

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Շահխաթունի Գևորգ Հարությունի

Կիսահաղորդչային գազազգայուն նանոկառուցվածքների հետազոտումը ռեզիստիվ  
և իմպեդանսային սպեկտրասկոպիայի եղանակներով

Ա.04.10 - «Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ տեխնիկական  
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ-2024

THE MINISTRY OF EDUCATION, SCIENCE, CULTURE AND SPORTS OF THE RA  
YEREVAN STATE UNIVERSITY

Shahkhatuni Gevorg

**Investigation of semiconductor gas-sensitive nanostructures by the resistive and  
impedance spectroscopy methods**

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences

Specialty 01.04.10 "Semiconductor Physics"

Abstract

YEREVAN-2024

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի Պետական Համալսարանի  
Ֆիզիկայի Ինստիտուտի գիտական խորհրդում:

Գիտական ղեկավար՝ տեխ. գիտ. դոկտոր, Մ. Ս. Ալեքսանյան  
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տեխ. գիտ. թեկնածու, Ն. Վ. Մարտիրոսյան  
Ֆիզ. -մաթ. գիտ. դոկտոր, Վ. Վ. Հարությունյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների  
ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2024թ. մայիսի 27-ին՝ ժամը  
14:30-ին, Երևանի Պետական Համալսարանի Ֆիզիկայի 049 մասնագիտական  
խորհրդի նիստում (Երևան, հասցե՝ 0025, ք. Երևան, Ա. Մանուկյան 1)  
Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2024թ.-ի ապրիլի 25-ին:

049 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝  Ֆիզ. -մաթ. գիտ. թեկնածու  
Վ.Պ. Քալանթարյան

---

The thesis theme is approved at the Academic Council of the Institute of Physics at the  
Yerevan State University

Scientific adviser: Doctor of Technical Sciences M. S. Aleksanyan  
Official opponents: Candidate of Technical Science N. V. Martirosyan  
Doctor of Phys. Math. Science V. V. Harutyunyan  
The leading organization: Institute of Applied Problems of Physics State (NAS RA)

The defense of the thesis will take place at 14:30 on 27 May 2024 on the session of the  
Specialized Council 049 Physics of the Yerevan State University.

Address: 1 Alex Manoogian Street, 0025 Yerevan, Armenia.

The thesis is available in the library of the Yerevan State University.  
The abstract is distributed on 25 April 2024.

Scientific secretary of the Specialized Council  Candidate of Phys. Math. Sciences  
Associate Prof. V.P. Kalantaryan

## **ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐ**

### **Թեմայի արդիականությունը**

Հայտնի է, որ համաշխարհային տնտեսությունը գրանցում է ծավալների և զարգացման աննախադեպ աճ, որին ի պատասխան գրեթե ամենուր պահանջվում են ավելի բարձր պարամետրերով համակարգեր: Խնդիրն ավելի է բարդանում, երբ խոսքը գնում է անվտանգային համակարգերի ներդրման և դրանց կիրառման մասին: Մեզ շրջապատող և մարդկային գործունեությանը ծառայող գրեթե բոլոր միջավայրերում օգտագործվում են տարաբնույթ գազեր և նյութերի գոլորշիներ: Նմանատիպ գազերի արտահոսքերի հայտնաբերման, դրանց հոսքերի կառավարման և կոնցենտրացիաների չափման լավագույն միջոցը փոքր չափսերով և դյուրակիր սենսորային կառուցվածքների կիրառումն է: Այսպիսի սենսորների առջև դրված խնդիրները տարեցտարի բարդանում են՝ պահանջելով ավելի բարձր զգայունությամբ, ընտրողունակությամբ, արագագործությամբ և կայունությամբ օժտված համակարգեր: Այս առումով, գազային սենսորների համար նոր կոմպոզիտային նյութերի սինթեզումը և դրանց հիման վրա բարձր աշխատունակությամբ օժտված սենսորների պատրաստումը ու դրանց խորքային հետազոտումը՝ ուղղված այդ պարամետրերի լավարկմանը խիստ արդիական խնդիրներ են:

### **Աշխատանքի հիմնական նպատակները**

- Հանգամանորեն ուսումնասիրել միա- և բազմակոմպոնենտ կիսահաղորդչային միացությունների և նանոկոմպոզիտ նյութերի էլեկտրաֆիզիկական ու գազագազայնության հատկությունները և դիտարկել դրանց՝ գազային սենսորներում կիրառման հնարավորությունները:
- Տարբեր եղանակներով սինթեզել նանոկառուցվածքային բազմաբաղադրիչ գազագազային նյութեր և դրանց հիման վրա պատրաստել ռեզիստիվ գազային սենսորներ:
- Կիրառելով և՛ ռեզիստիվ, և՛ իմպեդանսային մեթոդներ՝ հանգամանորեն ուսումնասիրել պատրաստված նանոկառուցվածքային սենսորների բնութագրերը՝ դրանց լավարկման նպատակով:

### **Աշխատանքում առաջադրվել և լուծվել են հետևյալ խնդիրները**

- Տեխնոլոգիական տարատեսակ եղանակներով սինթեզվել են տարբեր բաղադրությամբ կիսահաղորդչային մետաղօքսիդային նանոկառուցվածքներ:
- Հետազոտվել են սինթեզված նյութերի կառուցվածքային և էլեկտրաֆիզիկական հատկությունները:
- Ստացված նանոկառուցվածքների հիման վրա պատրաստվել են ռեզիստիվ սենսորներ՝ օգտագործելով մշակված տեխնոլոգիական մեթոդներ:
- Պատրաստված սենսորների պարամետրերի լավարկման նպատակով դրանց բնութագրերը հետազոտվել են ոչ միայն ռեզիստիվ, այլ նաև իմպեդանսային եղանակով:
- Իմպեդանսային եղանակի կիրառումը սենսորների բնութագրերի ուսումնասիրման նպատակով թույլ է տվել ստանալ խորքային գիտելիքներ գազագազայնության մեխանիզմների և դրանց վրա ազդող հնարավոր գործոնների վերաբերյալ:

## **Գիտական նորույթը**

- Մշակված, նոր և էժան տեխնոլոգիական մեթոդներով (ռեժիմներով) հաջողվել է սինթեզել տարբեր կիսահաղորդչային նանոկոմպոզիտներ, որոնց տվյալ բաղադրությունը առաջին անգամ օգտագործվել է տվյալ գազի հայտնաբերման համար:
- Մշակվել են պատրաստված սենսորների բնութագրերի չափման նոր մեթոդներ, որոնց միջոցով առաջին անգամ առաջ են քաշվել սենսորների համարժեք էլեկտրական շղթաները և դրանց կառուցվածքի ու սենսորների պարամետրերի միջև հարաբերակցությունները:

## **Կիրառական նշանակությունը**

1. Մշակված տեխնոլոգիական ռեժիմների միջոցով աճեցված կոմպոզիտ նանոկառուցվածքները գործնականում կիրառելի են գազային սենսորներում:
2. Այստեղ օգտագործվող մետաղօքսիդային նյութերը և ածխածնային նանոխողովակներն օժտված են բավական բարձր մեխանիկական և քիմիական կայունությամբ, ինչպես նաև ունեն պարամետրերի ժամանակային կայունություն, որոնք խիստ կարևոր են սենսորներն իրական միջավայրում կիրառելու համար:
3. Պատրաստված նանոկառուցվածքային ռեզիստիվ սենսորները չափսերով փոքր են, դյուրակիր և համատեղելի ժամանակակից միկրո- և նանոէլեկտրոնային համակարգերի հետ:
4. Սենսորների բնութագրերի խորքային հետազոտումն իմպեդանսային եղանակով թույլ է տալիս էականորեն բարելավել դրանց աշխատունակության բնութագրերը:
5. Պատրաստված սենսորներն ունակ են աշխատել նաև փոփոխական ազդանշանների կիրառմամբ, որը թույլ է տալիս դրանց ինտեգրումը բարձրիաճախային տիրույթներում աշխատող ժամանակակից էլեկտրոնային համակարգերին:

## **Պաշտպանությանը ներկայացված հիմնական դրույթները**

1. Մշակված ճշգրիտ տեխնոլոգիական մեթոդների և ռեժիմների կիրառումը բերել է գազագազային կոմպոզիտային նյութերի հաջող սինթեզման:
2. Մետաղօքսիդային նանոկոմպոզիտների բաղադրությունների ճշգրիտ ընտրությունը ( $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (80:20 կշռ.%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (60:40 մոլ.%),  $\text{ZnO}:\text{La}+1\text{ատ.}\% \text{La}$ ,  $\text{ZnO}+2\text{ատ.}\% \text{La}$ ,  $\text{SnO}_2+1\text{ատ.}\% \text{Co}$ , բազմապատ ածխածնային նանոխողովակներ ( $\text{FALN}$ ): $\text{SnO}_2$  (5:95 կշռ.%),  $\text{SnO}_2/\text{FALN}$  (75:25 կշռ.%) և  $\text{FALN}/\text{SnO}_2$  (1:600)) բերել է դրանց բարձր զգայունության (S~5-5000) ջրածնի, ամոնիակի, ացետոնի, էթանոլի, հեղուկացված նավթային գազի և ջրածնի պերօքսիդի գոլորշիների (ՋՊԳ) նկատմամբ:
3. Ջրածնի պերօքսիդի գոլորշիների նկատմամբ զգայուն  $\text{SnO}_2/\text{FALN}$  կոմպոզիտ նյութի և պոլիմիդե ճկուն տակդիրի էֆեկտիվ համակցումը բերել է սենսորի գազագազայինության բնութագրերի կայունության՝ բազմակի ճկումների նկատմամբ:
4. Ուլտրամանուշակագույն (ՈւՄ) ճառագայթների կիրառումը  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (80:20 կշռ. %) սենսորի ակտիվ մակերևույթին բերում է ՋՊԳ-ի նկատմամբ բարձր զգայունության (S~12-20)՝ հաստատված և՛ ռեզիստիվ, և՛ իմպեդանսային սպեկտրասկոպիայի (ԻՍ) մեթոդներով:
5. ԻՍ եղանակով հետազոտվող գազագազային նյութերի համար ընտրված համարժեք էլեկտրական շղթաները մեծապես համընկնում են հայտնի փորձարարական

արդյունքների հետ, որը արդարացնում է ԻՍ եղանակի կիրառումը գազային սենսորների հետազոտությունների համար:

### **Տպագրություններ**

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրվել են 13 գիտական հոդվածներում, ներկայացվել են 4 գիտաժողովների նյութերում և ձեռք են բերվել 3 արտոնագրեր: Տպագրված աշխատանքների ցուցակը բերված է ատենախոսության վերջում:

### **Աշխատանքի կառուցվածքը և ծավալը**

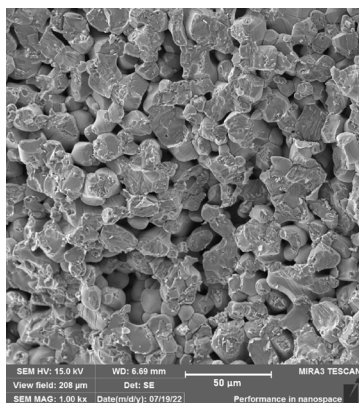
Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, 4 գլուխներից և գրականության ցանկից, որն իր մեջ ներառում է 136 հղում: Աշխատանքում առկա են 70 նկար, 3 աղյուսակ: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալն է 125 էջ:

### **Աշխատանքի բովանդակությունը**

**Ներածություն** մեջ ներկայացված են թեմայի արդիականությունը, աշխատանքի նպատակը, ստացված արդյունքների գիտական նորոյթը, գործնական արժեքը, ինչպես նաև բերված են պաշտպանությանը ներկայացվող հիմնական դրույթները:

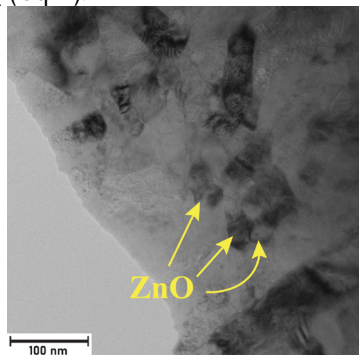
**Առաջին գլխում** ներկայացված են ժամանակակից կիսահաղորդչային գազային սենսորների տեսակները, դրանց կառուցվածքն ու առանձնահատկությունները: Մանրամասն ներկայացվել են սենսորներին բնութագրող կարևորագույն պարամետրերը, որոնցից են գազազգայունությունը, ընտրողունակությունը, արագագործությունը, կայունությունը և այլն: Բերված է նաև իմպեդանսային սպեկտրասկոպիկ հետազոտման մեթոդի նկարագիրը: Այստեղ ներկայացված են վերջին տարիներին տարբեր հետազոտողների կողմից առաջարկված սենսորների բնութագրերը և դրանց պատրաստման տեխնոլոգիական եղանակները:

**Երկրորդ գլխում** ներկայացված են նանոկոմպոզիտային գազազգայուն նյութերի սինթեզման և դրանց հիման վրա ռեգիստիվ սենսորների պատրաստման տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները: Այստեղ ներկայացված են նաև ստացված թաղանթների կազմաբանական, կառուցվածքային և բյուրեղական բնութագրերը: Ներկայացված է նաև սենսորների բնութագրերի չափման ռեգիստիվ և իմպեդանսային կայանքների նկարագիրը, ինչպես նաև մեր կողմից օգտագործված սենսորային տակդիրների կառուցվածքը: Մասնավորապես՝ պինդֆազային սինթեզման եղանակով պատրաստվել են  $Fe_2O_3:ZnO$  (80:20 կշ.%),  $Fe_2O_3:ZnO$  (60:40 մոլ.%),  $ZnO:La+1ատ. \%La$ ,  $ZnO+2ատ. \%La$  և  $SnO_2+1ատ. \%Co$  կիսահաղորդչային բազմակոմպոնենտ թիրախներ:  $Fe_2O_3:ZnO$  (80:20 կշ.%) թիրախի կազմաբանությունը ուսումնասիրվել է տեսաձրող էլեկտրոնային մանրադիտակով (SEU) (MIRA 3 LMH-Tescan), որի պատկերներից պարզ է դարձել, որ հետազոտվող նյութի ծակոտիների միջին չափսերը 5-10 մկմ կարգի են (Նկ. 1): Թիրախը ուսումնասիրվել է նաև EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) տարրային վերլուծության միջոցով, որը հաստատել է Fe, Zn և O տարրերի առկայությունը թիրախային նյութում:



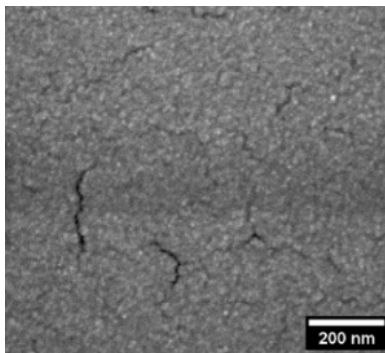
Նկ. 1  $Fe_2O_3:ZnO$  (80:20 կշռ.%) թիրախի ՏԷՄ պատկերը:

$Fe_2O_3:ZnO$  նյութի բյուրեղական կառուցվածքը վերլուծվել է նաև փոխանցող էլեկտրոնային մանրադիտակի (ՓԷՄ) միջոցով (EFTEM Jeol 2200 FS, JEOL Ltd, Tokyo, Japan) և հաստատվել է մասնիկների 15-30 նմ տրամագիծը, ինչպես նաև ZnO-ի հեքսագոնալ կառուցվածքը (Նկ. 2):

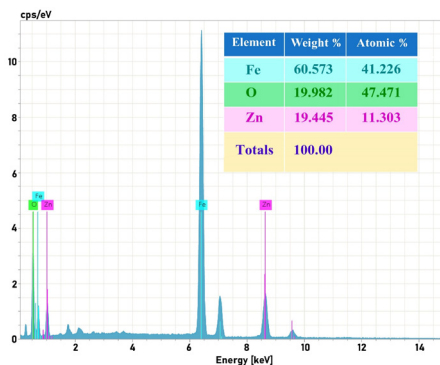


Նկ. 2  $Fe_2O_3:ZnO$  նյութի ՓԷՄ պատկերը:

Պինդֆազային սինթեզման եղանակով նստեցվել է նաև  $ZnO+1ատ. \%La$  պարունակությամբ թիրախ: Այս և տարբեր թիրախների սինթեզումից հետո կատարվել է նստեցում մագնետրոնային և էլեկտրոնաճառագայթային փոշեցրման եղանակների միջոցով: Մասնավորապես՝  $Fe_2O_3:ZnO$  (80:20 կշռ.%) թիրախից մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով նստեցվել է գազազգայուն թաղանթը, որի ՏԷՄ պատկերը ներկայացված է Նկ. 3-ում: Zn-ի իրական կոնցենտրացիաները թիրախային նյութում և թաղանթում համապատասխանաբար կազմել են 21.2 և 19.4 կշռ.՝ մի փոքր շեղվելով նախնական հաշվարկված արժեքից (20 կշռ.%)։ Ենթադրվում է, որ նման շեղումները պայմանավորված են չափիչ սարքերի և տեխնոլոգիական գործընթացների առանձնահատկություններով (Նկ. 4):



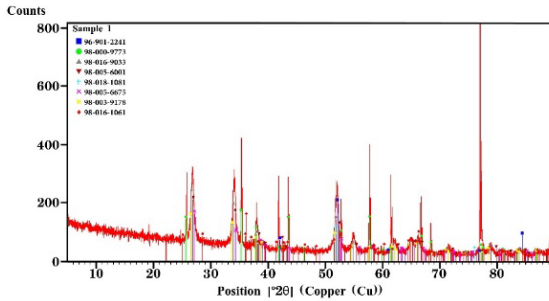
Նկ. 3  $Fe_2O_3:ZnO$  (80:20 կշռ.%) թաղանթի ՏՀՄ պատկերը:



Նկ. 4  $Fe_2O_3:ZnO$  (80:20 կշռ.%) թաղանթի փարրային անալիզի (EDX) արդյունքները:

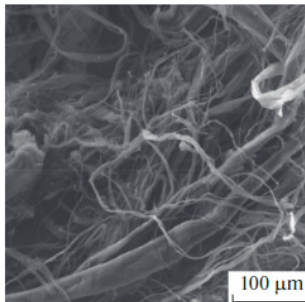
Մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով ստացվել են նաև  $Fe_2O_3:ZnO$  (60:40 մոլ.%) և  $SnO_2+1$ ատ.%Co թաղանթները: Էլեկտրոնաճառագայթային նստեցման եղանակով ճկուն տակդիրի վրա նստեցվել է ԲԱՆԽ: $SnO_2$  (5:95 կշռ.%) թաղանթ ( $SnO_2$ -ի փոշու հետ խառնված ԲԱՆԽ-ներ, Nanoshel-UK Ltd., արտաքին տրամագիծը՝ ~80-100 նմ, երկարությունը՝ ~3-8 մկմ, մաքրությունը՝ 99%), որի հաստությունը (180 նմ) չափվել է Alpha-Step D-300 (KLA Tencor) պրոֆիլոմետրի միջոցով:

Ատենախոսության շրջանակներում նանոկառուցվածքային թաղանթներ պատրաստվել են ոչ միայն ֆիզիկական նստեցման եղանակով (PVD), այլ նաև տարատեսակ քիմիական եղանակներով (CVD): Մասնավորապես՝ պատրաստվել են 75:25 կշռ.%  $SnO_2$ /ԲԱՆԽ և ԲԱՆԽ/ $SnO_2$  (1:600) բաղադրությամբ թաղանթները: 75:25 կշռ.%  $SnO_2$ /ԲԱՆԽ (Nanoshel-UK Ltd UK,  $SnO_2$ -ի փոշու հատիկի տրամագիծը՝ 20-40 նմ, ԲԱՆԽ-ի տրամագիծը՝ 10-30 մկմ, ԲԱՆԽ-ի երկարությունը՝ 100-900 մկմ) թաղանթը նստեցվել է 130 մկմ հաստությամբ ճկուն պոլիմիդային թիթեղի վրա՝ ցենտրիֆուգման եղանակով (Centrifug-Laurell WS-650HZB-23NPPB): Հանվել է  $SnO_2$ :ԲԱՆԽ նյութի ռենտգենյան պատկերը՝ Empyrean ( $\lambda$  CuK $\alpha$ ), Malvern Panalytical կայանքի միջոցով (Նկ. 5), որտեղ առկա են Sn-ի և C-ի պիկերը:



Նկ. 5 SnO<sub>2</sub>:ԲԱՆՍՒ (75:25 կշռ.%) թաղանթի ռենտգենյան պատկերը:

ԲԱՆՍՒ/SnO<sub>2</sub> (1:600) նանոկոմպոզիտային բաղադրությունը ստացվել է հիդրոջերմային սինթեզման եղանակով: Որպես սենսորային տակդիր օգտագործվել են բազմասենսորային հարթակներ (TESLA BLATNA, Չեխիա), որոնց վրա նախօրոք պատրաստվել են պլատինե սանրածն էլեկտրոդներ, ջեռուցիչ և ջերմաստիճանային սենսոր (Pt 1000): Հանվել է մաքուր ԲԱՆՍՒ-ների ՏԷՄ պատկերը (Նկ. 6), որտեղ ակնհայտ է նանոխողովակների առկայությունը:

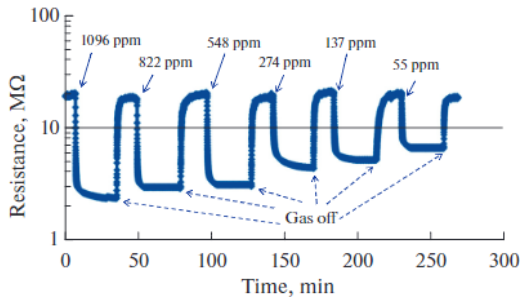


Նկ. 6 ԲԱՆՍՒ-ների ՏԷՄ պատկերը:

**Երրորդ գլխում** ռեզիստիվ եղանակով մանրամասն ուսումնասիրվել են պատրաստված սենսորների պարամետրերը ջրածնի, ամոնիակի, ացետոնի, էթանոլի, հեղուկացված նավթային գազի և ջրածնի պերօքսիդի գոլորշիների նկատմամբ: Մասնավորապես՝ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO (60:40 մոլ.%) սենսորը 250°C աշխատանքային ջերմաստիճանում բարձր զգայունություն է ցուցաբերել ամոնիակի ցածր կոնցենտրացիաների նկատմամբ (27 ppm՝ S=2, 14 ppm՝ S=1.5): Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO սենսորի դիմադրության փոփոխությունը չափվել է ամոնիակի գոլորշու տարբեր կոնցենտրացիաների նկատմամբ՝ 250°C աշխատանքային ջերմաստիճանում (Նկ. 7): Սենսորը ցույց է տվել գրեթե ամբողջությամբ վերականգնելի արձագանքման-վերականգնման բնութագրեր: Արձագանքման և վերականգնման ժամանակները չեն գերազանցել մի քանի տասնյակ վայրկյանները: Սենսորը գրեթե ամբողջությամբ վերականգնվում է նոյնիսկ ամոնիակի կոնցենտրացիաների բավական բարձր արժեքների դեպքում (~1096 ppm): Արձագանքման և վերականգնման նմանատիպ

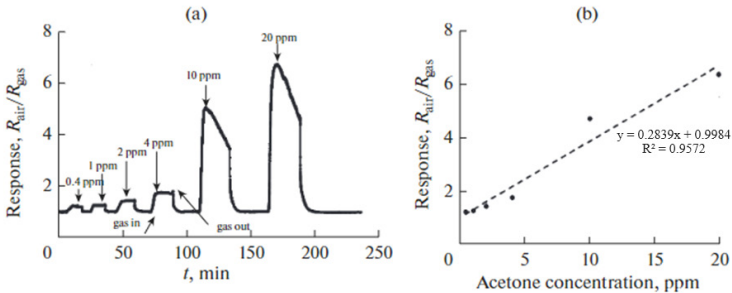


բնութագրերը պայմանավորված են 250°C աշխատանքային ջերմաստիճանով, որի դեպքում ֆիզիկաքիմիական պրոցեսների ակտիվացիայի համար ստացվում են ադսորբցիայի և դեսորբցիայի բավարար էներգիաներ:



Նկ. 7  $Fe_2O_3:ZnO$  սենսորի դիմադրության փոփոխությունն ամոնիակի գոլորշիների փարբեր կոնցենտրացիաների նկատմամբ 250°C աշխատանքային ջերմաստիճանում:

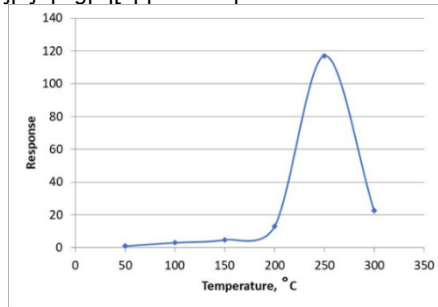
Ուսումնասիրվել է  $Fe_2O_3/SnO_2$  (1:600) նանոկոմպոզիտային սենսորի զգայունությունը ացետոնի գոլորշիների նկատմամբ: Առավելագույն արձագանքը դիտվել է 250°C աշխատանքային ջերմաստիճանում, որի դեպքում ացետոնի գոլորշու 20 ppm-ի կոնցենտրացիայի դեպքում սենսորի դիմադրությունը փոխվել է 7.4 անգամ:  $Fe_2O_3/SnO_2$  սենսորի արձագանքը չափվել է ացետոնի գոլորշու տարբեր կոնցենտրացիաների նկատմամբ 250°C աշխատանքային ջերմաստիճանում (Նկ. 8a):  $Fe_2O_3/SnO_2$  սենսորի դիմադրությունը նույնիսկ 400 ppb կոնցենտրացիայի նկատմամբ փոխվել է 1.2 անգամ: Հավելենք, որ սենսորի արձագանքի կախվածությունը ացետոնի գոլորշու կոնցենտրացիայից գծային է (Նկ. 8b), ինչը թույլ է տալիս զգայունության արժեքների մոտարկում ներկայացված կոնցենտրացիաների հարակից տիրույթներում:



Նկ. 8  $Fe_2O_3/SnO_2$  սենսորի արձագանքը ացետոնի գոլորշու փարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում (400 ppb- 20 ppm) (a) և սենսորի արձագանքի կախվածությունը ացետոնի գոլորշու կոնցենտրացիայից (b):

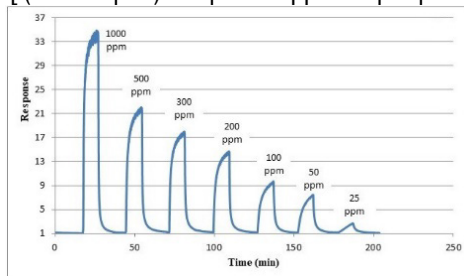
Էթանոլի գոլորշիների հայտնաբերման համար պատրաստվել է  $ZnO+1\text{ատ.}\%La$  կառուցվածքով սենսոր: 250°C աշխատանքային ջերմաստիճանում հետազոտվել է  $ZnO<La>$  սենսորի արձագանքը էթանոլի գոլորշիների տարբեր կոնցենտրացիաների

համար (Նկ. 9): Սենսորը հայտնաբերել է էթանոլի գոլորշիներ սկսած 0.7 ppm կոնցենտրացիայից, իսկ ավելի բարձր կոնցենտրացիաների դեպքում (34 ppm) սենսորի արձագանքը հասել է ավելի քան 19-ի: ZnO+1ատ.%La սենսորի արձագանքը կախված կոնցենտրացիայից եղել է գրեթե զծային և ցուցաբերել է կրկնելի վարքագիծ՝ 6.7 ppm էթանոլի կոնցենտրացիայի յոթ ցիկլերի համար:



Նկ. 9 ZnO<La> սենսորի արձագանքը փարբեր ջերմաստիճաններում՝ 675 ppm էթանոլի գոլորշիների նկատմամբ:

Պատրաստվել են նաև տարբեր կառուցվածքներով ջրածնի սենսորներ: Մասնավորապես՝ ԲԱՆԽ:SnO<sub>2</sub> (5:95 կշռ.%) կառուցվածքով ճկուն սենսորը, որը զգայունության առավել մեծ արժեքներ, ինչպես նաև արձագանքման և վերականգման համեմատաբար փոքր ժամանակներ է ցուցաբերել սկսած 100°C ջերմաստիճանից: Սենսորի զգայունության բնութագրերը բավականին մոտ են եղել 100°C և 150°C ջերմաստիճաններում, սակայն 150°C ջերմաստիճանի դեպքում սենսորի արձագանքը մոտավորապես 1.6 անգամ ավելի մեծ է եղել, քան 100°C-ում: Քանի որ այս երկու ջերմաստիճաններում արձագանքման արժեքները էականորեն տարբեր չեն, և ավելի բարձր աշխատանքային ջերմաստիճանում էներգիայի սպառումը բավական մեծ է (535 Վտ՝ 100°C և 980 Վտ՝ 150°C-ում), նախընտրելի է եղել դիտարկել 100°C-ը որպես աշխատանքային ջերմաստիճան: Արդյունքները ցույց են տվել, որ սենսորը զգալի արձագանք է ցուցաբերել (2.5 անգամ) անգամ 25 ppm H<sub>2</sub>-ի նկատմամբ (Նկ. 10):



Նկ. 10 ԲԱՆԽ:SnO<sub>2</sub> (5:95 կշռ. %) ճկուն սենսորի արձագանքը ջրածնի փարբեր կոնցենտրացիաների նկատմամբ՝ 100°C աշխատանքային ջերմաստիճանում:

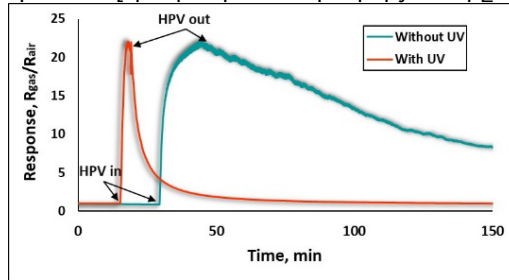
Հատկանշական է, որ ինչպես մաքուր SnO<sub>2</sub>-ի, այնպես էլ մաքուր ԲԱՆԽ-ների վրա հիմնված սենսորներն ունեն չափազանց թույլ զգայունություն H<sub>2</sub>-ի նկատմամբ:

Նախնական ուսումնասիրություններ են իրականացվել սենսորի ճկման հատկությունները ուսումնասիրելու համար: Սենսորի զգայունությունը գրեթե կախված չի եղել ճկումների քանակից և ճկման աստիճանից:

Պատրաստվել է նաև  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (60:40 կշն.%) կառուցվածքով ջրածին հայտնաբերող սենսոր: Սենսորը ջրածնի նկատմամբ զգայունություն է ցուցաբերել արդեն  $50^\circ\text{C}$  ջերմաստիճանում ունենալով 1000-ից բարձր արձագանքման արժեք: Ամենաբարձր զգայունությունը դիտվել է  $100^\circ\text{C}$  աշխատանքային ջերմաստիճանում, որի դեպքում գազի ազդեցությունը հանգեցրել է գազազգայուն թաղանթի դիմադրության նվազման ավելի քան 5000 անգամ:  $200^\circ\text{C}$  աշխատանքային ջերմաստիճանում հետազոտվել է  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  սենսորի զգայունությունը ջրածնի 75-2000 ppm կոնցենտրացիաների նկատմամբ (75 ppm ջրածնի կոնցենտրացիայի դեպքում սենսորի դիմադրությունը փոխվել է ավելի քան 11 անգամ):

Ջրածնի պերօքսիդի գոլորշիներ հայտնաբերելու նպատակով պատրաստվել են մի շարք սենսորներ: Մասնավորապես՝  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (80:20 կշն.%) կառուցվածքով գազազգայուն թաղանթը ցուցաբերել է զգայունություն անգամ ջրածնի չափազանց ցածր կոնցենտրացիաների նկատմամբ: Հետազոտություններ են կատարվել  $25-250^\circ\text{C}$  ջերմաստիճաններում պերօքսիդի գոլորշիների 3-225 ppm կոնցենտրացիաների դեպքում: Դիտվել է սենսորի չափազանց բարձր զգայունություն նույնիսկ առանց ՈւՄ ճառագայթների ազդեցության: Արձագանքի ջերմաստիճանային կախվածության կորում առավելագույն զգայունությունը դիտվել է  $150^\circ\text{C}$ -ում, որի դեպքում արձագանքման արժեքը գերազանցել է 2600-ը: Սենսորը բավարար զգայունություն է ունեցել նույնիսկ սենյակային ջերմաստիճանում ( $S=23$ ), ինչը ապացուցում է քիմսորբցիոն երևույթների առկայությանը առանց լրացուցիչ ջերմային ազդեցության: Չնայած սենյակային ջերմաստիճանում սենսորի արձագանքի առկայությանը, այստեղ արձագանքման և վերականգնման ժամանակները գերազանցել են տասնյակ րոպաները՝ ցույց տալով այս ջերմաստիճանում սենսորի բավականին անարդյունավետ աշխատանքը, մինչդեռ ավելի բարձր ջերմաստիճաններում ( $>200^\circ\text{C}$ ) դրանք վայրկյանների կարգի են եղել: Այս վարքագիծը կանխատեսելի է, քանի որ քիմիական ռեակցիաների և գազի դիֆուզիայի տեմպերը հակված են աճել ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց: Սենսորի արձագանքման/վերականգնման ժամանակները և աշխատանքային ջերմաստիճանը նվազեցնելու ամենատարածված ու արդյունավետ միջոցներից է հանդիսանում նրա ակտիվ մակերևույթը ՈւՄ ճառագայթների ազդեցության ենթարկելը: ՈւՄ ազդեցությամբ  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  սենսորի արձագանքները գրանցվել են տարբեր ջերմաստիճաններում ( $25-250^\circ\text{C}$ )՝ ՋՊԳ-ի 1.5 ppm կոնցենտրացիայի համար: Սենյակային ջերմաստիճանից սկսած սենսորի արձագանքը նվազել է, իսկ  $200^\circ\text{C}$ -ից՝ դարձել է որոշակիորեն կայուն, ինչը միանշանակ թույլ է տվել որպես աշխատանքային ջերմաստիճան ընտրել հենց սենյակայինը: Ենթադրվում է, որ ՈւՄ ճառագայթների առկայությունը բարենպաստ պայմաններ է ստեղծում գազի ադսորբցիայի և ցանցի հետ հետագա փոխազդեցության համար, իսկ ՈւՄ ճառագայթների կիրառումը տաքացման հետ միասին հանգեցնում է ՋՊԳ-ի դետորբցիայի արագության աճին՝ միևնույն ժամանակ առաջացնելով քիմիական ռեակցիաների տեմպի զգալի աճ: Ավելին, առանց լրացուցիչ տաքացման, թաղանթի մակերևույթին ՈւՄ ճառագայթների առկայությունը բավարար է թե՛  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , և թե՛  $\text{ZnO}$

Նյութերի հաղորդականության գոտիներում ազատ էլեկտրոնների առաջացման համար, ինչը հանգեցնում է նանոհատիկների միջև Շոտկիի արգելքների նվազման: Սենսորը ցուցաբերել է գրեթե նույն արձագանքը սենյակային ջերմաստիճանում ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությամբ և առանց դրանց, համապատասխանաբար 3 և 225 ppm ՋՊԳ-ի կոնցենտրացիաների համար (Նկ. 11): ՈւՄ ճառագայթի առկայությունը սենսորի մակերևույթին ոչ միայն հանգեցրել է սենսորի արձագանքի զգալի բարելավմանը, այլև ավելացրել է արձագանքման և վերականգնման արագությունները:

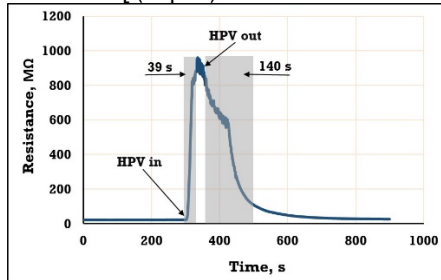


Նկ. 11  $Fe_2O_3:ZnO$  (80:20 կշ. %) սենսորի արձագանքման կորերը ՋՊԳ-ի 3 և 225 ppm կոնցենտրացիաների համար համապատասխանաբար ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությամբ և առանց դրանց:

Ենթադրվում է, որ ՈւՄ ճառագայթման արդյունքում առաջացած էլեկտրոն-խոռոչ զույգերը ինտենսիվորեն մասնակցում են կիսահաղորդչի մակերևույթին տեղի ունեցող քիմսորբցիոն գործընթացներին և զուգահեռաբար դրանք խթանում են նաև քիմիական ռեակցիաներում էլեկտրոնների փոխանակման արագությանը [1]:

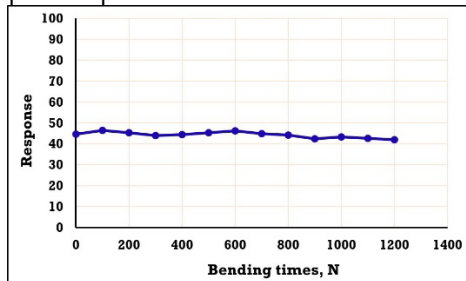
Ճկուն պոլիմիդե տակդիրի վրա պատրաստվել է նաև ՋՊԳ հայտնաբերող  $SnO_2$ /ԲԱՆԽ (75:25 կշ.%) կառուցվածքով սենսոր: Սենսորի արձագանքը ՋՊԳ-ի 1.5 ppm կոնցենտրացիայի նկատմամբ չափվել է 25–150°C ջերմաստիճանային միջակայքում՝ ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությամբ և առանց դրանց: Առավելագույն արձագանքները եղել են 428 և 410, որոնք դիտվել են համապատասխանաբար 75 և 125°C ջերմաստիճաններում: Հաշվի առնելով, որ սենսորի արձագանքի արժեքը սենյակային ջերմաստիճանում հասել է 44-ի, մինչ ճկուն տակդիրի դեպքում ցանկալի չէ այն տաքացնել, որպես սենսորի աշխատանքային ջերմաստիճան ընտրվել է սենյակայինը՝ ՈւՄ ազդեցությամբ: Ինչպես և նախորդ ՋՊԳ-ի սենսորի դեպքում  $SnO_2$ :ԲԱՆԽ կառուցվածքը ավելի ցածր կոնցենտրացիաների համար (1.5–20 ppm) ցուցաբերել է արձագանքի գծայնություն: Պատրաստվել են նաև մաքուր անագի օքսիդի և մաքուր ԲԱՆԽ-ների վրա հիմնված սենսորներ՝ համեմատելու գազազգայնության բնութագրերը  $SnO_2$ :ԲԱՆԽ նանոկոմպոզիտային նյութի հետ: Երկու սենսորներն էլ չափազանց ցածր զգայունություն են ցուցաբերել ՋՊԳ-ի նկատմամբ, ինչը արդարացնում է ԲԱՆԽ-ների ներմուծումը  $SnO_2$ -ի մեջ: Ածխածնի նանոխողովակները մեծացնում են գազազգայուն նյութի էֆեկտիվ մակերեսը (որը բերում է զգայունության աճին), օժտում են նյութին բարձր ճկունությամբ, իսկ դրանցում լիցքակիրների բարձր շարժունակության շնորհիվ մեծանում է նաև սենսորի արագագործությունը [2]: Որպես սենսորի արագագործության արտացոլում, սենյակային ջերմաստիճանում ստացվել է  $SnO_2$ :ԲԱՆԽ սենսորի դինամիկ

արձագանքման/վերականգնման կորերը՝ ՋՊԳ-ի 3 ppm կոնցենտրացիայի համար: Սենսորի արձագանքման և վերականգնման ժամանակները կազմել են համապատասխանաբար 39 և 140 վ (Նկ. 12):



Նկ. 12 SnO<sub>2</sub>:FU (75:25 կշռ. %) սենսորի դիմադրության փոփոխությունը՝ ՋՊԳ-ի 3 ppm կոնցենտրացիայի դեպքում:

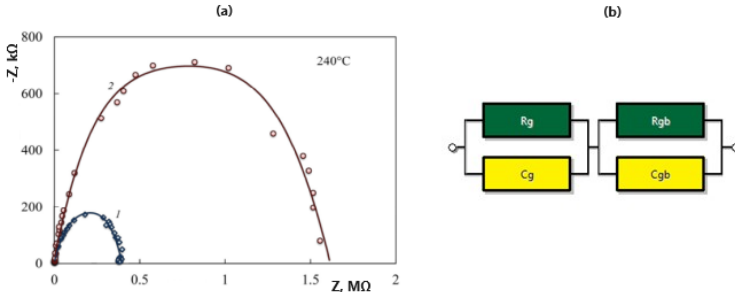
Զգայուն թաղանթի մեխանիկական և քիմիական կայունությունը ու դրանցից կախված սենսորի այլ պարամետրերի կայունությունը ստուգվել է ճկուն տակդիրը բազմակի անգամ ենթարկելով ճկումների՝ 90 աստիճանով: Ինչպես ցույց է տրված Նկ. 13-ում, իրականացվել են ճկման 13 փորձարկում՝ ավելացնելով սենսորի ճկումների թիվը՝ 0-ից մինչև 1200: Այսպիսով փորձնականորեն հաստատվել է սենսորի արձագանքի բարձր կայունությունը ճկման նկատմամբ:



Նկ. 13 SnO<sub>2</sub>:FU (75:25 կշռ.%) ճկուն սենսորի արձագանքի սենսորի բազմակի ճկումների դեպքում:

**Չորրորդ գլխում** ներկայացված են սենսորների պարամետրերի ԻՍ եղանակով հետազոտման արդյունքները: ԻՍ եղանակով բացահայտվել են սենսորների զգայունության որոշակի մեխանիզմներ և դրանց հնարավոր ազդեցությունը գազազգայունության պարամետրերի վրա: Հաստատուն հոսանքով՝ միայն ռեզիստիվ եղանակով չափումները տեղեկատվություն են տալիս սենսորի զգայունության, ընտրողականության, արձագանքման և վերականգնման ժամանակների մասին, մինչ փոփոխական հոսանքով չափումները թույլ են տալիս պատկերացում կազմել ծավալային և մակերևութային վիճակների, հատիկների սահմանների, ձևավորված Շոտկի արգելքների մասին: Այս եղանակը թույլ է տալիս գնահատել սենսորի երկրաչափական չափերի և ձևի ազդեցությունը գազազգայունության պարամետրերի վրա [3]: ԻՍ

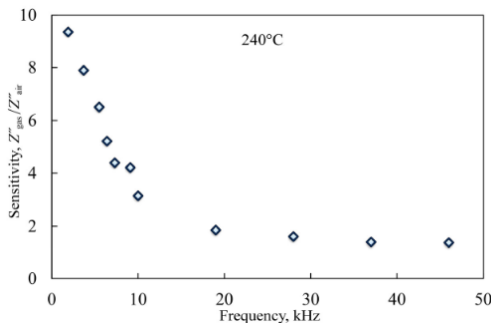
եղանակով հետազոտվել են մի շարք սենսորներ, որոնցից է  $ZnO+1\text{ատ.}\%La$  կառուցվածքով ՋՊԳ-ի սենսորը: Չափումները կատարվել են ինչպես օդում, այնպես էլ 100 ppm ՋՊԳ-ի առկայության պայմաններում՝  $240^\circ\text{C}$  ջերմաստիճանում (այս ջերմաստիճանը ընտրվել է նախօրոք կատարված ՎԱ բնութագրերի հետազոտության արդյունքում), որոնք ներկայացված են Նկ. 14a-ում՝ Նայքվիստի կորերի տեսքով:



Նկ. 14  $ZnO+1\text{ատ.}\%La$  սենսորի Նայքվիստի դիագրամը օդում (1) և ՋՊԳ-ի ազդեցությամբ (2) (a) ու սենսորի համար ընտրված համարժեք էլեկտրական շղթան (b):

Ստացված Նայքվիստի կորերի ձևը հուշում է, որ ուսումնասիրվող կառուցվածքը կարող է մոդելավորվել զուգահեռ RC շղթաներ պարունակող համարժեք շղթայի միջոցով (Նկ. 14b), որոնք բնութագրում են լիցքերի տեղափոխման երկու պրոցեսներ՝ հատիկների ծավալում և միջհատիկային սահմաններում:

Իմպեդանսային սպեկտրոսկոպիայի եղանակով ուսումնասիրելիս սենսորի զգայունությունը սահմանվել է որպես ՋՊԳ-ի ազդեցությամբ և օդում ստացված կոմպլեքս դիմադրությունների կեղծ բաղադրիչների արժեքների հարաբերություն: Արդյունքները ցույց են տվել, որ այս կերպ որոշված զգայունությունը կախված է հաճախությունից (Նկ. 15):



Նկ. 15  $ZnO+1\text{ատ.}\%La$  սենսորի զգայունության կախվածությունը հաճախությունից՝ որոշված իմպեդանսային սպեկտրոսկոպիայի մեթոդով:

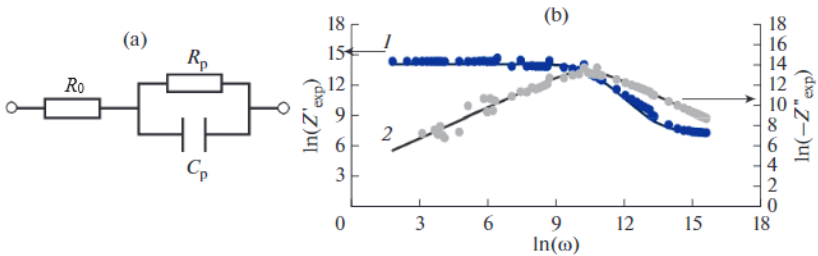
Ինչպես երևում է Նկ. 15-ից ցածր հաճախություններում զգայունությունը ՋՊԳ-ի նկատմամբ զգալիորեն ավելի բարձր է, քան բարձր հաճախությունների դեպքում:

Հետևաբար, ենթադրվում է, որ գազազգայնության մեջ հիմնական ներդրումը տալիս են մակերևութային երևույթներով պայմանավորված պրոցեսները:

ԻՍ եղանակով հետազոտվել է նաև ZnO+2ատ.%La սենտրի գազազգայնության հատկությունները՝  $1-10^6$  Հց հաճախության միջակայքում: Իմպեդանսի իրական և կեղծ մասերի հաճախային կախվածությունները թույլ են տվել ենթադրել, որ սենտրի կառուցվածքը կարելի է նկարագրել Նկ. 16a-ում ներկայացված համարժեք էլեկտրական շղթայի տեսքով, որոնց համար իմպեդանսի իրական և կեղծ բաղադրիչները հաշվարկվում են հետևյալ բանաձևերով՝

$$Z'(\omega) = R_0 + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}; \quad (1)$$

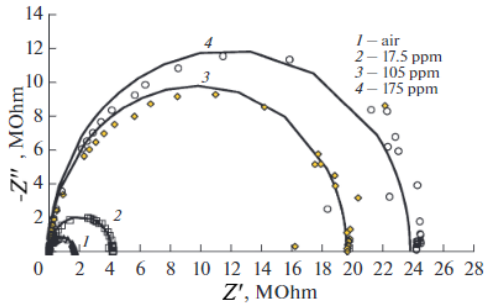
$$Z''(\omega) = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}; \quad (2)$$



Նկ. 16 ZnO+2ատ.% La սենտրային կառուցվածքի համար առաջարկվող համարժեք էլեկտրական շղթան (a) և 200°C ջերմաստիճանում փորձարարական (կետեր) և տեսականորեն հաշվարկված (հոծ գծեր) հաճախային կախվածությունները՝ իմպեդանսի իրական և կեղծ մասերի համար (b):

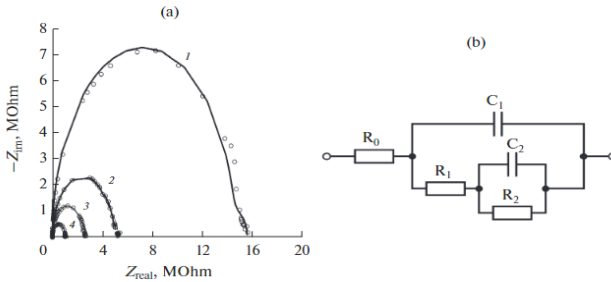
Նկ. 16b-ում ներկայացված փորձնական և տեսական մեթոդներով հաշվարկված տվյալները բավական մոտ են (վերադրում), ինչը ապացուցում է ZnO+2ատ.%La սենտրային կառուցվածքի համար ընտրված համարժեք էլեկտրական շղթայի ճշմարտացիությունը՝ տեղի ունեցող պրոցեսները նկարագրելու համար:

Ուսումնասիրվել է նաև ՋՊԳ-ի տարբեր կոնցենտրացիաների (17.5-350 ppm) ազդեցությունը ZnO+2ատ.%La սենտրի իմպեդանսային բնութագրերի վրա, որոնք ներկայացված են Նկ. 17-ում Նայքվիստի կորերի տեսքով: Ինչպես երևում է, թիրախային գազի կոնցենտրացիայի ավելացումը հանգեցնում է Նայքվիստի կիսաշրջանի շառավղի մեծացմանը, ինչը նշանակում է  $R_p$ -ի արժեքի մեծացում, իսկ իմպեդանսի կեղծ մասի առավելագույն պիկին համապատասխանող հաճախությունը շեղվում է դեպի ավելի ցածր հաճախությունների տիրույթ: Օգտագործելով համարժեք էլեկտրական շղթայի պարամետրերի համար ստացված արժեքները, կառուցվել են մոտարկող կորեր: Փորձնական և մոտարկող կորերը եղել են բավական վերադրելի:



Նկ. 17 ZnO+2ապր.% La թաղանթի Նայքվիստի կորերը, ՋՊԳ-ի փարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում՝ 175°C աշխատանքային ջերմաստիճանում: Կետերը ներկայացնում են փորձարարական տվյալները, հոծ գծերը՝ տեսական:

ԻՍ եղանակով հետազոտվել է ԲԱՆԽ/ՏnO<sub>2</sub> սենսորի զգայունությունն ացետոնի գոլորշու տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում (4, 10 և 20 ppm)՝ 250°C աշխատանքային ջերմաստիճանում (Նկ. 18a) և առաջարկվել է համարժեք էլեկտրական շղթա (Նկ. 18b):



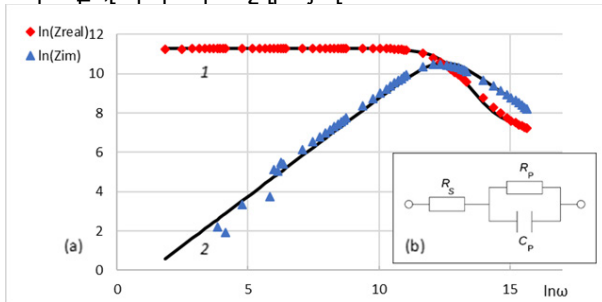
Նկ. 18 ԲԱՆԽ/ՏnO<sub>2</sub> սենսորի Նայքվիստի կորերը (օդ (1), 4 ppm (2), 10 ppm (3), 20 ppm (4)) 250°C աշխատանքային ջերմաստիճանում (a) և առաջարկվող համարժեք էլեկտրական շղթան (b):

ZMAN 2.3 ծրագրային փաթեթի միջոցով որոշվել են առաջարկվող համարժեք էլեկտրական շղթայի տարրերի պարամետրերը և կառուցվել են մոտարկող կորերը: Նկատվել է բավական բարձր վերադրելիություն փորձնական և մոտարկող կորերի կախվածությունների միջև:

Պատրաստվել է նաև Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO (80:20 կշռ.%) սենսորը, որի բնութագրերն ուսումնասիրվել են ԻՍ միջոցով՝ 1–10<sup>6</sup> Հց հաճախության միջակայքում և 300 մՎ ամպլիտուդով սինուսոիդալ ազդանշանի դեպքում՝ 1 Վ շեղման լարման առկայությամբ: Իմպեդանսի չափումները կատարվել են օդում և 100 ppm ՋՊԳ-ի առկայության պայմաններում՝ սենյակային ջերմաստիճանից մինչև 200°C աշխատանքային ջերմաստիճան: Ստացված բնութագրերի արդյունքները (Նկ. 19a)՝ մասնավորապես կեղծ բաղադրիչի հաճախային կախվածության մեկ պիկի առկայությունը թույլ է տվել



ենթադրել, որ ուսումնասիրվող կառուցվածքը կարելի է նկարագրել Նկ. 19b-ում ներկայացված համարժեք էլեկտրական շղթայով:

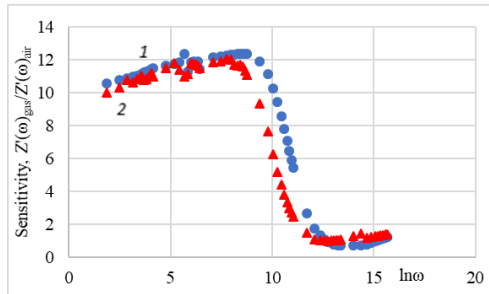


Նկ. 19 200°C ջերմաստիճանում  $Fe_2O_3:ZnO$  սենսորի իմպեդանսի իրական (1) և կեղծ (2) բաղադրիչների փորձարարական (կետեր) և տեսական մեթոդներով հաշվարկված (գծեր) արժեքների հաճախային կախվածությունները (a) և զգայուն կառուցվածքի համար առաջարկված համարժեք էլեկտրական շղթան (b) :

ZMAN 2.3 ծրագրային փաթեթի միջոցով հաշվարկվել են համարժեք էլեկտրական շղթայի տարրերի պարամետրերը: Փորձարարական և մոտարկող կորերի միջև նկատվել է լավ համաձայնություն, ինչը ապացուցում է ընտրված էլեկտրական շղթայի ճիշտ համարժեքությունը՝ պատրաստված սենսորային կառուցվածքում տեղի ունեցող պրոցեսները նկարագրելու համար:

Ստացված տվյալները ցույց են տվել, որ ինչպես սենսորի տաքացման, այնպես էլ ՋՊԳ-ի ազդեցության դեպքում հիմնական փոփոխություն կրողը  $R_p$  ակտիվ դիմադրությունն է, որը, հավանաբար բնութագրում է գազազգայուն  $Fe_2O_3:ZnO$  թաղանթը: Ինչպես նախորդ  $ZnO+2\text{ատ.}\%La$  սենսորի համարժեք էլեկտրական շղթայի  $R_0$  և  $C_p$  պարամետրերի դեպքում, այնպես էլ այստեղ  $R_s$  դիմադրությունը չի ենթարկվում ջերմաստիճանային կամ գազի ազդեցության (այն հաստատվել է դատարկ տակդիրի իմպեդանսը չափելիս)՝ ինչը ենթադրաբար պայմանավորված է միացման լարերի և հպակների ակտիվ դիմադրության հետ, իսկ  $C_p$ -ն առաջացել է հավանաբար տակդիրի մակաբուծային ունակությամբ:

$Fe_2O_3:ZnO$  սենսորի զգայունությունը որոշվել է որպես թիրախային գազի ազդեցությամբ և օդում չափված կոմպլեքս դիմադրությունների իրական բաղադրիչների հարաբերություն: Այս կերպ որոշված՝ հաճախությունից կախված սենսորի զգայունությունը ներկայացված է Նկ. 20-ում: Սենսորը, ինչպես մինչև 200°C տաքացնելիս, այնպես էլ սենյակային ջերմաստիճանում ՈւՄ ճառագայթների ազդեցության ենթարկելիս ցուցաբերել է նույն առավելագույն արձագանքման արժեքը՝ 100 ppm ՋՊԳ-ի դեպքում: ՈւՄ ճառագայթների առկայությամբ, հաճախությունը, որի դեպքում նկատվել է սենսորի առավելագույն զգայունությունը, շեղվել է դեպի ավելի բարձր հաճախությունների տիրույթ: Սա նշանակում է, որ սենսորի առավելագույն զգայունությունը գրանցելու համար անհրաժեշտ է ընտրել համապատասխան աշխատանքային հաճախությունների ճիշտ միջակայք:



Նկ. 20  $Fe_2O_3:ZnO$  սենսորի զգայունության կախվածությունը հաճախությունից՝ սենյակային ջերմաստիճանում և ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությամբ (1) և  $200^\circ C$  ջերմաստիճանում՝ առանց ՈւՄ ճառագայթների ազդեցության (2):

**Եզրակացությունների** մասում ամփոփված են ատենախոսության կարևորագույն արդյունքներն ու եզրահանգումները:

1. Առկա, լաբորատոր մակարդակում գտնվող այլ հեղինակների կողմից առաջարկված սենսորների բնութագրերի ուսումնասիրումը ցույց է տվել, որ դրանք ամբողջությամբ չեն բավարարում ներկայացվող պահանջներին և դեռևս լավարկման կարիք ունեն:
2. Գազազգայուն նյութերի սինթեզման պինդֆազային եղանակի միջոցով պատրաստվել են  $Fe_2O_3:ZnO$  (80:20 կշն.%),  $Fe_2O_3:ZnO$  (60:40 մոլ.%),  $ZnO:La+1ատ. \%La$ ,  $ZnO+2ատ. \%La$  և  $SnO_2+1ատ. \%Co$  կիսահաղորդչային բազմակոմպոնենտ թիրախներ:
3. Պատրաստված թիրախներից մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով նստեցվել և բնութագրվել են  $Fe_2O_3:ZnO$ ,  $ZnO:La$  և  $SnO_2<Co>$  գազազգայուն նանոկառուցվածքային թաղանթները:
4. Էլեկտրոնաճառագայթային փոշեցրման եղանակով նստեցվել և հետազոտվել է  $PdNiCu:SnO_2$  (5:95 կշն.%) գազազգայուն բարակ թաղանթը:
5. Քիմիական եղանակով պատրաստվել և հետազոտվել են  $SnO_2/PdNiCu$  (75:25 կշն.%) և  $PdNiCu/SnO_2$  (1:600) գազազգայուն նանոկոմպոզիտային նյութերը:
6. Գազազգայունության պարամետրերի չափման համար կիրառվող համակարգերը հագեցած են արդի չափիչ և կառավարող բաղադրիչներով, որոնցով ստացվել են ճշգրիտ և վերարտադրելի փորձարարական արդյունքներ:
7.  $Fe_2O_3:ZnO$  (60:40 մոլ.%) նյութի հիման վրա պատրաստված սենսորը  $250^\circ C$  աշխատանքային ջերմաստիճանում ցուցաբերել է զգայունություն ամոնիակի չափազանց ցածր կոնցենտրացիաների նկատմամբ (27 ppm՝  $S=2$ , 14 ppm՝  $S=1.5$ ):
8.  $Fe_2O_3+0.1ատ. \%Sn$  սենսորը  $250^\circ C$  աշխատանքային ջերմաստիճանում ցուցաբերել է զգայունություն սկսած 22 ppm ագետոնի կոնցենտրացիայից, իսկ 450 ppm-ի դեպքում՝  $S=4.2$ :  $PdNiCu/SnO_2$  (1:600) սենսորը 20 ppm ագետոնի գոլորշու նկատմամբ ցուցաբերել է բավարար զգայունություն՝  $250^\circ C$  աշխատանքային ջերմաստիճանում (20 ppm՝  $S=7.4$ , 400 ppb՝  $S=1.2$ ):
9. Պատրաստված  $ZnO+1ատ. \%La$  սենսորի արձագանքը  $250^\circ C$  աշխատանքային ջերմաստիճանում էթանոլի 0.7-ից մինչև 34 ppm կոնցենտրացիաների տիրույթում

- հասել է ավելի քան 117-ի , իսկ արծազանքման և վերականգնման ժամանակները եղել են համապատասխանաբար 14 և 60 վայրկյանների:
10.  $\text{SnO}_2:\text{Nb}_2\text{O}_5$  (80:20 կշռ.%) սենսորի արծազանքը 15000 ppm ՀՆԳ-ի նկատմամբ 300°C-ում եղել է մոտ 15%՝ առանց ՈւՄ ճառագայթների ազդեցության, իսկ ՈւՄ ճառագայթների դեպքում հասել է ավելի քան 22%-ի:
  11.  $\text{FALH}:\text{SnO}_2$  (5:95 կշռ.) և  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (60:40 կշռ.%) սենսորները արծազանք են ցուցաբերել ջրածնի նկատմամբ 25-2000 ppm կոնցենտրացիաների տիրույթում համապատասխանաբար 150°C և 200°C աշխատանքային. ջերմաստիճաններում, որտեղ արծազանքման արժեքները տատանվել են 2.5-11:
  12.  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (80:20 կշռ.),  $\text{SnO}_2:\text{FALH}$  (75:25 կշռ.) և  $\text{SnO}_2+1\text{ատ.}\% \text{Co}$ / $\text{FALH}$  նանոկոմպոզիտային միացությունները ցուցաբերել են բավականին բարձր զգայունություն  $\text{NO}_2$ -ի ցածր կոնցենտրացիաների նկատմամբ:  $\text{SnO}_2:\text{FALH}$  (75:25 կշռ.) ճկուն սենսորը ցուցաբերել է զգայունություն և պարամետրերի կայունություն  $\text{NO}_2$ -ի նկատմամբ (սկսած 1.5 ppm կոնցենտրացիայից)՝ անգամ բազմակի ճկունների արդյունքում, իսկ  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (80:20 կշռ.) համակարգի զգայունությունը 3 ppm  $\text{NO}_2$ -ի նկատմամբ սենյակային ջերմաստիճանում հասել է ավելի քան 23-ի, որտեղ ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությունը զգայունության շեմը 3 ppm-ից նվազեցրել է մինչև 1.5 ppm:
  13. Պատրաստված նանոկառուցվածքային  $\text{ZnO}+1\text{ատ.}\% \text{La}$  սենսորի համար որպես աշխատանքային ջերմաստիճան ընտրվել է 240°C-ը: ԻՍ ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ  $\text{NO}_2$ -ի (100 ppm) նկատմամբ զգայունությունը ցածր հաճախություններում զգալիորեն ավելի մեծ է, քան՝ բարձրում: Կառուցվել է գազազգայուն մատրիցի համարժեք էլեկտրական շղթան և ապացուցվել է մակերևութային պրոցեսների գերակշիռ ներդրումը գազազգայունության մեխանիզմներում:
  14.  $\text{NO}_2$ -ի նկատմամբ զգայուն նանոկառուցվածքային  $\text{ZnO}+2\text{ատ.}\% \text{La}$  սենսորի աշխատանքային ջերմաստիճանը եղել է 175°C, որտեղ ուսումնասիրվել է սենսոր ԻՍ հատկությունները ( $1-10^6$  Հց տիրույթում)՝ օդում և 100 ppm  $\text{NO}_2$ -ի դեպքում: Կառուցվել և մեկնաբանվել է սենսորի համարժեք էլեկտրական շղթան:
  15. Պատրաստված  $\text{FALH}/\text{SnO}_2$  նանոկոմպոզիտային սենսորի գազազգայունության հատկությունները հետազոտվել են ացետոնի գոլորշու տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում (4-20 ppm)՝ 250°C ջերմաստիճանում: Առաջարկվել է սենսորի համարժեք էլեկտրական շղթա, որն արտացոլել է գազազգայուն թաղանթի բնութագրերը:
  16. Հաճախությունների  $1-10^6$  Հց տիրույթում ուսումնասիրվել են  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (80:20 կշռ.%) սենսորի ԻՍ բնութագրերը՝ օդում և 100 ppm  $\text{NO}_2$ -ի առկայությամբ: 200°C աշխատանքային ջերմաստիճանի դեպքում կառուցվել է սենսորի համարժեք էլեկտրական շղթան, որտեղ  $\text{NO}_2$ -ի առկայությունը հիմնականում փոփոխում է ակտիվ դիմադրության արժեքը: Սենսորի զգայունությունն ավելի մեծ է 1 կՀց-ից ցածր հաճախությունների տիրույթում:

#### **Օգտագործված գրականության ցանկ**

1. Xu, F.; HO, H.-P. Light-Activated Metal Oxide Gas Sensors: A Review. *Micromachines* 8 (11), 333. 2017.

2. A. Kumar, H. Dhasmana, A. Kumar, V. Kumar, A. Verma, V.K. Jain: Highly sensitive MWCNTs/SiNWs hybrid nanostructured sensor fabricated on silicon-chip for alcohol vapors detection. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. ,127, 114538, 2021
3. F. Schipani, D.R. Miller, M.A. Ponce, C.M. Aldao, S.A. Akbar, P.A. Morris: Electrical Characterization of Semiconductor Oxide-Based Gas Sensors Using Impedance Spectroscopy: A Review. *Reviews in Advanced Sciences and Engineering*. ,5, 1, 86–105, 2016.

**Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրվել են հետևյալ աշխատանքներում**

**Հոդված գիտական ամսագրում**

1. G. H. Shahkhatuni, Investigation of Nanostructured Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO Sensor by Impedance Spectroscopy, *Journal of Contemporary Physics*, 2023, 58, 385–390.
2. M. S. Aleksanyan, G. H. Shahkhatuni, E. A. Khachatryan, G. E. Shahnazaryan, A. G. Sayunts, H. R. Hovhannisyanyan, D. A. Kananov, Investigation of the MWCNT/SnO<sub>2</sub> Sensor for the Detection of Acetone Vapors, *Journal of Contemporary Physics*, 2023, 58, 67–72.
3. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, V. M. Aroutiounian, E. A. Khachatryan, Detection of hydrogen peroxide vapor using flexible gas sensor based on SnO<sub>2</sub> nanoparticles decorated with multi-walled carbon nanotubes, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2023, 14, 025001.
4. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, V. M. Aroutiounian, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, G. E. Shahnazaryan, Gas Sensor Based on ZnO Nanostructured Film for the Detection of Ethanol Vapor, *Chemosensors 2022*, Vol. 10, Page 245, 2022, 10, 245.
5. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, H. Kasparyan, D. Kopecký, Room Temperature Detection of Hydrogen Peroxide Vapor by Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO Nanograins, *Nanomaterials 2023*, Vol. 13, Page 120, 2022, 13, 120.
6. G. E. Shahnazaryan, G. A. Shahkhatuni, M. S. Aleksanyan, Z. G. Simonyan, V. M. Aroutiounian, A. G. Sayunts, Investigations of the Impedance Characteristics of a Nanostructured ZnO(La) Sensor for Hydrogen Peroxide Vapors, *Journal of Contemporary Physics*, 2022, 57, 254–262.
7. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, V. M. Aroutiounian, G. E. Shahnazaryan, Flexible SnO<sub>2</sub>(Co)/MWCNT Sensor for Detection Low Concentrations of Hydrogen Peroxide Vapors, *Journal of Contemporary Physics*, 2022, 57, 133–139.
8. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, G. E. Shahnazaryan, V. M. Aroutiounian, Use of Nanostructured Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO Film for Detection of Hydrogen, *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences) 2022 57:2*, 2022, 57, 140–145.
9. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, V. M. Aroutiounian, G. E. Shahnazaryan, Flexible sensor based on multi-walled carbon nanotube-SnO<sub>2</sub> nanocomposite material for hydrogen detection, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2022, 13, 035003.
10. G. H. Shahkhatuni, V. M. Aroutiounian, V. M. Arakelyan, M. S. Aleksanyan, G. E. Shahnazaryan, Investigation of Sensor Made of ZnO:La for Detection of Hydrogen Peroxide Vapours by Impedance Spectroscopy Method, *Journal of Contemporary Physics*, 2019, 54.

11. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, G. E. Shahnazaryan, V. M. Aroutiounian, Study of Gas Sensitivity of SnO<sub>2</sub>(Nb) Film in Liquefied Petroleum Gas, Journal of Contemporary Physics, 2021, 56.
12. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, V. M. Aroutiounian, G. E. Shahnazaryan, Study of Characteristics of the Sensor Detecting of Low Concentration of Ammonia, Journal of Contemporary Physics, 2021, 56.
13. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, V. M. Aroutiounian, G. E. Shahnazaryan, G. H. Shahkhatuni, Influence of Ultraviolet Rays on Sensitivity of Sensors for Acetone Vapor Detection, Journal of Contemporary Physics, 2021, 56.

#### **Գիտաժողովի մասնակցություն**

1. V. M. Aroutiounian, M. S. Aleksanyan, V. M. Arakelyan, G. E. Shahnazaryan, G. H. Shahkhatuni, Hydrogen Peroxide Vapor Sensor Based on Zinc Oxide, 6th International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumentation Advances, Porto, Portugal, Sep 23-25, 2020
2. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, G. E. Shahnazaryan, V. M. Aroutiounian, Highly sensitive hydrogen gas sensor based on Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO nanostructured thin film, Measurement, Sensor Systems and Applications Conference, Online–Live and On-demand, Aug 24–26, 2022
3. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, G. E. Shahnazaryan, Highly Sensitive Hydrogen Sensor Based on ZnO/MWCNTs Nanocomposite Material, Sensor and Measurement Science International, Nuremberg, Germany, May 8-11, 2023
4. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, V. M. Aroutiounian, G. E. Shahnazaryan, A Chemiresistive Gas Sensor Based on SnO<sub>2</sub>:ZnO Nanostructured Thin Film for the Detection of Hydrogen Peroxide Vapor, AAAFM-UCLA International Conference on Advances in Functional Materials, Los Angeles, USA, Aug 10-12, 2023

#### **Արտոնագիր**

1. M. S. Aleksanyan, V. M. Aroutiounian, G. H. Shahkhatuni, G. E. Shahnazaryan, Preparation method of hydrogen peroxide vapor sensor, AM 3448 A, 2021.
2. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, G. E. Shahnazaryan, V. M. Aroutiounian, Hydrogen nanostructured resistive sensor, 753 Y, 2022.
3. M. S. Aleksanyan, A. G. Sayunts, G. H. Shahkhatuni, Z. G. Simonyan, G. E. Shahnazaryan, Hydrogen Detector, 807 Y, 2023.

#### **Резюме**

Диссертационная работа посвящена изготовлению и исследованию методами резистивной и импедансной спектроскопии (ИС) газовых сенсоров на основе полупроводниковых нанокомпозитов.

Во введении представлены актуальность темы диссертационной работы, цель работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также приведены выносимые на защиту основные положения.

В первой главе представлены современные полупроводниковые газовые сенсоры, их устройство и особенности. Подробно описаны такие характеризующие сенсор важнейшие параметры, как газочувствительность, селективность, быстродействие, стабильность и т.д. Представлен также метод импедансной спектроскопии. Приведены

характеристики сенсоров, полученных разными исследователями в последние годы, и технологические способы их изготовления.

Во второй главе представлены технологические особенности синтеза нанокompозитных газочувствительных материалов и изготовления на их основе резистивных сенсоров. В частности, с помощью СЭМ изображений и элементного EDX анализа получены характеристики изготовленных методом твердофазного синтеза полупроводниковых многокомпонентных  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{:ZnO}$  (80:20 вес.%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{:ZnO}$  (60:40 мол.%),  $\text{ZnO:La}+1\text{ат.}\% \text{La}$ ,  $\text{ZnO}+2\text{ат.}\% \text{La}$  и  $\text{SnO}_2+1\text{ат.}\% \text{Co}$  мишеней. Используя синтезированные мишени, получены наноструктурные газочувствительные пленки методами магнетронного ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{:ZnO}$ ,  $\text{ZnO:La}$  и  $\text{SnO}_2<\text{Co}>$ ) и электронно-лучевого (МУНТ: $\text{SnO}_2$  (5:95 вес.%)) напыления, химического ( $\text{SnO}_2/\text{МУНТ}$  (75:25 вес.%), МУНТ/ $\text{SnO}_2$  (1:600)) осаждения и исследованы их морфологические, структурные и кристаллографические характеристики. Представлены описания установок для измерения сопротивления и импедансных характеристик сенсоров, а также строение используемых сенсорных подложек.

В третьей главе представлены параметры газочувствительности сенсоров к водороду, аммиаку, ацетону, этанолу, сжиженному нефтяному газу и парам перекиси водорода (ППВ), исследованные резистивным методом. В частности, сенсор  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{:ZnO}$  (60:40 мол.%) показал высокую чувствительность к низким концентрациям аммиака ( $S=2$  при 27 ppm,  $S=1.5$  при 14 ppm) при рабочей температуре 250°C. Изготовленные сенсоры  $\text{Fe}_2\text{O}_3+0.1\text{ат.}\% \text{Sn}$  и МУНТ/ $\text{SnO}_2$  (1:600) проявили чувствительность к ацетону, начиная с концентрации 20 ppm ( $T_{\text{раб.}}=250^\circ\text{C}$ ). Чувствительность сенсора  $\text{Fe}_2\text{O}_3+0.1\text{ат.}\% \text{Sn}$  при концентрации паров ацетона 450 ppm достигает 4.2. При рабочей температуре 250°C сопротивление сенсора МУНТ/ $\text{SnO}_2$  (1:600) изменялось под воздействием паров ацетона с концентрацией 20 ppm в 7.4 раза, а при концентрации 400 ppb – в 1.2 раза. Наноструктурный сенсор  $\text{ZnO}+1\text{ат.}\% \text{La}$  показал высокую чувствительность к парам этанола, минимальный порог обнаружения составил 0.7 ppm при температуре 250°C. При увеличении концентрации этанола от 0.7 до 34 ppm отклик превышал 117, а времена отклика и восстановления равнялись 14 и 60 секунд, соответственно. Изготовленные сенсоры МУНТ: $\text{SnO}_2$  (5:95 вес.%) при рабочей температуре 150°C и  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{:ZnO}$  (60:40 вес.%) при рабочей температуре 200°C проявили значительный отклик к водороду в области концентраций 25–2000 ppm, при этом величины отклика колебались в диапазоне от 2.5 до 11. Чувствительность изготовленного на твердой подложке сенсора  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{:ZnO}$  (80:20 вес. %) к 3 ppm ППВ при комнатной температуре превышала значение 23, при этом воздействие УФ излучения снизило порог чувствительности с 3 ppm до 1.5 ppm. Гибкие сенсоры  $\text{SnO}_2+1\text{ат.}\% \text{Co}/\text{МУНТ}$  и  $\text{SnO}_2/\text{МУНТ}$  (75:25 вес.%) проявили чувствительность к ППВ, начиная с концентрации 1.5 ppm, и стабильность параметров даже после многократных изгибов.

В четвертой главе представлены результаты исследований методом ИС параметров сенсоров. С помощью метода ИС выявлены определенные механизмы чувствительности сенсоров и их возможное влияние на параметры газочувствительности. Представлены результаты исследований методом ИС сенсора  $\text{ZnO}+1\text{ат.}\% \text{La}$ , показывающие, что чувствительность к ППВ (100 ppm) существенно выше на низких частотах, чем на

высоких (рабочая температура сенсора 240°C). Предложена эквивалентная электрическая схема газочувствительной матрицы и доказано, что доминирующим в механизме газочувствительности является вклад поверхностных процессов. При рабочей температуре 175°C исследовались импедансные характеристики чувствительного к ППВ сенсора ZnO+2at.%La (измерения проводились в диапазоне частот 1–10<sup>6</sup> Гц, на воздухе и при воздействии 100 ppm ППВ). Смоделирована эквивалентная электрическая схема сенсора, дана интерпретация составляющих ее элементов. Исследованы также газочувствительные свойства сенсора МУНТ/SnO<sub>2</sub> при разных концентрациях паров ацетона (4–20 ppm) при температуре 250°C. Предложена эквивалентная электрическая схема сенсора, отражающая характеристики газочувствительной пленки. В диапазоне частот 1–10<sup>6</sup> Гц исследовались также импедансные характеристики сенсора Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO (80:20 вес. %) на воздухе и в присутствии 100 ppm ППВ. При рабочей температуре 200°C предложена эквивалентная электрическая схема сенсора, в которой присутствие в воздухе ППВ в основном изменяет величину активного сопротивления. Чувствительность датчика была выше в области частот ниже 1 кГц.

### Summary

The dissertation is dedicated to the preparation and investigation of gas sensors based on semiconductor nanocomposites using resistive and impedance spectroscopic (IS) methods.

The dissertation begins with an introduction, which presents the relevance of the topic, the purpose of the work, the scientific novelty and the practical importance of the obtained results, as well as the basic results to be defended.

The first chapter presents the types of modern semiconductor gas sensors, their structure and features. The most important parameters characterizing the sensors are presented in detail, including gas sensitivity, selectivity, speed, stability, etc. A description of the impedance spectroscopic research method is also presented here. The characteristics of the sensors proposed by various researchers in recent years and the technological methods of their preparation are presented as well.

The second chapter presents the technological features of the synthesis of the nanocomposite gas-sensitive materials and the preparation of the resistive sensors based on them. In particular, the characteristics of semiconductor multicomponent targets of the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO (80:20 wt.%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO (60:40 mol.%), ZnO:La+1at.%La, ZnO+2at.%La and SnO<sub>2</sub>+1at.%Co materials prepared by the solid-state reaction method were highlighted using the TEM and EDX spectroscopies. The prepared targets were used to obtain nanostructured gas-sensitive films by the magnetron sputtering (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:ZnO, ZnO:La and SnO<sub>2</sub><Co>), electron beam sputtering (MWCNT:SnO<sub>2</sub> (5:95 wt.%)) and chemical deposition (SnO<sub>2</sub>/MWCNT (75:25 wt.%)); MWCNT/SnO<sub>2</sub> (1:600)) methods, investigating their morphological, structural and crystalline characteristics. The descriptions of the gas sensing setups for measuring the characteristics of the sensors both the resistive and the impedance spectroscopic methods are also presented here.

The third chapter presents the gas-sensing parameters of the sensors sensitive to hydrogen, ammonia, acetone, ethanol, liquefied petroleum gas and hydrogen peroxide vapors mainly

studied in the resistive method. In particular, the  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (60:40 mol.%) sensor showed high sensitivity to low concentrations of ammonia (27 ppm:  $S=2$ , 14 ppm:  $S=1.5$ ) at the working temperature of  $250^\circ\text{C}$ . The prepared  $\text{Fe}_2\text{O}_3+0.1\text{at.}\%\text{Sn}$  and  $\text{MWCNT}/\text{SnO}_2$  (1:600) sensors showed sensitivity to acetone starting from 20 ppm concentration ( $T_{\text{opr}}=250^\circ\text{C}$ ). The response value of the  $\text{Fe}_2\text{O}_3+0.1\text{at.}\%\text{Sn}$  sensor reached 4.2 toward 450 ppm of acetone. At the operating temperature of  $250^\circ\text{C}$  the resistance of the  $\text{MWCNT}/\text{SnO}_2$  sensor changed by 7.4 and 1.2 times at 20 ppm and 400 ppb acetone vapors, respectively. The  $\text{ZnO}+1\text{at.}\%\text{La}$  nanostructured sensor showed high sensitivity to ethanol vapors, the low detection limit of which was 0.7 ppm at a temperature of  $250^\circ\text{C}$ . In the ethanol concentrations range of 0.7-34 ppm, the response value reached more than 117, and the response and recovery times were 14 and 60 seconds, respectively. The fabricated  $\text{MWCNT}:\text{SnO}_2$  (5:95 wt.%) and  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (60:40 wt.%) sensors showed high response to hydrogen in the concentration range of 25-2000 ppm at  $150^\circ\text{C}$  and  $200^\circ\text{C}$  operating temperature, where the response values ranged from 2.5 to 11, respectively. The sensitivity of the prepared  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (80:20 wt. %) sensor to 3 ppm hydrogen peroxide vapor at room temperature reached more than 23, where exposure to UV radiation reduced the low detection limit from 3 to 1.5 ppm. The flexible  $\text{SnO}_2+1\text{at.}\%\text{Co}/\text{MWCNT}$  and  $\text{SnO}_2/\text{MWCNT}$  (75:25 wt.%) sensors showed a high response and parameter stability to hydrogen peroxide vapor (starting from 1.5 ppm concentration) even after multiple bendings of the flexible substrate.

In the fourth chapter, the results of the research of sensor parameters using the IS method are presented. Same mechanisms of the sensor sensitivity and their possible influence on the gas sensing parameters were revealed by this method. Here, the IS studies performed for the  $\text{ZnO}+1\text{at.}\%\text{La}$  sensor are presented, which showed that the sensor response to hydrogen peroxide vapor (100 ppm) is significantly greater at low frequencies than at higher ones. Here,  $240^\circ\text{C}$  was chosen as the sensor operating temperature. The equivalent electrical circuit of the gas-sensing matrix was also built and the dominant contribution of surface processes in the gas-sensing mechanisms was proved. The operating temperature of the  $\text{ZnO}+2\text{at.}\%\text{La}$  sensor sensitive to hydrogen peroxide vapor was  $175^\circ\text{C}$ , where the sensor IS properties were investigated (in the range of  $1-10^6$  Hz) in air and at 100 ppm hydrogen peroxide vapor. An equivalent electrical circuit of the sensor was constructed and interpreted. The gas sensing properties of the fabricated  $\text{MWCNT}/\text{SnO}_2$  sensor were also investigated at different concentrations of acetone vapor (4-20 ppm) at a temperature of  $250^\circ\text{C}$ . An equivalent electric circuit of the sensor was proposed, which reflected the characteristics of the gas-sensitive film. In the frequency range of  $1-10^6$  Hz, the IS characteristics of the  $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$  (80:20 wt. %) sensor were also studied in air and in the presence of 100 ppm of hydrogen peroxide vapor. At  $200^\circ\text{C}$ , the equivalent electrical circuit of the sensor was built, where the presence of the hydrogen peroxide vapor mainly changes the value of the active resistance. The sensitivity of the sensor was higher in the frequency range below 1 kHz.





