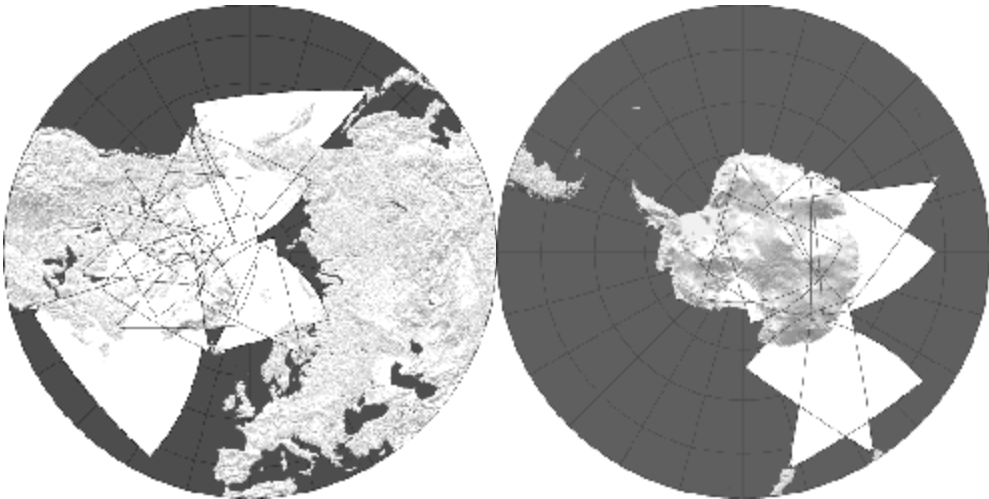


Fig. 11. Northern and Southern hemispheres of the SuperDARN international system.



Fig. 8.12. The Halley Bay station.

A sequence of pulses, referred to as a multi-pulse sequence, is carefully designed to allow the Doppler characteristics of different targets to be determined at multiple ranges by using the Auto-Correlation Function (ACF) of the received samples. Many sequences are transmitted and the calculated ACFs integrated over a period of several seconds to minimize the effect of noise. The final average ACF is then used to calculate back-scattered power, spectral width and Doppler velocity of the plasma density irregularities in non-regular ionosphere. In a standard operating mode, a multi-pulse sequence (of 7 pulses) is transmitted and sampled to resolve 75 ranges with a 45-km separation [37–42].

Table 4

## The SuperDARN network

Station	Geographic coordinates	AAGM magnetic	Status of work	Location	Principal investigator
1	2	3	4	5	6
NORTHERN HEMISPHERE					
Rankin Inlet	62.82° N, 93.11° W	72.96° N, 28.17° W	24 hr/day	Nanavut, CANADA	Institute of Space and Atmospheric Studies University of Saskatchewan, Saskatoon, CANADA
King Salmon	58.68° N, 156.65° W	57.43° N, 100.51° E	24 hr/day	Alaska, USA	Communications Research Laboratory, Tokyo, Japan
Kodiak	57.60° N, 152.2° W	57.17° N, 96.28° W	24 hr/day	Kodiak Island, Alaska, USA	Geophysical Institute University of Alaska Fairbanks, USA
Prince George	53.98° N, 122.59° W	59.88° N, 65.67° W	24 hr/day	British Columbia, CANADA	Institute of Space and Atmospheric Studies University of Saskatchewan, Saskatoon, CANADA
Saskatoon	52.16° N, 106.53° W	61.34° N, 45.26° W	24 hr/day	Saskatoon, CANADA	Institute of Space and Atmospheric Studies University of Saskatchewan, Saskatoon, CANADA
Kapuskasin	49.39° N, 82.32° W	60.06° N, 9.22° W	24 hr/day	Ontario, CANADA	Johns Hopkins Applied Physics Laboratory, Laurel, USA
Goose Bay	53.32° N, 60.46° W	61.94° N, 23.02° E	24 hr/day	Goose Bay, CANADA	Johns Hopkins Applied Physics Laboratory, Laurel, USA

1	2	3	4	5	6
Stokkseyri	63.86° N, 22.02° W	65.04° N, 67.33° E	24 hr/day	Stokkseyri, ICELAND	LPCE/CNRS Orleans, FRANCE
Þykkvibaer	63.86° N, 19.20° W	64.59° N, 69.65° E	24 hr/day	Þykkvibaer, ICELAND	Department of Physics, University of Leicester, ENGLAND
Hankasalmi	62.32° N, 26.61° E	59.78° N, 105.53° E	24 hr/day	Hankasalmi, FINLAND	Department of Physics, University of Leicester, ENGLAND
Wallops Island	37.93° N, 75.47° W	30.63° N, 75.52° E	24 hr/day	Wallops Island, Virginia, USA	Johns Hopkins Applied Physics Laboratory, Laurel, USA
Hokkaido	43.53° N, 143.61° E	38.14° N, 145.67° W	24 hr/day	Hokkaido, JAPAN	Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, JAPAN
<b>SOUTHERN HEMISPHERE</b>					
Halley	75.52° S, 26.63° W	61.68° S, 28.92° E	24 hr/day	Halley Station, Antarctica	British Antarctic Survey High Cross, Cambridge, ENGLAND
Sanae	71.68° S, 2.85° W	61.52° S, 43.18° E	Began Operation in February, 1997	Sanae, Antarctica	School of Physics, University of KwaZulu-Natal, Durban, SOUTH AFRICA
Syowa South	69.00° S, 39.58° E	55.25° S, 23.00° E	24 hr/day	Syowa, Antarctica	National Institute of Polar Research, Tokyo, JAPAN
Syowa East	69.01° S, 39.61° E	55.25° S, 22.98° E	24 hr/day	Syowa, Antarctica	National Institute of Polar Research, Tokyo, JAPAN
Kerguelen	49.35° S, 70.26° E	58.73° S, 122.14° E	24 hr/day	Kergeulen, Island	LPCE/CNRS, Orleans, FRANCE

1	2	3	4	5	6
Tiger	43.38° S, 147.23° E	55.31° S, 133.36° W	24 hr/day	Tasmania	Department of Physics, La Trobe University Bundoora, AUSTRALIA
Tiger Unwin	46.51° S, 168.38° E	55.15° S, 106.54° W	24 hr/day	Unwin, New Zealand	Department of Physics, La Trobe University Bundoora, AUSTRALIA

The operation of a Radar is controlled by the Radar Operating System (ROS), which is responsible for controlling the Radar hardware, data processing, and data analysis and storage. A "Radar Control Program" defines the overall mode of the radar, including the operating frequency, integration period, range separation and the beam pattern used.

By combining the LOS measurements from a number of radars, the *SuperDARN* system can produce a two dimensional (2-D) pattern of the ion drifts. The advantages of the system are: an increasingly good coverage in both hemispheres, although southern hemisphere coverage is less developed; direct, accurate measurement of an important coupling parameter; and the rapid temporal coverage. The greatest weakness of the system is that many of its problems are exacerbated during times of high geomagnetic activity (e.g., magnetic storms). Therefore, *SuperDARN* radars should be an important component of validation, but should be used in conjunction with other data sources.

### **The Global Positioning System in Investigations of the Ionosphere**

The Global Positioning System (GPS) is the autonomy functional Global Navigation Satellite System (GNSS). It consists of up to 24 medium Earth's orbit satellites in six different orbital planes, with the exact number of satellites varying as older satellites are retired and replaced. These satellites are travelling at speeds of roughly 7,000 miles an hour. Transmitter power is only 50W or less. Operational since 1978 and globally available since 1994, GPS is currently a most utilized satellite navigation system in the world.

Developed by the United States Department of Defense, it is officially named NAVSTAR GPS. GPS was originally intended for military applications, but then, from 1983, the system has become available for civilian use.

GPS has become a widely used aid to navigation worldwide, and a useful tool for map-making, land surveying, commerce, and scientific uses. GPS also provides

a precise time reference used in many applications including scientific study of earthquakes, and synchronization of telecommunications networks. A GPS receiver must be locked on to the signal of at least three satellites to calculate a 2-D position (latitude and longitude) and track any movements of subscribers. With four or more satellites in view, the receiver can determine the 3-D position of any subscriber (e.g., latitude, longitude and altitude). Once the user's position has been determined, the GPS unit can calculate other information, such as speed, bearing, tracking, trip distance, distance to destination, sunrise and sunset time and more.

GPS satellites transmit the following radio signals: military – 1227.6 MHz; civilian L1 – 1575.42 MHz; civilian L2 – 1227.60 MHz; nuclear burst detection L3 – 1381.05 MHz; telemetry on 2227.5 MHz (see details in [http://www.tbs-satellite.com/tse/online/prog\\_gps\\_freq.html](http://www.tbs-satellite.com/tse/online/prog_gps_freq.html)). Beginning from around 2008, civilians will have access to three GPS signals: L1 – 1575.42 MHz, L2 – 1227.60 MHz and L5 – 1176.45 MHz [43].

A GPS radio signal contains three different bits of information: a *pseudorandom code*, *ephemeris data* and *almanac data*. The *pseudorandom code* is simply a code that identifies which satellite transmits information.

*Ephemeris data* tells the GPS receiver where each GPS satellite should be at any time throughout the day. Each satellite transmits ephemeris data showing the orbital information for that satellite and for every other satellite in the system.

*Almanac data*, which is constantly transmitted by each satellite, contains important information about the status of the satellite (“healthy” or “unhealthy”), current date and time. This part of the signal is essential for determining a position. The main factors that can degrade the GPS signal and thus affect the accuracy of subscriber positioning include the following:

- ***Ionosphere and troposphere group delays*** due to effects of multipath occurring in the ionosphere. The GPS system uses a special algorithm that calculates an average amount of delay to partially correct for this type of error.
- ***Signal multipath*** fading [44] which increases the travel time of the signal, thereby causing errors.
- ***Receiver clock errors*** occur since a ground-based receiver's built-in clock is not as accurate as the atomic clocks onboard the GPS satellites. Therefore, it may have very slight timing errors.
- ***Orbital errors*** are also known as ephemeris errors; these are inaccuracies of the satellite's reported location.
- ***Number of satellites visible*** means that the more satellites a GPS receiver can “watch”, the better the accuracy. Some strong plasma irregularities may partly block signal reception, causing position errors or possibly no position reading at all. Moreover, ground-based obstructions (buildings, hills, sea, soil etc.) can fully block records from satellite. Therefore, GPS units typically do not work in indoor, underwater or underground environments. The same difficulties with recording of signals occur during such natural disasters, as magnetic storms.

- **Satellite geometry** is referred to the relative position of the satellites at any given time. Ideal satellite geometry exists when the satellites are located at wide angles relative to each other. Poor geometry results when the satellites are located in a line or in a tight grouping.

Typical GPS positioning accuracy was estimated as 15m [43, 44]. Typical GPS accuracy of user position is 3-5m and typical Wide Area Augmentation System (WAAS) position accuracy is less than 3m. Of course, these estimations are correct only in outdoor environments and for regular and non-disturbed ionospheric and atmospheric conditions. Existence of natural or man-made disturbances of the ionosphere decreases essentially the accuracy of subscriber positioning. Thus, the accuracy of the original GPS system, which was subject to accuracy degradation under the Selective Availability Program (USA), is 100m.

In other countries were developed similar satellite-based differential systems. In Asia, this is the Japanese Multi-Functional Satellite Augmentation System (MSAS), while Europe has the Euro Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS). Eventually, GPS users around the world will have access to precise position data using these and other compatible systems. The Russian GLONASS is a Global Navigation Satellite System in the process of being restored to full operation. The European Union's Galileo positioning system is a next generation of GNSS is in the initial deployment phase, scheduled to be operational in 2010. China has indicated it may expand its regional Beidou navigation system into a global system at the same time. India's IRNSS, a next generation GNSS is in developmental phase and is scheduled to be operational only around 2012.

GPS ionospheric sounding is a powerful tool for remote sensing of the ionosphere. GPS radio signals L1 and L2 have provided an unique opportunity to study: short scale length variations in Total Electron Content (TEC) along the signal path in the presence of ionospheric irregularities and scintillations caused by these irregularities (GPS based ionospheric measurement can measure TEC variations smaller than  $10^{-2}$  TEC units) [45, 46, 47]; isolated ionospheric disturbances [48]; simulation of the ionospheric disturbances caused by earthquakes, explosions, cyclones, and tsunamis [49, 50]; variations of atmospheric water vapour [51]; ground complex permittivity [52]; processors of horizontal and vertical crustal deformation [53]; influences of the ionosphere on satellite communications and satellite measurements; and so on.

In [45] was demonstrated the use of GPS in obtaining profiles of electron density and other geophysical variables such as temperature, pressure and water vapour in lower ionosphere. This work presents a set of ionospheric profiles obtained from GPS/MET with the Abel inversion technique. The effects of the ionosphere on the GPS signal during occultation, such as bending and scintillation, was also examined in [45]. Electron density profiles obtained from GPS/MET are compared with the ones obtained from the Parameterized Ionospheric Model (PIM) and with ionosonde and incoherent scatter radar measurements. Statistical comparisons of  $NmF2$  values obtained from GPS/MET and ionosondes indicate that these two types of measurements are obtained with accuracy of about 20%.

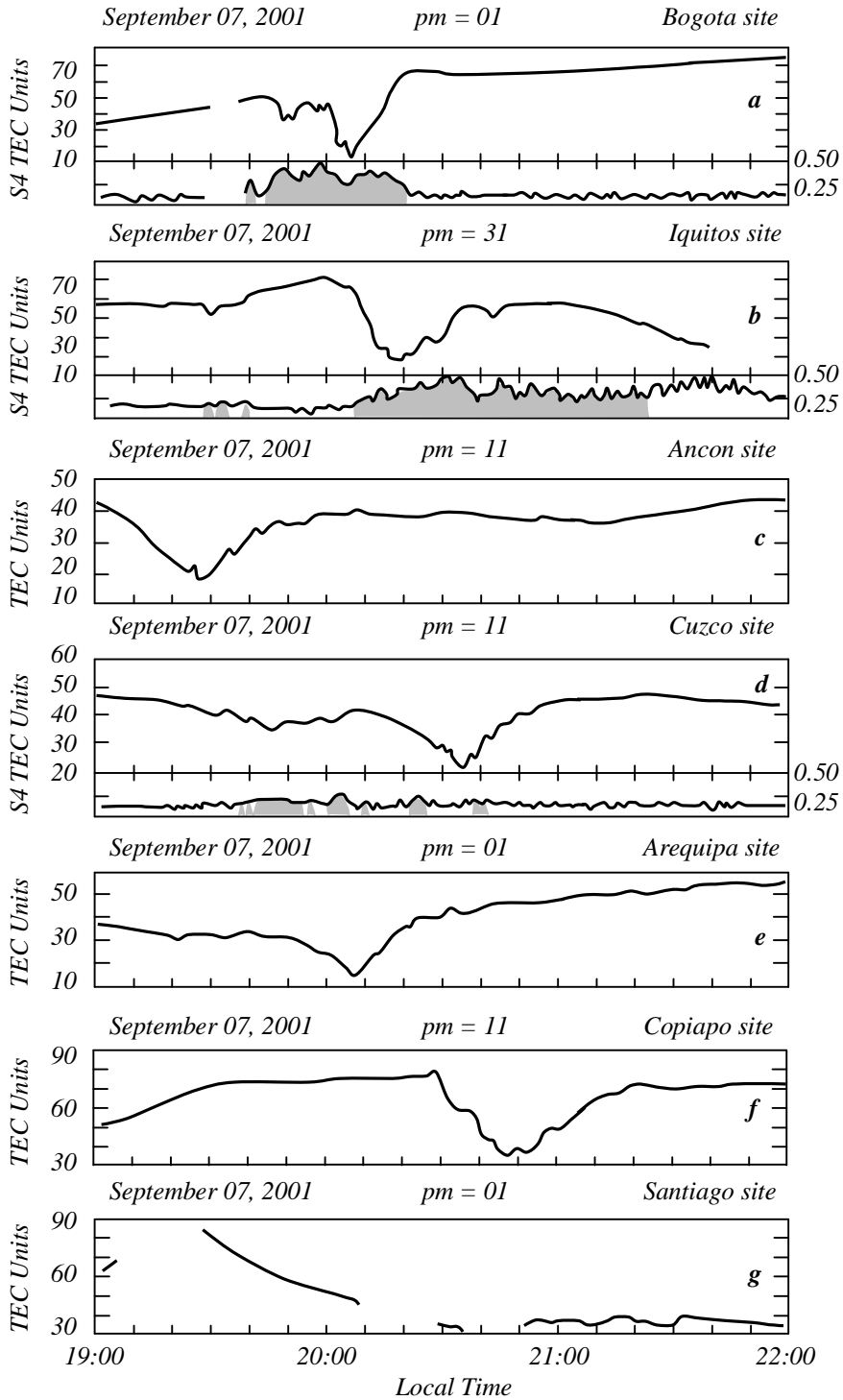


Fig. 13. Values of absolute TEC measured at several sites using signals from 3 GPS satellites. In all of this passes TEC depletions are evident, sometimes exceeding 50 TEC units ( $10^{16}$  el/m<sup>2</sup>). The additional sub-panel plotted below the Bogota, Iquitos and Cuzco TEC data corresponds to the S4 GPS scintillation index.

A latitudinal-distributed network of GPS receivers has been operating within Colombia, Peru and Chile with sufficient latitudinal separation for measuring of the absolute TEC at both crests of the equatorial anomaly is presented in [47]. The network also indicated the latitudinal extension of GPS scintillations and TEC depletions. I present here only a characteristic example of measurements carried out in [47].

Thus, Fig. 13 shows TEC depletions measured at several sites, using signals from three different GPS satellites. On September 07, 2001, TEC depletion was observed at all stations except Antuco station. In addition, the receiver at Santiago suffered a loss of signals caused by the strong fading which likely associated with TEC depletions. Figure 13a shows the passage of a TEC depletion, 35 TEC units ( $10^{16} \text{ el/m}^2$ ) in depth, detected by the receiver at Bogota between 20:00 and 20:20 LT. Below the TEC curve is displayed with the scintillation index (called S4-index), which was calculated on-line using the signal received from each of GPS satellites. The gray shadowing indicates the times when the S4-index is above the noise level when the satellite elevation is above  $20^\circ$ . The TEC depletion of Fig. 13a is accompanied by high levels of GPS scintillations ( $S4=0.5$ ) on both the East and West walls of the depletion.

Figure 13b illustrates the same TEC depletion that was detected at Bogota receiver at the time of 11 minutes earlier, but at Iquitos receiver, strong values of the scintillation index ( $S4=0.5$ ) were observed only on the West wall and weaker scintillations on the East side ( $S4=0.25$ ) of the depletion. Due to smaller angle of observation, the receiver at Iquitos receiver observed the same TEC depletion that was obtained at Bogota receiver with an apparent wider width. The authors of [47] used the transit time of TEC depletions between Ancon receiver and Cuzco receiver of about 65min, which were separated by 550km-range in the magnetic East-West direction. They also estimated a 140-m/s zonal drift.

Scintillations at Cuzco receiver (Fig. 13d) were of less intensity, due to a smaller density that commonly prevails near the magnetic equator when the anomaly is fully developed. At Arequipa receiver, the lowest value within the TEC depletion was observed at 20:08 UT. This is the same time that the minimum TEC was detected at Bogota receiver (see Fig. 13a), which is located 225km westward and several hundred kilometers northward from Arequipa receiver. This apparent discrepancy can be explained if we allow the bubbles to tilt westward at altitudes above the *F*-region peak. The westward tilt will make the part of the TEC depletions that extend to higher latitudes to appear at slightly later times in a way similar to the plasma plumes seen with coherent radars. The Copiapo receiver (Fig. 13f) detected a 30-TEC-unit depletion spanning between 20:30 and 21:10 LT.

### Developments of LFM Ionosondes in the Historical Perspective

In the recent decades in different regions of the world, active scientific studies of the ionospheric physics and ionospheric radio propagation were carried out based on local ground-based networks, called *LFM-ionosondes*, which started



intensively to be used also for selection of the optimal ionospheric radio channels. This relates to the fact that LFM ionosondes have advantages compared to pulse ionosondes, such as a high defence against noise and high electromagnetic compatibility (thus, the radiated power is only about 2W to 100W), as well as smaller dimensions of the facility.

Special signals with LFM were first used for the purpose of radiolocation [54] and then, in 1954, for the sounding of the ionosphere in regions with high absorption, about 80-90dB. Later, in 1962, such signals were used for investigation of *D*-layer of the ionosphere [55-57].

Theoretical aspects of radiation and recording of pulse LFM signals have found their application after creation of methods and approaches dealing with generation of LFM signals. The first tests showed immediately high efficiency of LFM ionosondes for vertical and oblique sounding of the ionosphere [61]. In [62] the experimental ionospheric sounding, vertical and/or oblique, was presented, using the frequency range from 600 kHz to 2 MHz. The equipment employs a linear frequency sweep transmission generated by direct synthesis from a frequency standard. An identical sweep is used for demodulation at the receiver. Sounding records were obtained at night-time periods along the 2000-*km* radio paths. Radiated power was ranged from 25W to 250W. A good time delay resolution together with suppression of interfering signals makes it possible for ionospheric sounding with a greatly improved quality of transmission of any information at large distances using low energy of the transmitting signals.

For applied studies, during 1960s special systems were performed, operating at the continuous LFM signals [63]. The study of the ionosphere with these systems allowed to obtain a set of original results described in [64, 65]. Further, great success in creation of LFM ionosondes was achieved by "Barry Research" Company (USA), the typical models of ionosondes of which for vertical sounding (VS) and oblique sounding (OS) of the ionosphere, VOS-1 [66], RCS-2 [67], and RCS-4 [68], allowed to obtain ionograms of high quality using very low radiation power, of about 5-10W only. At present, this company has begun to produce LFM transivers XCS-6 and TST 4280.

During the period from 1980 to 2000, in different regions of the world the high-effective systems were realized for investigation of the ionosphere, as well as developments of new methods of diagnostics of short-wave ionospheric radio channels, including prediction of the working frequencies (called *maximum useful frequencies*, MUF) of radio communication links and also service of short-wave over-horizon radars [57]. Modification of the standard LFM ionosonde of "Barry Research" Company (see [71, 72]) by introducing multi-channel record with digital registration and signal processing, allows to create a monostatic ionosonde of vertical sounding with registration of arriving angles, with estimation of polarization and Doppler speed of displacement points of wave reflection.

A bistatic LFM ionosonde was constructed in England to study dispersion distortions of wideband signals at the short-length radio traces [73, 74]. A set of experiments at the one-hop traces in the polar and equatorial ionosphere was

carried out to investigate the effects of ionospheric irregularities on radio scattering phenomena [75].

“TCI/BR Communications” corporation has carried out a global experiment using 16 LFM ionosondes to provide and secure radio communication at the short-frequency band. They used data obtained from 30 radio traces of oblique sounding [76]. The same European project was made at two radio traces using ionosondes of the company “BR Communications” [77, 78].

For the study of “thin” ionospheric effects in the propagation of short-wave radio signals, the research groups “Defense Evaluation” and “Research Agency” (DERA, UK) created a high-quality ionosonde for oblique sounding, called Improved Radio Ionospheric Sounder (IRIS) [79, 80]. In 1992, at South-West Research Institute (San Antonio, USA) a small multi-channel interferometer was developed on the basis of an LFM ionosonde for measurements of group delay and angles-of-arrival in the azimuthal and elevation local planes [81]. Over-horizon radars of short-wave frequency band also used LFM signals for ionospheric diagnostics and to testing the accuracy of ionospheric models, as well as conditions of the ocean surface and ocean flows [82–85].

Australian Defence Science and Technology Organisation created in Australia a wide net of ionosondes of oblique sounding to investigate the low-latitude ionosphere and to ensure a stable operation of an over-horizon short-wave radio locator [86-88]. A net of LFM-ionosondes of the IPS-71 type, produced by the Australian company “KEL Aerospace Pty Ltd”, situated on the territory of Australia, includes ionosondes for vertical and oblique sounding of the ionosphere. Such ionosondes have the velocity of frequency changes of  $500 \text{ kHz/s}$ . Studies of the peculiarities of the low-latitude ionosphere above the Asian-Pacific-Ocean region [88] are carried out using LFM ionosondes developed by Australian Defense Science and Technology Organization (DSTO).

In [87], the technique that uses for the measurements of the time-varying narrowband (10 kHz) component-transfer function of a high-frequency (HF) frequency-modulated (FM) continuous wave, transmitted at 15.085 MHz, and its decomposition into propagation modes, is presented. One event occurring at a 5244-km transmission path, which exhibits flat fading within the 10-kHz bandwidth, is analyzed and found to exhibit severe phase distortion due to multipath. A component-transfer function for an individual propagation mode was also obtained in [87] using two-dimensional filtering of the signal in the joint Doppler frequency (DF) and time delay (TD) domain, resulting in a significant reduction in phase distortion.

In former USSR, was first constructed an ionosonde for vertical sounding (VS) of the ionosphere which used quasi-continuous FM signals [57, 89]. Then, ionosondes for VS of the ionosphere were created on the basis of synteza-tors of continuous LFM signals and their different modifications for VS and OS of the ionosphere [90-96]. With their help, the studies of frequency effects of modification of the ionosphere with powerful short-wave signals were made, as well as long-term investigations of the conditions of propagation of continuous

LFM signals at radio traces of various orientations and lengths [97-100]. Now in Russia an experimental net of LFM ionosondes is operated for oblique sounding (OS) of the ionosphere, the software-hardware methodology of which was developed by several groups [57, 98-100] including a group working at Moldavian Radio Observatory [99, 100].

To secure a stable communication at the short-wave band between countries of NATO, a global net of LFM ionosondes over the world was arranged based on the system AN/TRQ-35(V) (Tactical Frequency Sounding System), which includes 77 transmitters [57]. The AN/TRQ-35(V) is an ionospheric sounding system that easily operates with ionospheric propagation statistics on real-time basis. The system is used to minimize outages related to unpredictable changes of ionospheric characteristics and conditions. It is intended to improve frequency management and assignments of frequencies for HF communications systems, and finally, results in more effective and efficient utilization of the HF spectrum, producing more reliable HF communication with improved grade of service.

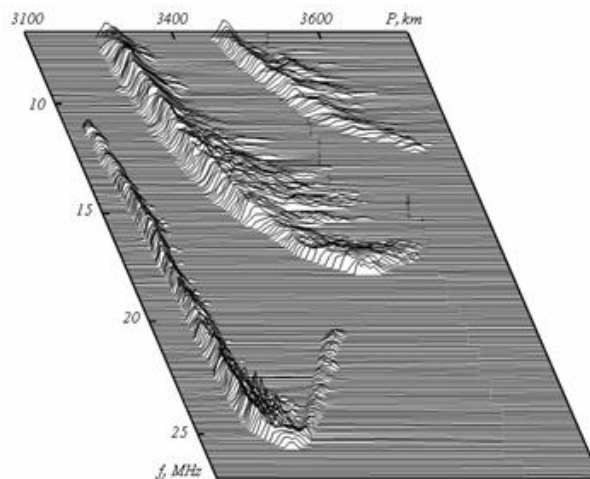


Fig. 14. The experimental amplitude spectrum obtained on the trace Ioscar-Ola-Balti.

Depending on the method of utilization of LFM ionosondes, it is possible to divide them into LFM ionosondes of vertical sounding (VS), oblique sounding (OS) and back-oblique sounding (BOS) [57]. Ionosondes of VS are used mostly to monitor the ionosphere above the local place of the ground-based diagnostic system, as well as to study physical processes occurring during natural and artificial perturbations of the ionosphere [101]. The ionosondes of OS are used mostly to study the ionosphere along the trace of short-wave radio propagation under various geographic conditions in adaptive communication systems and to secure frequency during selection of the optimal radio channel [82, 101, 104]. Ionosondes of BOS are used to study propagation conditions in the ionosphere [83–85] and to investigate conditions of sea surface in the large spatial regions, as well as in the systems of frequencies securing in short-wave radio communication channels and over-horizon short-wave radars [86].

As an illustration, in Fig. 14 the experimental amplitude spectrum  $|S_k(t)|$  is presented during sounding on the trace Ioscar-Ola-Balti on December 10, 1991. The group path  $P=ct$  is arranged along the axis of delays. The registered signals correspond to bottom and top rays of one-, two- and three-hop modes of propagation. The graphical imaging of the cross-section of  $|S_k(W)|=|S_k(t)|$  at the given level presents an actual ionogram of oblique sounding. The dependence  $|S_k(t)|$  at the time  $t_k$  presents the amplitude relief of the signal at the current frequency  $f_k$  for all the registered modes of propagation.

### Conclusion

The parameters and dynamical processes occurring in the non-regular ionosphere are possible to investigate using modern radiophysical methods based on different devices and radio systems, such as optical devices, incoherent scatter radars, Global Navigation Satellite Systems, superDARN, ionosondes, and digisondes.

1. Optical devices, such as photometric and spectrometric devices, digital All - Sky cameras, and TV complexes are used to investigate the atmospheric and ionospheric parameters and processes separately or with radar systems and ionosondes, operating regularly in many places over the world, such as Alaska, Arecibo, Arequipa, Fairbanks, New Zealand, Peru and Puerto Rico, Russia, the North and South Pole.
2. Photometers, combined with a set of optical filters, are used to measure the intensities of airglow emissions of the visible and near-infrared part of the optical spectrum of various gases in the atmosphere, such as OH, O<sub>2</sub>, O, O<sup>+</sup>, N, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, H, He, and Na.
3. Spectrometers are used to measure spectral blends of airglow emission bands at medium to high spectral resolution. For example, the Ebert-Fastie Spectrophotometer arranged at AISRS has the following parameters: one-meter focal length with a bandwidth varied between 0.02 nm to 1.0 nm. A programmable wavelength scanning takes place via stepping motors with maximum scan range limited to 100nm (anywhere between roughly 300nm and 900 nm) with variable field-of-view, which varies between 0.1° and 9.0°.
4. Interferometers are generally used to measure Doppler temperature and winds that originate in the E- and F-regions of the ionosphere, or to measure the spectral distribution and temporal variation of the hydrogen geocorona [5–7]. Fabry-Perot Interferometers at AISRS have the following parameters: each interferometer is with 1.2-meter focal length and 0.15-meter clear apertures with typical bandwidth of 0.001nm and free spectral range of 0.01nm. The wavelength change takes place via pressure scanning using pistons and choice of scanning gas of Ar, CO<sub>2</sub>, or SF<sub>6</sub>. The field-of-view depends on the choice of aperture size, but it is typically 0.25° for 630nm observations.
5. The Doppler Rayleigh Lidar is used to measure the Doppler shifts and widths of the spectrum of the laser light that is broadened and backscattered from the

---

atmosphere and lower ionosphere from about 15 to 70-80 km of altitude. The Doppler Rayleigh Lidar, for example, has the following parameters: Nd/YAG-based laser transmitter with the 24-W average power (with 100 MW in its peak) operating at 532 nm and at frequency of 40 Hz with the pulse width of 6ns.

6. The all-sky camera systems are used to simultaneous imaging observations of several airglow layers. These are very important to study vertical propagation of atmospheric gravity waves, which is one of the main aspects in bubbles structures generation in the equatorial layer *F*.
7. Incoherent Scatter Radar is a technique for detecting and studying remote targets by transmitting a radio wave in the direction of the target, observing the reflection of the wave and providing the direct information about electron densities, line-of-sight drift velocities, the height of ionospheric layers and ratio electron and ion temperatures,  $T_e/T_i$ . They also provide indirect measurements of a number of additional parameters, the most reliable of which is the neutral wind below ionospheric altitudes of 130km.
8. The Super Dual Auroral Radar Network is an international system for the studying of the Earth's upper troposphere, ionosphere, and their connections with the magnetosphere and outer space surrounding the Earth, which currently consists of a set of radars in the northern and in the southern hemispheres.
9. GPS has become a widely used aid to navigation worldwide, and a useful tool for map-making, land surveying, commerce, and scientific uses. GPS also provides a precise time reference used in many applications including scientific study of earthquakes, and synchronization of telecommunications networks.
10. The GPS radio signals L1– 1575.42 MHz and L2– 1227.60 MHz have provided an unique opportunity to study the next ionospheric parameters and phenomena's: short scale length variations in Total Electron Content along the signal path in the presence of ionospheric irregularities and scintillations caused by these irregularities (GPS based ionospheric measurement can measure Total Electron Content variations smaller than  $10^{-2}$  TEC units); isolated ionospheric disturbances; simulation of the ionospheric disturbances caused by earthquakes, explosions, cyclones, and tsunamis; variations of atmospheric water vapour; ground complex permittivity; processors of horizontal and vertical crustal deformation; influences of the ionosphere on satellite communications and satellite measurements.
11. In different regions of the world, active scientific studies of the ionospheric physics and ionospheric radio propagation were carried out based on local ground-based networks, called LFM-ionosondes, which started intensively to be used also for selection of the optimal ionospheric radio channels. LFM ionosondes have advantages compared to pulse ionosondes, such as a high defence against noise and high electromagnetic compatibility (thus, the

radiated power is only about 2W to 100W), as well as smaller dimensions of the facility.

12. It is possible to divide LFM ionosondes into LFM ionosondes of vertical sounding, oblique sounding and back-oblique sounding. Ionosondes of vertical sounding are used mostly to monitor the ionosphere above the local place of the ground-based diagnostic system, as well as to study physical processes occurring during natural and artificial perturbations of the ionosphere. The ionosondes of oblique sounding are used mostly to study the ionosphere along the traces of short-wave radio propagation under various geographic conditions in adaptive communication systems and to secure frequency during selection of the optimal radio channel. Ionosondes of back-oblique sounding are used to study propagation conditions in the ionosphere and to investigate conditions of sea surface in large spatial regions, as well as in the systems of frequencies securing in short-wave radio communication channels and over-horizon short-wave radars.

### Bibliography

1. Mende, S. B., R. H. Eather, M. H. Rees, R. R. Vondrak, and R. M. Robinson, *Optical mapping of ionospheric conductance*, J. Geophys. Res., vol. 89, 1984, pp. 1755-1763.
2. Robinson, R. M., S. B. Mende, R. R. Vondrak, J. U. Kozyra, and A. F. Nagy, *Radar and photometric measurements of an intense type a red Aurora*, J. Geophys. Res., vol. 90, 1985, pp. 457-466.
3. Bird, J. C., G. G. Shepherd, and C. A. Tepley, *Comparison of lower thermospheric winds measured by a polarizing Michelson interferometer and a Fabry-Perot spectrometer during the AIDA campaign*, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 55, 1993, pp. 313-324.
4. Feldman, P. D., D. J. Sahnou, J. W. Kruk, E. M. Murphy, and H. W. Moos, *High resolution FUV spectroscopy of the terrestrial day airglow with the far ultraviolet spectroscopic explorer*, J. Geophys. Res., vol. 106, 2001, pp. 8119-8130.
5. Wickwar, V. B., J. W. Meriwether, P. B. Hays, and A. F. Nagy, *The meridional thermospheric neutral wind measured by radar and optical techniques in the auroral region*, J. Geophys. Res., vol. 89, 1984, pp. 10, 987-10, 998.
6. Burnside, R. G., and C. A. Tepley, *Optical observations of thermospheric neutral winds at Arecibo between 1980 and 1987*, J. Geophys. Res., vol. 94, 1989, pp. 2, 711-2, 716.
7. Kerr, R. B., R. P. Cageao, C. A. Tepley, S. K. Atreya, and T. M. Donahue, *High spectral resolution Fabry-Perot interferometer measurements of Comet Halley at H-alpha and 6300 Å*, Adv. Space Res., vol. 5, 1986, pp. 283-287.
8. Tepley, C. A., S. I. Sargoytchev, and C. O. Hines, *Initial Doppler Rayleigh lidar results from Arecibo*, Geophys. Res. Lett., vol. 18, 1991, pp. 167-170.

9. Tepley, C. A., *Neutral winds of the middle atmosphere observed at Arecibo using a Doppler Rayleigh lidar*, J. Geophys. Res., vol. 99, 1994, pp. 25,781-25,790.
10. Beatty, T. J., R. L. Collins, C. S. Gardner, et al., *Simultaneous radar and lidar observations of sporadic E and Na layers at Arecibo*, Geophys. Res. Lett., vol. 16, 1989, pp. 1,019-1,022.
11. Friedman, J. S., C. A. Tepley, P. A. Castleberg, and H. Roe, *Middle-atmospheric Doppler lidar using an iodine-vapor edge filter*, Optics Letters, vol. 22, 1997, pp. 1,648-1,650.
12. Friedman, J. S., C. A. Tepley, S. Raizada, et al., *Potassium Doppler-resonance lidar for the study of the mesosphere and lower thermosphere at the Arecibo Observatory*, J. Atmos. Solar Terr. Phys., vol. 65, 2003, pp. 1411-1424.
13. Grime, B. W., T. J. Kane, S. C. Collins, M. C. Kelley, et al., *Meteor trail advection and dispersion: Preliminary lidar observations*, Geophys. Res. Lett., vol. 26, 1999, pp. 675-678.
14. Hecht, J. H., T. J. Kane, R. L. Walterscheid, C. S. Gardner, and C. A. Tepley, *Simultaneous nightglow and Na lidar observations at Arecibo during the AIDA-89 campaign*, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 55, 1993, pp. 409-423.
15. Kane, T. J., C. S. Gardner, Q. Zhou, J. D. Mathews, and C. A. Tepley, *Lidar, radar and airglow observations of a prominent sporadic Na / sporadic E layer event at Arecibo during AIDA-89*, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 55, 1993, pp. 499-511.
16. Raizada, S., C. A. Tepley, D. Janches, et al., *Lidar observations of Ca and K metallic layers from Arecibo and comparison with micrometeor sporadic activity*, J. Atmos. Solar Terr. Phys., vol. 66, 2004, pp. 595-606.
17. Shiokawa, K., Y. Katoh, M. Satoh, et al., *Development of optical mesosphere thermosphere images (OMTI)*, Earth Planets Space, vol. 51, 1996, pp. 887-896.
18. Zhou, Q., J., and Y. T. Morton, *A case study of mesospheric gravity wave momentum flux and dynamical instability using the Arecibo dual beam incoherent scatter radar*, Geophys. Res. Lett., vol. 33(10), doi:10.1029/2005GL025608, 2006.
19. Wen, C. H., J. F. Doherty, J. D. Mathews, and D. Janches, *Meteor detection and non-periodic bursty interference removal for Arecibo data*, J. Atmos. Solar Terr. Phys., vol. 67, 2005, pp. 275-281.
20. Luan, X., L. Liu, W. Wan, et al., *A study of the shape of topside electron density profile derived from incoherent scatter radar measurements over Arecibo and Millstone Hill*, Radio Sci., vol. 41(4), doi:10.1029/2005RS003367, 2006.
21. Hysell, D. L., *Incoherent scatter experiments at Jicamarca using alternating codes*, Radio Sci., vol. 35, 2000, pp. 1425-1435.

22. Woodman, R. F., and J. L. Chau, *Equatorial quasiperiodic echoes from field-aligned irregularities observed over Jicamarca*, Geophys. Res. Lett., 28, 2001, pp. 207-209.
23. Hysell, D.L.; and J. D. Burcham, *Long term studies of equatorial spread F using the JULIA radar at Jicamarca*. J. Atmos. Solar-Terr. Phys., vol. 64, 2002, pp. 1531-1543.
24. Caudal, G., O. de la Beaujardière, D. Alcaydé, J. Holt, and G. Lejeune, *Simultaneous measurements of the electrodynamic parameters of the auroral ionosphere by the EISCAT, Chatanika, and Millstone Hill Radars*, Ann. Geophys., vol. 2, 1984, pp. 369-376.
25. Lockwood, M., I. W. McCrea, G. H. Millward, R. J. Moffett and H. Rishbeth, *EISCAT observations of ion composition and temperature anisotropy in the high-latitude F-region*, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 55, 1993, pp. 895-906.
26. McCrae, I. W., M. Lockwood, J. Moen, et al., *ESR and EISCAT observations of the response of the cusp and cleft to IMF orientation changes*, Annales Geophysicae, vol. 18, 2000, pp. 1009-1026.
27. Zhang, S.-R., J. M. Holt, D. K. Bilitza, et al., *Multiple-site comparisons between models on incoherent scatter radar and IRI*, Adv. Space Res., vol. 39, 2007, pp. 910-915.
28. Lathuillere, C., V. B. Wickwar, and W. Kofman, *Incoherent scatter measurements of ion neutral collision frequencies and temperatures in the lower thermosphere of the auroral region*, J. Geophys. Res., vol. 88, 1983, pp. 10,137-10,144.
29. Robinson, R. M., F. Rich, and R. R. Vondrak, *Chatanika radar and S32 measurements of auroral zone electrodynamic in the didnight sector*, J. Geophys. Res., vol. 90, 1985, pp. 8487-8499.
30. Rasmussen, C. E., R. W. Schunk, J. J. Sojka, et al., *Comparison of simultaneous Chatanika and Millstone Hill observations with ionospheric model predictions*, J. Geophys. Res., vol. 91, 1986, pp. 6986-6998.
31. Hecht, J. H., R. L. Walterscheid, G. G. Sivjee, A. B. Christensen, and J. B. Pranke, *Observations of wave driven fluctuations of OH nightglow emission from Sondre Stromfjord, Greenland*, J. Geophys. Res., vol. 92, 1987, pp. 6091-6099.
32. Robinson, R. M., C. R. Clauer, O. de la Beaujardière, et al., *Sondrestrom and EISCAT radar observations of polewardmoving auroral forms*, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 52, 1990, pp. 411-420.
33. Johnson, R. M., and T. S. Virdi, *High latitude lower thermospheric neutral winds at EISCAT and Sondrestrom During LTCS 1*, J. Geophys. Res., vol. 96, 1991, pp. 1099-1116.
34. Kelly, J. D., C. J. Heinselman, J. F. Vickrey, and R. R. Vondrak, *The sondrestrom radar and accompanying ground-based instrumentation*, Space Science Reviews, vol. 71, 1995, pp. 797-813.



35. Bristow, W. A., and B. J. Watkins, *Incoherent scatter observations of thin ionization layers at sondrestrom*, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 55, 1993, pp. 873-894.
36. Sofko, G. J., A. V. Koustov, K. McWilliams, et al., *The super dual auroral radar network (SuperDARN): An international system for space weather determination*, Physics in Canada, vol. 54, 1998, pp. 6-23.
37. Oksavik, K., R. A. Greenwald, J. M. Ruohoniemi, et al., *First observations of the temporal/spatial variation of the sub-auroral polarization stream from the SuperDARN wallops HF radar*, Geophys. Res. Lett., 33, L12104, doi:10.1029/2006GL026256, 2006.
38. Ponomarenko, P. V., F. W. Menk, C. L. Waters, and M. D. Sciffer, *Pc3–4 ULF waves observed by the SuperDARN TIGER radar*, Annales Geophysicae, vol. 23, 2005, pp. 1271–1280, SRef-ID: 1432-0576/ag/2005-23-1271.
39. Pinnock, M and A. S. Rodger, *On determining the noon polar cap boundary from the SuperDARN HF radar backscatter characteristics*, Annales Geophysicae, vol. 18, 2001, pp. 1523-1530.
40. Bristow, W. A., and D. Lummerzheim, *Determination of field-aligned currents using the Super Dual Auroral Radar Network and the UVI ultraviolet imager*, J. Geophys. Res, vol. 106, 2001, pp. 18,577-18,588.
41. Ponomarenko, P. V., and C. L. Waters, *The role of Pc1-2 waves in spectral broadening of SuperDARN echoes from high latitudes*, Geophys. Res. Lett., vol. 30, 2003, pp. 1122-1125.
42. Provan, G., T. K. Yeoman, S. E. Milan, J. M. Ruohoniemi, and R. Barnes, *An assessment of the “map-potential” and “beam-swinging” techniques for measuring the ionospheric convection pattern using data from the SuperDARN radars*, Ann. Geophys, vol. 20, 2002, pp. 191-202.
43. Van Dierendonck, A. J., *Signal specification for the future GPS civil signal at L5*, Proc. of ION Annual Meeting 2000, San Diego, CA, June 26-28, 2000.
44. Shallberg, K., P. Shloss, E. Altashuler, L. Tahmazyan, *WAAS measurement processing, reducing the effects of multipath*, Proc. of ION Annual Meeting 2001, Salt Lake City, UT, September 11-14, 2001.
45. Hajj, G. A., and L. J. Romans, *Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment*, Radio Sci., vol. 33, 1998, pp. 175-190.
46. Barrile, V., M. Cacciola, F. C. Morabito, and M. Versaci, *TEC measurements through GPS and artificial intelligence*, J. Electromag. Waves Appl. Vol. 20, 2006, pp. 1211-1220.
47. Valladares, C. E., J. Villalobos, R. Sheehan, and M. P. Hagan, *Latitudinal extension of low-latitude scintillations measured with a network of GPS receivers*, Annales Gheophysical, vol. 22, 2004, pp. 3155-3175.
48. Afraimovich, E. L., E. I. Astafieva, and S. V. Voyeikov, *Isolated ionospheric disturbances as deduced from global GPS network*, Ann. Geophys. vol. 22, 2004, pp. 47-62.

49. Akhmedov, R. R., and V. E. Kunitsyn, *Simulation of the ionospheric disturbances caused by earthquakes and explosions*, Geomagn. Aeronomy, vol. 44, 2004, pp. 95-101.
50. Kuo, Y.-H., X. Zou, and W. Huang, *The impact of Global Positioning System data on the prediction of an extratropical cyclone: an observing system simulation experiment*, Dynamics of Atmospheres and Oceans, vol. 27, 1998, pp. 439-470.
51. Emardson, T. R., G. Elgered, and J. M. Johansson, *Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of Global Positioning System receivers*, J. Geophys. Res., vol. 103, 1998, pp. 1807-1820.
52. Kavak, A., W. J. Vogel, and G. H. Xu, *Using GPS to measure ground complex permittivity*, Electronics Letters, vol. 34, 1998, pp. 254-255.
53. Liu, Q., *Time-dependent models of vertical crustal deformation from GPS-leveling data*, Surveying and Land Information Systems, vol. 58, 1998, pp. 5-12.
54. Kuk Ch., and M. Bornfeld, *Radiolocation Signals. Theory and Applications*, Moscow: Soviet Radio, 1971, 567p.
55. Gnanaligam, S., and K. Weeks, in: *The Physics of the Ionosphere*, edited by J.A.Ratcliffe, The Physical Society, London, 1955, p.63.
56. Titheridge, J. E., *The electron density in the lower ionosphere*, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 24, 1962, pp. 269-282.
57. Ivanov, V. A., V. I. Kurkin, V. E. Nosov, V. P. Uryadov and V. V. Shumaev, *Chirp ionosonde and its application in the ionospheric research*, Radiophysics and Quantum Electronics, vol. 46, 2003, pp. 821-851.
58. Klauder, J. R., A. C. Price, S. Darlington, and W. J. Albersteim, *The theory and design of chirp radars*, Bell Syst. Tech. J., vol. 39, 1960, pp. 745-820.
59. Fenwick, R. B., and G. H. Barry, *Step by step to a linear frequency sweep*, Electronics, vol.38, 1965, pp. 66-67.
60. Barry, G. H., and R. B. Fenwick, *Extraterrestrial and ionospheric sounding with synthesized frequency sweeps*, Hewlett-Packard J., vol. 16, 1965, pp. 8-12.
61. Epstein, M. R., *Polarization of ionospherically propagated HF radio waves with applications to radio communication*, Radio Science, vol.4, 1969, pp. 53-61.
62. Fenwick, R. B., G. H. Barry, *Sweep-frequency oblique ionospheric sounding at medium frequencies*, IEEE Trans., vol. BC-12, 1966, pp. 25-27.
63. Croft, T. A., *Sky-wave backscatter: A means for observing our environment at great distance*, Reviews of Geophysics and Space Physics, vol.10, 1972, pp. 73-155.
64. Barnum J. R. *Skywave polarization rotation in swept-frequency sea backscatter*, Radio Sci., vol.8, 1973, pp. 411-419.
65. Washburn T. W., L. E. Sweney, J. R. Barnum, and W. B. Zavoli, *Development of HF skywave radar for remote sensing application.- Special*

- 
- topics in HF Propagation*, AGARD Conf. Proc. No. 263, 28,05-1.06.1979, London, 32/1-32/17, New York, 1979.
66. *The new VOS-1 vertical/ oblique sounder*, Prospect "Barry Research" Palo Alto, Calif., USA, 1970.
  67. *Chirpsounder receiver systems*, Prospect "Barry Research" Palo Alto, Calif., USA, 1972.
  68. *Ionospheric chirpsounder transmitter TCS-4*, Prospect "Barry Research" Palo Alto, Calif., USA, 1973.
  69. *HF chirpsounder receiver model RCS-5*, Prospect "BR Communications", USA, 1985.
  70. *HF chirpsounder transmitter model TCS-5*, Prospect "BR Communications", USA, 1990.
  71. Poole, A. W. V., *Advanced sounding (1): The FM-CW alternative*, Radio Sci., vol. 20, 1985, pp. 1609–1616.
  72. Poole, A.W.V., and G. P. Evans, *Advanced sounding (2): first results from an advanced chirp ionosondes*, Radio Sci., vol. 20, 1985, pp. 1617–1623.
  73. Salous, S., and E. D. R. Shearman, *Wideband measurements of coherence over an HF skywave link and implication for spread-spectrum communication*, Radio Sci., vol. 21, 1986, pp. 463-472.
  74. Salous, S., *FMCW channel sounder with digital processing for measuring the coherence of wideband HF radio links*, IEE Proc., vol.133, Pt. F. 1986, pp. 456-462.
  75. Basler, R. P., G. H. Price, R. T. Tsunoda, and T. L. Wong, *Ionospheric distortion of HF signals*, Radio Sci., vol.23, 1988, pp. 569-579.
  76. Goodman J. M., Ballard J. W., Sharp E. D., and Trung Luong, *Proc. of Session G5 at the XXVth GA URSI*, Published WDC-A, Boulder, 1998, pp. 64-70.
  77. Bröms, M. and B. Lundborg, *Results from Swedish oblique soundings campaigns*, Annali di Geofisica, vol. 37, 1994, pp. 145-152.
  78. Lundborg, B., M. Broms, and H. Derblom, *Oblique sounding of an auroral ionospheric HF channel*, J. Atmos. Terr. Phys., vol.57, 1995, pp. 51-63.
  79. Arthur, P. C., M. Lissimore, P. S. Cannon, and N. C. Davies, *Application of a high quality ionosonde to ionospheric research*, Proc. of Seventh International Conference on HF Radio Systems and Techniques, IEE Conf. Publ., No. 441, 1997, pp. 135-139.
  80. Arthur, P. C. and P. S. Cannon, *ROSE - A high performance oblique ionosonde providing new opportunities for ionospheric research*, Annali di Geofisica, vol. 37, 1994, pp. 135-144.
  81. Black, Q. R., J. F. Wood, Jr., A. G. Sonstebly, and W. M. Sherrill, *A direction finding ionosondes for ionospheric propagation research*, Radio Sci., vol. 28, 1993, pp. 795-809.
  82. Millman, G. H. and R. W. Swanson, *Comparison of HF oblique transmissions with ionospheric predictions*, Radio Sci., vol. 20, 1985, pp. 315-318,

83. Anderson, S. J., and M. L. Lees, *High-resolution synoptic scale measurement of ionospheric motions with the Jindalee sky wave radar*, Radio. Sci., vol. 23, 1988, pp. 265-272.
84. Russell, C. J., P. L. Dyson, Z. Houminer, J. A. Bennett, and L. Li, *The effect of large-scale ionospheric gradients on backscatter ionograms*, Radio Sci., vol. 32, 1997, pp. 1881-1898.
85. Dandekar, B. S., G. S. Sales, B. Weijers, and D. Reynolds, *Study of equatorial clutter using observed and simulated long-range backscatter ionograms*, Radio Sci., vol. 33, 1998, pp. 1135-1158.
86. Earl, G. F., and B. D. Ward, *The frequency management system of the Jindalee over-the-horizon backscatter radar*, Radio Sci., vol. 22, 1987, pp. 275-291.
87. Baker, P.W., R. H. Clarke, A. D. Massie, and D. Taylor, *Techniques for the measurement and decomposition of the time varying narrow bandwidth transfer function of an HF sky wave transmission*, Radio Sci., vol. 32, 1997, pp. 1813-1820.
88. Lynn, K. J. W., *Oblique sounding in Australia*, INAG-62, 1998, pp. 14-18.
89. Belenov, A F., V. A. Zinichev, V. A. Ivanov et al., *Sounding of the ionosphere by quasi-continuous signals*, Proc of XIII Conference of Radio Wave Propagation, Gorky, vol.1, 1981, pp. 12-13.
90. Kochemasov, V. N., L. A. Belov, and V. S. Okoneshnikov, *Formation of Signals with Linear Frequency Modulation*, Moscow: Radio and Communication, 1983, 192p.
91. Erukhimov, L. M., V. A. Ivanov, N. A. Mityakov, et al., *LFM-Method of Diagnostics of the Ionospheric Channel*, Moscow: VINITI, No. 9027-1386, 1986, 94p.
92. Ivanov, V. A., V. A. Frolov, and V. V. Shumaev, *Sounding of the ionosphere by continuous LFM signals*, Izv. Vuzov, Radiophysika, vol. 29, 1986, pp. 235-237.
93. Brynko, I. G., I. A. Galkin, V. P. Grozov et al., *Automatically controlled data gathering and processing system using an FMCW ionosondes*, Adv. Space Res., vol. 4, 1988, pp. 121-124.
94. Ivanov, V. A., V. P. Uryadov, V. A. Frolov, and V. V. Shumaev, *Oblique sounding of the ionosphere by continuous LFM-signals*, Geomagn. Aeronomy, vol. 30, 1990, pp. 107-112.
95. Ivanov, V. A., Yu. B. Malishev, Yu. V. Noga et al., *Automatic LFM-complex for ionospheric studies*, Radiotechnics, No. 4, 1991, pp.69-72.
96. Filipp N. D., N. Sh. Blaunshtein, L. M. Erukhimov, V. A. Ivanov, and V. P. Uryadov, *Modern Methods of Investigation of Dynamic Processes in the Ionosphere*, Shtiintza, Kishinev, Moldova, 1991, 288p.
97. Zinichev, V. A., V. A. Ivanov, V. A. Frolov, and V. V. Shumaev, *Use of LFM method of vertical sounding for study of modified upper layers of the ionosphere*, Izv. Vusov. Radiophysika, vol. 29, 1986, pp. 629-631.

98. Erukhimov, L. M., V. A. Ivanov, N. A. Mityakov, et al., *On frequency characteristics of effects of powerful radiation at the ionospheric F-layer*, Izv. Vuzov. Radiophysika, vol. 30, 1987, pp. 1055-1065.
99. Filip N., Plohotniuc E., Pascaru M. *Ionosphere prognosis using LFM-ionosound*. Proc. of the XVIII Congress of Româno-American Academy of Science and Arte, Chişinău. Moldova, 1993, vol. 2. pp. 135-137.
100. Ureadov, V., V. Ivanov, E. Plohotniuc, L. Eruhimov, N. Blaunshtein, and N. Filipp, *Dynamic Processes in Ionosphere and Methods of Investigation*, Iasi, Romania, Tehnopress, 2006, 284 p.
101. Boguta, N. M., V. A. Ivanov et al., *Use of LFM ionosonde in adaptive system of Short Wave radio communication*, Radiotechniks, No. 4, 1993, pp. 77-79.
102. Lynn, K. J. W., T. J. Harris, M. Sjarifudin, *Stratification of the F2 layer observed in Southeast Asia*, J. Geoph. Res. - Space Physics, vol. 105, A12, 2000, pp. 27147 – 27156.
103. Eremenko, V. A., L. M. Erukhimov, V. A. Ivanov et al., *Pedersen mode ducting in randomly-stratified ionosphere*, Waves in Random Media, vol. 7, 1997, pp. 531-544.
104. Vertogradov, G. G., V. P. Uryadov, and V. G. Vertogradov, *Monitoring of wave disturbances by method of oblique sounding of the ionosphere*, Izv. Vuzov, Radiophysika, vol. 49, 2006, pp. 1015-1029.

## **SISTEME OPTICE ŞI RADIO UTILIZATE PENTRU CERCETAREA IONOSFEREI**

**Eugeniu Plohotniuc**

(Universitatea de Stat "Alec Russo", Republica Moldova)

Este prezentată o succintă descriere a sistemelor optice și radio moderne utilizate cu succes pentru cercetarea parametrilor, diverselor tipuri de instabilități și neomogenități ale plasmei ionosferice.

Prezentat la redacție la 24.09.07

C.Z.U.: 664.8.047

## **INSTALAȚIA DE LABORATOR PENTRU CERCETAREA CARACTERISTICILOR CINETICE ÎN PROCESUL DE USCARE A PRODUSELOR VEGETALE**

**Lupașco Andrei, Stoicev Petru, Bernic Mircea, Moșanu Aliona,  
Lupu Olga, Balea Vitalie, Cazacu Olesea, Terzi Ilie,  
Netreba Natalia, Rotari Oxana**  
(Universitatea Tehnică a Moldovei, Republica Moldova)

În lucrare se propune aplicarea microundelor în scopul intensificării procesului de uscare a produselor vegetale. Pentru propunerea unor noi regimuri de uscare este necesară cercetarea caracteristicilor cineticii procesului de uscare. Se propune o instalație de laborator pentru cercetarea cineticii procesului de uscare. De asemenea, sînt prezentate metodele de calcul al vitezei aerului în conductă, al masei finale a produsului, al conținutului de umiditate în orice moment de timp și formulele de calcul al vitezei de uscare a produsului.

### **Introducere**

Procesul de uscare este pe larg folosit în industria alimentară. Ca obiect de uscare pot fi folosite diferite materiale la diferite stadii de prelucrare a lor (materie primă, semifabricate, produse finite). Uscarea constituie una dintre cele mai eficiente metode de conservare și păstrare a produselor alimentare [1, 2]. Un aspect important, la momentul actual, îl constituie dezvoltarea industriei de producere și îmbunătățirea calității producției fabricate. Acest aspect poate fi realizat prin modernizarea și optimizarea proceselor tehnologice existente, dar și prin elaborarea unor noi utilaje automate (linii și agregate în flux) cu o capacitate de producere înaltă.

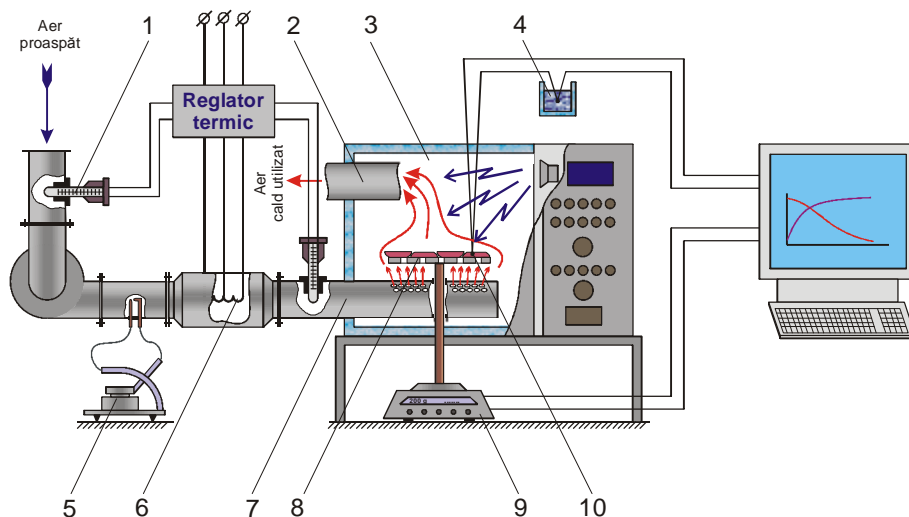
În legătură cu aceasta apare necesitatea de a elabora noi metode de uscare care ar asigura o calitate înaltă a produsului, de a crea condiții pentru prelucrarea mai eficientă a fructelor și legumelor, micșorarea pierderilor, automatizarea și mecanizarea acestui proces și, de asemenea, micșorarea cheltuielilor de energie.

Actualmente, uscarea produselor vegetale se efectuează prin metode clasice cum ar fi uscarea la soare, uscarea la umbră, uscarea în uscătorii cu aportul de căldură convectiv ș.a [1, 2]. Aceste metode de uscare posedă o serie de neajunsuri cum ar fi, de exemplu, durata îndelungată a procesului de uscare, calitatea proastă a produsului din cauza dezvoltării macro- și microflorei, necesitatea de suprafețe mari de uscare ș.a. În scopul depășirii acestor neajunsuri, în opinia noastră, este necesară utilizarea câmpurilor electromagnetice de frecvență înaltă SHF. Pentru elaborarea regimurilor de uscare a produselor vegetale este necesară cercetarea cinetică a procesului de uscare cu diferite aporturi de energie și anume: convecție, microunde și combinat (convecție cu microunde).

## Descrierea instalației de laborator pentru cercetarea cineticii procesului de uscare

Pentru cercetarea cineticii procesului de uscare, a fost proiectată și executată o instalație de laborator, în baza cuptorului modern cu unde de frecvență înaltă (microunde) Bosh cu puterea nominală de 1,5 kW și frecvența câmpului electromagnetic de 2450 MHz.

Instalația de uscare constă din camera de uscare 3, în interiorul căreia este amplasat suportul de fluoroplast perforat 8 pe care se plasează produsul analizat. La camera de uscare sunt conectate racordurile 2 și 7 pentru intrarea și evacuarea agentului de uscare. Drept agent de uscare, este utilizat aerul încălzit. Agentul de uscare încălzit în caloriferul electric 6, cu ajutorul ventilatorului este refulat în camera de uscare. Produsul destinat uscării este cântărit continuu cu ajutorul cântarului electronic 9, datele fiind înregistrate de calculator pentru prelucrarea ulterioară. Temperatura agentului de uscare se măsoară cu ajutorul termometrului 1 și se reglează cu ajutorul regulatorului de temperatură. Viteza aerului se măsoară cu ajutorul manometrului diferențial 5.



Instalația de laborator pentru studierea caracteristicilor cinetice ale procesului de uscare a produselor vegetale: 1 – termometru; 2 – conductă de evacuare; 3 – cameră de lucru; 4 – vas Diyar; 5 – manometru diferențial; 6 – calorifer; 7 – conductă de alimentare; 8 – suport de fluoroplast perforat pentru produsul supus uscării; 9 – cântar electronic; 10 – termocuplu.

Camera SHF (de rezonanță) se închide ermetic, iar, în cazul deschiderii ușii, alimentarea cu energie electrică în camera de lucru încetează și se conectează iluminarea. Firul de rețea servește pentru conectarea cuptorului la rețeaua electrică. Pe panoul de comandă sunt instalate: blocul de reglare a puterii, blocul de reglare a timpului, indicatorii pasului de execuție și conectării blocului de execuție, butoanele iluminării camerei de lucru, pornirii și opririi programelor de lucru. Blocul de reglare a puterii constă din butoane corespunzătoare pentru fiecare putere

a magnetronului: 90, 180, 360, 600 și 800W. Viteza aerului se măsoară în conducta de aer 7, în direcția ventilator - cameră de uscare.

Pentru experimentarea preventivă se cântărește 150 - 200 g de produs, care apoi se introduce în cuptor și se cântărește, repetat, în regim automat.

După cum a fost menționat mai sus, micșorarea masei probei analizate în procesul de uscare cu microunde este înregistrată de cântarul electric automat (partea electronică a cântarului se izolează minuțios de câmpul electromagnetic). Schema electronică a cântarului constă din rezistențe active și, de regulă, exclude elementele semiconductoare și inductive.

Pentru excluderea erorilor în cadrul cercetărilor, a fost aplicat cântarul electronic de tipul JW-1 cu ieșire la calculator. Sensibilitatea cântarului a constituit 2 g/unit, exactitatea de cântărire  $\pm 5\%$ .

Suportul de fluoroplast perforat a fost fixat pe cântar cu elemente speciale. În procesul de uscare, cântarul permite măsurarea micșorării masei produsului continuu. Înregistrarea micșorării masei se efectuează la intervale egale de timp, în dependență de aportul de energie.

Datele cântării sunt înregistrate de calculator, iar, ulterior, operatorul le poate prelucra.

În camera de lucru se instalează un termocuplul compus din crom-cobel 10, elaborat cu diametrul conductoarelor de 0,1mm. Datele indicate de către termocuplul sînt înregistrate de către potențiometrul electronic de tipul KCIИ-04-12M 4.

### **Metodele de măsurare și de calcul ale parametrilor instalației**

Pentru măsurarea vitezei agentului de uscare în conductă se folosesc două tuburi capilare pneumatice cu diametrul interior de 0,8 mm. Tuburile capilare pneumatice se fixează și se unesc, cu ajutorul unui garou de cauciuc, cu manometrul MMH 5. Micromanometrul este umplut cu alcool etilic cu densitatea de 809,5 kg/m<sup>3</sup>. Unul din tuburi, așezat orizontal, măsoară fluxul total, iar cel așezat sub 90° pe direcția de mișcare a aerului măsoară fluxul static. Presiunea dinamică reală în MPa se calculează după formula:

$$\Delta P = h \cdot k \cdot g \cdot \Delta \cdot d, \quad (1)$$

unde:  $h = h_1 - h_2$ ,

$h_1$  – valoarea de pe scara manometrului în timpul măsurării,  $m$ ,

$h_2$  – valoarea de pe scara manometrului până la începutul măsurărilor,  $m$ ,

$k$  – coeficientul dependent de unghiul de înclinare a tubului;

$g$  – accelerația căderii libere,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,

$D = \frac{r_0}{r}$  – coeficient de corecție la condițiile atmosferice,

$\rho_0$  – densitatea aerului în condiții normale,  $\text{kg/m}^3$ ,

$\rho$  – densitatea aerului în condițiile de măsurare,  $\text{kg/m}^3$ ,

$d = \frac{r_m}{809.5}$  – coeficient de corecție în dependență de densitatea alcoolului,

turnat în micromanometru,



$\rho_m$  – densitatea reală a alcoolului etilic,  $kg/m^3$ ,

809,5 – densitatea normală pentru alcoolul din manometru,  $kg/m^3$ .

Mărimea vitezei aerului la intrare în camera de uscare se determină după formula:

$$v_0 = 1.41 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (2)$$

unde:  $\Delta P$  este presiunea dinamică,  $N/m^2$ ,

$\rho$  – densitatea aerului,  $kg/m^3$ .

Densitatea aerului, în dependență de temperatură, se determină după tabelele din literatura de specialitate.

Viteza agentului de uscare se calculează după formula:

$$v_c = v_0 \cdot \frac{p \cdot d^2}{4 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{r_0}{r_c}, \quad (3)$$

unde:  $d$  este diametrul conductei de aer la intrarea în camera de uscare,  $m$ ,

$a, b$  – dimensiunile secțiunii transversale a camerei de uscare,  $m$ ,

$\rho_0$  – densitatea aerului la intrare în camera de uscare,  $kg/m^3$ ,

$\rho_c$  – densitatea aerului în camera de uscare,  $kg/m^3$ .

Cunoscând greutatea inițială a produsului cercetat ( $G_{ap}$ ), și greutatea produsului uscat ( $G_{usc}$ ), în orice moment, se determină umiditatea substanței uscate după formula [3, 4]:

$$U^c = \frac{G_{ap}}{G_{usc}} \cdot 100 = \left( \frac{G_i}{G_{usc}} - 1 \right) \cdot 100. \quad (4)$$

Masa finală, după uscare, a probei analizate se calculează după formula:

$$G_{fm} = \frac{U_{fm}^c \cdot G_{usc}}{100} + G_{usc} = G_{usc} \left( \frac{U_{fm}^c}{100} + 1 \right), \quad (5)$$

unde  $U_{fm}^c$  este umiditatea în produsului finit.

Consecutivitatea operațiilor și a calculelor se respectă pentru toate experiențele.

În baza datelor obținute în procesul de cercetare, au fost construite curbele uscării  $u = f(\tau)$ .

Curbele vitezei de uscare  $\frac{dU}{dt} = f(U)$  s-au construit după punctele, obținute prin diferențierea funcției tabulare  $U = f(\tau)$  după formula [5]:

$$\frac{dU}{dt}(\bar{U}_0) = \frac{\sum_{m=-p}^p m \cdot \bar{U}_m}{\sum_{m=-p}^p m^2}, \quad (6)$$

unde:  $\frac{dU}{dt}(\bar{U}_0)$  este valoarea vitezei de uscare pentru conținutul de umiditate mediu

$U_0, \%$ , raportat la durata uscării (h, s, min),

$\bar{U}_0$  - valoarea medie a conținutului de umiditate în masa materialului înainte și după momentul de timp, la care umiditatea a fost  $U_0, \%$ ,

$m = -2; -1; 0; 1; 2.$

Valoarea vitezei de uscare pentru primele două și ultimele două puncte s-a determinat după formulele [42]:

Pentru primul punct:

$$\frac{dU}{dt}(\bar{U}_1) = \frac{-2\bar{U}_4 + 13\bar{U}_3 + 17\bar{U}_2 - 9\bar{U}_1}{20 \cdot n}, \quad (7)$$

Pentru al doilea punct:

$$\frac{dU}{dt}(\bar{U}_2) = \frac{-11\bar{U}_4 + 3\bar{U}_3 + 7\bar{U}_2 - \bar{U}_1}{20 \cdot n}, \quad (8)$$

Pentru penultimul punct:

$$\frac{dU}{dt}(\bar{U}_{n-1}) = \frac{-\bar{U}_n - 7\bar{U}_{n-1} - 3\bar{U}_{n-2} + 1\bar{U}_{n-3}}{20 \cdot n}, \quad (9)$$

Pentru ultimul punct:

$$\frac{dU}{dt}(\bar{U}_n) = \frac{-9\bar{U}_n - 17\bar{U}_{n-1} - 13\bar{U}_{n-2} + 2\bar{U}_{n-3}}{20 \cdot n}, \quad (10)$$

## Concluzii

Elaborarea instalației de uscare permite cercetarea cineticii procesului de uscare a tuturor produselor vegetale. Ea permite efectuarea cercetărilor la diferite aporturi de căldură (prin convecție, prin microunde și combinat). Uscarea convectivă a produselor vegetale este posibilă la temperaturile agentului termic de la 50°C la 200°C. Uscarea combinată (cît și uscarea prin convecție sau microunde) este posibilă la aceleași temperaturi ale agentului termic cu convecție continuă pentru toate regimurile de lucru ale instalației, inclusiv pentru regimuri impuls-discrete: 5s/10s, 10s/10s, 15s/10s și 20s/10s, unde numitorul fracției reprezintă durata de acțiune a undelor asupra produsului, iar numărătorul durata de repaos.

## Bibliografie

1. Гинзбург А.С. *Технология сушки пищевых продуктов*. – М.: Пищевая промышленность, 1976. –248 с.
2. Кац З.А. *Производство сушеных овощей, картофеля и фруктов*.– М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984.–216 с.
3. Лыков А.В. *Теория сушки*. – М.: Энергия, 1968. – 470с
4. Гинзбург А.С. *Основы теории и техники сушки пищевых продуктов*. – М.: Пищевая промышленность, 1973. –528 с.
5. Вержбицкий В. М. *Основы численных методов: учебник для вузов*. –М.: Высшая школа, 2005.-840с.

---

## **LABORATORY INSTALLATION FOR STUDYING OF KINETIC CHARACTERISTICS DURING DRYING OF VEGETATIVE MATERIALS**

**Lupașco Andrei, Stoicev Petru, Bernic Mircea, Moșanu Aliona,  
Lupu Olga, Balea Vitalie, Cazacu Olesea, Terzi Ilie,  
Netreba Natalia, Rotari Oxana**  
(Technical University of Moldova, Republic of Moldova)

The given work suggests using microwaves for intensification of the drying process of vegetable produce. For the proposition of new regimes it's necessary to study kinetic characteristics of drying process. For this it's offered the laboratory installation, allowing studying kinetics of drying process. Also are presented method for calculation of air speed in the air duct, the final test mass, moisture content in each moment and formulas for calculation of drying speed.

Prezentat la redacție la 16.02.07

C.Z.U.: 539.375.6

## **METODE DE MĂSURARE A PARAMETRILOR UZURII LA CERCETAREA CUPLURILOR CINEMATICE APLICATE ÎN CONSTRUCȚIA DE MAȘINI-UNELTE**

**Balanici Alexandru** (Universitatea de Stat „A. Russo”, Republica Moldova)  
**Topala Andrian** (Universitatea „Dunărea de jos”, România)

În articol se face o analiză a metodelor de măsurare a parametrilor uzurii la cercetarea cuplurilor cinematice aplicate în construcția de mașini-unelte, se descrie tehnologia măsurărilor, se indică prioritățile și neajunsurile fiecărei metode în parte, se dau recomandări practice de utilizare a acestor metode.

Pentru aprecierea caracteristicilor de rezistență a materialelor la uzură, cât și pentru cercetarea experimentală a procesului de rodaj a organelor de mașini este importantă existența metodelor și mijloacelor corespunzătoare de măsură.

În prezent, există diverse metode de măsurare a parametrilor ce caracterizează mărimea uzurii. Din acest motiv, pentru un cercetător totdeauna este actuală problema alegerii unei metode optimale, care ar permite obținerea unui volum vast de informații cu cheltuieli minime de timp și care ar evidenția cât mai pe deplin caracterul și multiplele nuanțe ale desfășurării și dezvăluirii fizicii acestui proces. În acest scop, se aplică diferite metode, uneori chiar destul de complicate, dar precise și de înaltă sensibilitate.

În literatura de specialitate sînt descrise diferite metode de măsurare a parametrilor uzurii. Astfel, în lucrarea [1] se menționează că cercetările la uzură se

efectuează atât în condiții de laborator, prin intermediul mostrelor sau cuplurilor cinematice reale, cât și în condiții de exploatare normală a mașinilor. Uzura se apreciază după următoarele metode:

- după variația parametrilor geometrici ai corpurilor: a dimensiunilor liniare, a formei și a microgeometriei;
- după micșorarea masei probei supuse încercării (metodă valabilă pentru corpuri de dimensiuni mici, care nu se îmbiba cu ulei);
- după cantitatea produselor uzării;
- după micșorarea radioactivității stratului exterior activat;
- după micșorarea indicilor de lucru al cuplului: de exemplu, după creșterea scurgerilor de ulei, consumul de combustibil (metodă utilizată doar în cazul când se fac observații asupra decurgerii procesului de uzură în timpul exploatării mașinii-unelte sau a mecanismului cercetat).

O clasificare generală a metodelor de măsurare a uzurii este expusă și în lucrarea [2]. Conform acestei clasificări, deosebim trei grupe mari: de integrare, diferențiere și de apreciere a uzurii după parametrii de ieșire a mașinilor și mecanismelor.

În continuare, vom face o trecere în revistă a acestor metode, indicând prioritățile, neajunsurile, domeniile de utilizare, cât și unele recomandări practice de aplicare.

La metodele integrale se referă metoda gravimetrică, metodele analizei chimice și spectrale și metoda indicatorilor radioactivi.

Metoda gravimetrică (a cântăririi) se utilizează mai frecvent pentru aprecierea uzurii unor piese de dimensiuni mici sau mostre și constă în cântărirea acestora pînă și după încercări. În acest caz, determinarea uzurii liniare se efectuează după micșorarea masei, în baza presupunerii că uzura se distribuie uniform pe toată suprafața de frecare. Exactitatea acestei metode depinde de precizia aparatelor de măsură și de masa proprie a piesei. Utilizarea acestei metode prevede oprirea mașinii, demontarea ansamblurilor și curățarea minuțioasă a piesei înainte de cântărire. Această metodă nu poate fi utilizată dacă dimensiunile piesei se schimbă din cauza separării unor particule de material și a deformării plastice.

Metoda analizei chimice [2,3] constă în analiza conținutului chimic al cenușii obținute prin arderea unei mici cantități de ulei și determinarea cantităților de metal în ea. Cu toate că metoda presupune o sensibilitate înaltă, ea poate fi aplicată doar în cazul comparării vitezelor de uzare a elementelor mecanismelor, cu condiția că circulația uleiului reprezintă un sistem închis. Această metodă poate fi aplicată la cercetarea uzării cutiilor de viteze, cutiilor de avansări, dar nu și la cercetarea uzurii ghidajelor mașinilor-unelte, șurubului conductor etc.

În cazul analizei spectrale, se determină conținutul elementelor de aliere a materialelor pentru diferite piese în proba de ulei. Această metodă, de asemenea, este foarte sensibilă, însă ca și pentru cazul precedent, principalul neajuns constă în cheltuieli considerabile de timp și mijloace pentru realizarea ei.

Metoda indicatorilor radioactivi, elaborată în laboratoarele Universității Tehnice de Stat „N.Bauman” din Moskova [4], presupune introducerea în materialul piesei a unor izotopi radioactivi. Această metodă se bazează pe prezența unui  $\gamma$ -emițător și permite efectuarea măsurilor prin pereții mașinii fără oprirea și demontarea acesteia, cu o precizie pînă la fracțiuni de micrometri. Despre mărimea uzurii se judecă după micșorarea activității radioactive a piesei sau a creșterii activității radioactive a probelor de ulei. Datorită faptului că se utilizează izotopi de activitate joasă, această metodă este inofensivă. Neajunsul principal al metodei constă în complexitatea măsurărilor și posibilitatea realizării doar în laboratoare speciale.

Metodele integrale se folosesc pentru simplificări sau aprecieri generalizate despre uzura organelor de mașini, în unele cazuri, pentru determinarea caracteristicilor de rezistență la uzură a materialelor de construcție.

Aceste metode, de altfel ca și metodele de apreciere a uzurii după variația parametrilor de ieșire a mașinilor (care permit obținerea unei imagini indirecte despre mărimea uzurii) nu posedă precizie înaltă și se utilizează doar atunci cînd nu pot fi folosite alte metode. Ele, practic, nu sunt utilizate pentru cercetarea decurgerii procesului de uzură a cuplurilor cinematice (spre exemplu, ghidajele mașinilor-unelte).

Pentru cercetarea decurgerii procesului de uzură mai eficiente sunt metodele diferențiale, dintre care: măsurările micrometrice, metoda bazelor artificiale și metoda activizării superficiale.

Metoda măsurărilor micrometrice include cîteva subgrupe, principale fiind cele ce se bazează pe determinarea mărimii uzurii după diferența a două dimensiuni a piesei, măsurate pînă și după experimentare, cu ajutorul diferitor aparate pentru măsurări micrometrice. În acest caz, valorile uzurii pot fi determinate în diferite puncte ale suprafețelor de fricțiune. Un neajuns al acestei metode este precizia ei nu prea înaltă, datorată erorilor bazării și mijloacelor de măsură, deformațiilor termice etc., precum și necesitatea opririi mașinii și demontării cuplului cinematic.

Obținerea profilogramelor reprezintă o varietate a metodei măsurărilor micrometrice. În acest caz, se scoate profilograma unui sector al piesei supus uzurii și se determină modificarea acesteia în raport cu o bază fixă, efectuată, de exemplu, sub formă de șanțuleț sau cavitate specială pe suprafața de frecare.

Această metodă este convingătoare, deoarece oferă posibilitatea observării modificărilor la nivelul formei suprafeței uzate și a variației parametrilor rugozității.

Neajunsurile acestei metode sînt complexitatea profilografierii și imposibilitatea obținerii profilogramelor în una și aceeași secțiune, fapt care micșorează considerabil precizia. În afară de aceasta, nomenclatura pieselor ce pot fi măsurate este limitată, fiind necesară și demontarea cuplului cinematic pentru măsurări.

A treia variantă a metodei măsurărilor micrometrice o constituie metoda măsurării uzurii cu ajutorul captoarelor inductive [5], montate în piesele supuse uzurii, la o anumită adîncime față de suprafețele de frecare. În procesul uzurii

piesei, de captor se apropie piesa conjugată care joacă rolul de indus mobil. Aceasta duce la variația inductanței, după care se poate judeca despre mărimea uzurii. Neajunsul acestei metode constă în influența deformațiilor de contact și variația grosimii stratului de ulei asupra preciziei măsurărilor.

Metoda bazelor artificiale constă în aprecierea mărimii uzurii liniare după schimbarea dimensiunilor secțiunii unei adâncituri de o anumită formă, efectuată pe suprafața supusă uzării. Axa adânciturii trebuie să fie normală pe suprafața de frecare. De-a lungul acestei axe se măsoară uzura liniară.

Deosebim câteva variante ale acestei metode: metoda amprentelor, a mulajelor și a scobiturilor. Cea mai precisă dintre ele este metoda scobiturilor, propusă de savanții M.M. Hrușciiov și E.S.Bercovici [6].

Metoda amprentelor prevede formarea unor adâncituri de o anumită formă pe suprafață. În acest scop, se aplică, frecvent, o piramidă patrulaterală, cu unghiul de la vîrf, dintre laturile opuse, de  $136^{\circ}$ . O astfel de piramidă se aplică în dispozitivele de determinare a microdurității, de tipul ПМТ-3. Piramida se introduce prin apăsare pe suprafața cercetată și se măsoară diagonala amprentei ( $d_0$ ). După o anumită perioadă de uzare se măsoară din nou diametrul amprentei ( $d_1$ ) și după diferența lor se judecă despre mărimea uzurii:

$$U = \frac{d_0 - d_1}{\operatorname{tg} \alpha / 2}.$$

Diagonala amprenteii se măsoară cu ajutorul dispozitivului optic de măsurare a microscopului instalat pe dispozitivul ПМТ-3. Această metodă are și careva neajunsuri. La apăsarea piramidei, în jurul amprenteii se produce o bombare a materialului, prin urmare, se distorsionează forma amprenteii. Pe de altă parte, după înlăturarea sarcinii, are loc o restabilire a adânciturii, modificându-se forma inițială.

Bombarea amprenteii se înlătură prin netezirea preventivă a mostrelor sau a cuplurilor cinematice, însă restaurarea elastică a amprenteii nu se poate evita, implicînd, astfel, o eroare neesențială la măsurarea uzurii.

Metoda bazelor artificiale nu necesită mari cheltuieli și, în același timp, este esențial mai precisă decît metoda măsurărilor micrometrice.

Totodată, pentru determinarea uzurii prin această metodă, este necesară demontarea cuplului cinematic, fapt care face dificilă cercetarea dinamicii desfășurării procesului de uzură.

După cum s-a menționat, rezultatul procesului de uzare a cuplurilor cinematice poate fi apreciat și după parametrii de ieșire a mașinilor și mecanismelor [7]. Ca regulă, parametrii de ieșire caracterizează precizia mișcării subansamblurilor destinate generării suprafețelor și estimează abaterile de la traiectoriile ideale, pentru care mașina-unealtă nu influențează precizia de prelucrare. În calitate de parametri ai traiectoriei se pot alege: întinderea traiectoriei (distanța maximă dintre coordonatele traiectoriei în direcția axei X); coordonata începutului traiectoriei (caracterizează poziția traiectoriei în raport cu axa Z); coordonata sfîrșitului traiectoriei (determină precizia poziționării); panta liniei medii a profilului în raport cu axa Z (caracterizează conicitatea suprafețelor

cilindrice, sau abaterea de la planitate a suprafețelor plane); pasul și amplitudinea traiectoriei, în cazul când acestea au caracter ondulatoriu etc. Pentru determinarea preciziei deplasării saniei longitudinale sau transversale, se utilizează interferometrul, autocolimatorul, capul de măsurat. Măsurările efectuate de autocolimator sau interferometru sunt universale, mai precise și, moment important, pot fi automatizate și aplicate după un anumit program. Această metodă însă nu permite cercetarea procesului de uzură a fiecărui element în parte, ci doar a cuplului cinematic în întregime.

Pentru a alege corect metoda de măsurare a uzurii e necesar să se țină cont de următoarele cerințe:

- posibilitatea determinării valorii uzurii în punctul dat;
- determinarea distribuirii uzurii pe suprafața de frecare;
- măsurarea valorilor mici ale uzurii (1-2 $\mu$ m);
- cercetarea uzării suprafețelor inaccesibile ale pieselor fără demontarea cuplurilor cinematice;
- controlul neîntrerupt al uzării cuplului (pieselor);
- cercetarea schimbării microgeometriei suprafețelor de lucru în procesul uzării;
- simplitatea metodei;
- promovarea metodei în mod autonom, independent de alte organizații și laboratoare.

### Bibliografia

1. *Машины и стенды для испытания деталей*, Под ред. Д.Н. Решетова.- М.:Машиностроение, 1979-343с.
2. Крагельский, И.В., *Трение и износ*. М.: Машиностроение, 1968, 480с.
3. Костецкий, Б.И., *Трение, смазка и износ в машинах*. Киев, Техника, 1970. 396с.
4. *Метод поверхностей активации в промышленности*, Под ред. В.И. Постникова. М.: Атомиздат 1975, 152с.
5. *Тензометрия в машиностроение*. Справочное пособие, под ред. Р.А. Макарова. М.: Машиностроение, 1975, 287с.
6. Проников, А.С., *Надёжность машин*. Москва: Машиностроение, 1978, 592 стр.
7. Проников, А.С., *Программный метод испытания металлорежущих станков*. М.: Машиностроение, 1985, 288с.

## **METHODS OF WEAR PARAMETERS MEASUREMENT IN THE STUDY OF KINEMATIC COUPLES APPLIED IN MACHINE TOOLS CONSTRUCTION**

**Balanici Alexandru** (Universitatea de Stat „A. Russo”, Republica Moldova)

**Topala Andrian** (Universitatea „Dunărea de jos”, România)

The article offers an analysis of the methods of wear parameters measurement in the study of kinematic couples applied in machine tools construction, describes measurement technology, indicates the priorities and drawbacks of each method, and gives practical recommendations concerning the use of the these methods.

Prezentat la redacție la 6.11.07



---

## Exigențe privind prezentarea lucrărilor științifice pentru revista „Fizică și tehnică: Procese, modele, experimente”

### I. Destinația revistei

Materialele prezentate vor reflecta realizările obținute în ultimii ani în cadrul catedrelor, laboratoarelor de cercetări științifice ale USB, instituțiilor de învățământ și de cercetare din Republica Moldova și de peste hotarele ei.

### II. Cerințe față de articolele prezentate

#### 1. Dispoziții generale

Nu se vor admite pentru publicare materiale care au fost publicate în alte ediții. Articolele vor fi însoțite de extrasul din procesul verbal al ședinței de catedră, al laboratorului sau seminarului științific la care au fost discutate și propuse pentru publicare. Lucrările primite la redacție vor fi recenzate de specialiști calificați în domeniul respectiv, numiți de colegiul de redacție.

#### 2. Structura lucrărilor și regulile de prezentare

O persoană poate fi autor sau/și coautor la maximum două articole. Volumul unui articol nu va depăși, ca regulă, 7 pagini.

Fiecare articol va cuprinde:

- CZU;
- titlul în limbile română /rusă și engleză;
- date despre autor/autori în limbile română/rusă și engleză;
- rezumatul în limbile română/rusă și engleză;
- articolul propriu-zis;
- bibliografie.

#### 2.1. Întrebuințarea suportului electronic

Materialele vor fi redactate în **Microsoft Word**, fontul **Times New Roman** și vor fi prezentate pe foi în formatul B5 (257X182mm). Parametrii paginii: 25 - stînga (Left), 20 - sus (Top), 20 - jos (Bottom), 15 - dreapta (Right), 17,5 - antet (Header), 0 - subantet (Footer), orientarea portret. Dimensiunile fontului de imprimare - 12 points. Aliniatale – 1 cm. Spațiul dintre liniile (Line Spacing) aceluiași paragraf, inclusiv titlul lucrării și informațiile despre autori - un interval. Se va accepta cu trecerea cuvintelor dintr-un rînd în altul. Ultima pagină, în limita posibilităților, va fi completă.

## 2.2. Structura articolului

CZU se va situa în partea stîngă a paginii.

Titlul se va da complet, maximum 3 rînduri, pe toată lățimea paginii (14 points, BOLD, CENTER, ALL CAPS).

Informațiile despre autori se vor da cu aldine, în limba în care este scrisă lucrarea, în următoarea consecutivitate: Prenumele și Numele autorului (complet), afilierea. Dacă coautorii lucrării sînt angajații aceleiași instituții, denumirea ei se va da o singură dată.

Rezumatul va cuprinde descrierea succintă a obiectului, metodelor și rezultatelor cercetării și nu va depăși 10 rînduri. Mărimea caracterilor – 10 points. Cuvîntul „Rezumat” nu se va indica.

Introducerea va reflecta stadiul actual al cercetărilor în domeniu. În caz de necesitate, va cuprinde o scurtă analiză istorică. Introducerea se va încheia cu expunerea scopului lucrării.

Conținutul lucrării va include expunerea metodicii cercetării (experimentală sau teoretică), obiectul cercetării, echipamentul, metodele de măsurare și de observare, precizia și erorile metodicii experimentului. Se vor indica rezultatele obținute și analiza lor. Nu se va admite repetarea datelor în tabele, desene și texte.

În concluzii se va expune succint esența cercetării efectuate, reliefîndu-se importanța și gradul de noutate a rezultatelor obținute.

Titlul fiecărui paragraf se va evidenția cu aldine. Titlurile de capitol vor fi separate de textul curent printr-un spațiu.

În fața textului fiecare titlu de subcapitol cu doi indici se lasă un spațiu liber de un rînd. Aliniatele se vor marca prin introducerea unui „<Tab>”. Pentru scoaterea în relief a unor concepte se vor folosi aldinele (**fără subliniere**).

Tabele se vor numerota cu cifre arabe în partea dreaptă, la sfîrșitul rîndului (de ex.: „Tabelul 1”), după care, în următorul rînd, va urma denumirea și tabelul propriu-zis. Tabelele vor fi separate de textul curent printr-un spațiu. Toate liniile ce formează coroaiașul tabelului vor avea aceeași grosime (1 points). În tabela textuală cifrele se vor scrie cu fontul 10 points, normal. Dacă textul va conține un singur tabel, acesta nu se va numerota.

Ilustrațiile (figurile, schemele, diagramele, fotografiile etc.) se vor prezintă în alb-negru, inserate în textul de bază sau pe foi aparte. Toate figurile se vor numerota cu cifre arabe (în ordinea apariției lor în lucrare), după care se va da legenda lor. Toate semnele sau marcările ilustrate se vor defini în legendă. În cazul mărimilor fizice, se vor indica unitățile de măsură. Dacă lucrarea va conține o singură figură, ea nu se va numerota. Figurile vor fi separate de textul curent printr-un spațiu. Fotografiile introduse în text se vor scana cu o rezoluție de minim 300 dpi (preferabil 600 dpi) și se vor prelucra pentru un contrast bun.

**Nu se admite lipirea fotografiilor sau desenelor pe foi separate.** Adnotările de pe figuri se vor face în cifre sau litere cu înălțimea caracterelor echivalentă fontului 10 points. Legenda se va culege cu 10 points.

*Formule matematice.* Toate formulele matematice se vor scrie, **ÎN MOD OBLIGATORIU**, cu editorul de ecuații din procesorul de texte Microsoft Word for Windows: 95/, 97/, 98/, 2000, (Version 6.0/, Version 7.0, 2000) italice, centrat, prin culegerea fiecăreia din rând nou. Exigențele corespunzătoare vor urma imediat după formulă și se vor introduce prin „unde”, respectându-se ordinea semnelor din ecuație sau relație. Dacă textul va conține mai multe ecuații sau relații, acestea se vor numerota cu cifre arabe la sfârșitul rândului, în partea dreaptă a foii. După descifrarea simbolului-literă, se va pune virgula, apoi se va indica unitatea de măsură.

Unitățile de măsură ale mărimilor fizice se vor prezenta în sistemul internațional de unități (SI).

*Bibliografia* Termenul „Bibliografie” va fi separat de textul curent prin spațiu. În text, referințele se vor insera prin cifre încadrate între croșete, de exemplu: [2],[5-7], și se vor prezenta la sfârșitul articolului într-o listă aparte, în ordinea apariției lor în text. Referințele bibliografice se vor da în limba originalului. Nu se vor accepta referințe la surse nepublicate.

Referințele vor fi prezenta în modul următor:

- a) revistele și culegerile de articole: numele autorilor, titlul articolului, denumirea revistei (culegerii) cu paginile de început și sfârșit (ex.: Castro P. R- curve behavior of a struct ural steel //Engl. Fract. Mech.-1984.-V.19.-N2.-P341-357);
- b) cărțile: numele autorilor, denumirea completă a cărții, locul editării, anul editării, numărul total de pagini (de ex.: Матвеев А.Н Молекулярная физика: Учеб. для физ. Спец. вузов.-2-е изд., перераб. и доп.-М.:Высш. шк.,1987.-360с.);
- c) referințe la brevete (adeverințe de autor): în afară de autori, denumire și număr, se indică și denumirea, anul și numărul Buletinului de invenții în care a fost publicat brevetul (ex.: Nicolescu A. Robot indrustial// Brevet de invenție nr. 1344 MD. Publ- BOPI, nr.7,1996);
- d) în cazul tezelor de doctorat, referințele se dau la autoreferat, nu la teză (ex.: Bologa A. Generarea și utilizarea electroaerosolilor apoși/ Autoreferat al tezei de doctor habilitat în științe tehnice.- Chișinău,1998.-16p.).

### 3. Observații finale

Informația despre autori și rezumatele în alte limbi decât originalul se vor plasa după bibliografie. Conținutul rezumatului expus în trei limbi va fi identic.

Materialul cules se va prezenta pe dischetă, precum și într-un exemplar printat (cu contrastul bun) semnat de toți autorii (după bibliografie).

Pentru relații suplimentare se va indica adresa, numărul de telefon și E-mailul unuia dintre autori.

Articolele care nu vor corespunde cerințelor expuse, normelor limbii și stilului vor fi respinse.

Materialele prezentate la redacție nu se vor restitui autorului.

În revistă se publică articole științifice ce țin de următoarele domenii de cercetare:

- propagarea undelor de radio în diverse medii;
  - elaborarea dispozitivelor electronice analogico-numerice;
  - elaborarea laserilor și aplicarea lor în tehnologiile de prelucrare a materialelor;
  - studierea influenței factorilor exteriori asupra proprietăților fizice ale substanței;
  - tehnologii clasice și neconvenționale de prelucrare a materialelor.
- 

*The journal publishes scientific articles that cover the following research fields:*

- *radio-wave propagation in various media;*
  - *elaboration of analogo-numeric electronic devices;*
  - *elaboration of lasers and their application in materials processing technologies;*
  - *study of the influence of exterior factors on physical properties of substances;*
  - *classical and unconventional technologies of materials processing.*
- 

Журнал принимает к публикации работы, связанные со следующими областями научных исследований:

- распространение радиоволн в различных средах;
- разработка аналого-цифровых электронных устройств;
- разработка лазеров и их применение в технологии обработки материалов;
- изучение влияния внешних факторов на физические свойства веществ;
- классические и нетрадиционные технологии обработки материалов.



# **FIZICĂ ȘI TEHNICĂ:**

## **Procese, modele, experimente**

**Revistă științifică a profilului de cercetare  
“Proprietățile fizice ale substanțelor în diverse stări”**