

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

Ալեքսանյան Միքայել Սերյոժայի

*Հեռանկարային գազային սենսորներ՝ մետաղօքսիդային նանոկոմպոզիտների
հիման վրա*

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ-2023

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

Aleksanyan Mikayel

Prospective gas sensors based on metal oxide nanocomposites

Thesis for the degree of Doctor of technical sciences
Specialty 01.04.10 - "Semiconductor Physics"

Abstract

YEREVAN-2023

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ԵՊՀ ռադիոֆիզիկայի ֆակուլտետի
գիտական խորհրդում:

Պաշտոնական

ընդդիմախոսներ՝

տեխ.գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

Գ.Շ. Շմավոնյան

տեխ.գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

Ս.Խ. Խուդավերդյան

ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

Վ.Վ. Հարությունյան

Առաջատար

կազմակերպություն՝

ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական հետազոտությունների

ինստիտուտ

Պաշպանությունը կայանալու է 2023 թ. հունիսի 10-ին ժամը 12-ին, Երևանի Պետական Համալսարանում գործող ֆիզիկայի 049 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (Երևան, 0025, Ալեք Մանուկյան 1):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է 2023 ապրիլի 25-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար՝



ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ
Վ.Պ. Քալանթարյան

The thesis theme is approved at the Academic Council of the Radiophysics Department of the Yerevan State University

Official opponents:

Doctor of Technical Sciences, prof.

G.S. Shmavonyan

Doctor of Technical Sciences, prof.

S.K. Khudaverdyan

Doctor of Phys. Math. Sciences, prof.

V.V. Harutyunyan

Leading organization:

Institute For Physical Research (NAS RA)

The defense of the thesis will take place at 12:00 on 10 June 2023 on the session of the Specialized Council 049 Physics of the Yerevan State University.

Address: 1 Alek Manukyan Street, 0025 Yerevan, Armenia.

The thesis is available in the library of the Yerevan State University.

The abstract is distributed on 25 April 2023.

Scientific secretary of
the Specialized Council



Candidate of Phys. Math. Sciences,
Associate Prof. V.P. Kalantaryan

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐ

Թեմայի արդիականությունը

Ներկայումս սրընթաց զարգանում են արդյունաբերության գրեթե բոլոր ուղղությունները, որի արդյունքում օրեցօր մեծանում է լավարկված սարքավորումների ստեղծման և զարգացման պահանջարկը, որը կրեթի մարդկային կենսագործունեության կազմակերպման ավելի բարձր մակարդակի: Այս տեսանկյունից առավել կարևոր են մարդու առողջության և անվտանգության հետ կապված խնդիրները, որոնց ապահովման հիմնական երաշխիքը հուսալի անվտանգային համակարգերի ներդրումը և դրանց ճշգրիտ կառավարումն է: Նման համակարգերի հիմնական, կարևորագույն բաղադրիչները սենսորներն են, որոնց ֆիզիկական բնութագրերից է կախված ամբողջ համակարգի աշխատունակությունը: Խնդիրը էլ ավելի է կարևորվում, երբ խոսքը գնում է մարդկային գործունեության ոլորտներում թունավոր, պայթյունավտանգ զգացրի, ցնդող օրգանական միացությունների և այլ տեսակի նյութերի գոլորշիների հայտնաբերման և դրանց կոնցենտրացիաների չափման մասին: Այսպիսով, բարձր զգայունությամբ, ընտրողունակությամբ, կայունությամբ, փոքր չափսերով և դյուրակիր զազային սենսորների պատրաստման տեխնոլոգիաների մշակումը և դրանց հիման վրա սենսորների պատրաստումն ու կիրառումը խիստ արդիական խնդիրներ են:

Գազային սենսորների նախագծման և զազագայունության պարամետրերի բարելավման համար առաջարկվող հիմնական մոդելները ներառում են երկու կարևորագույն բաղադրիչներ. զազագայուն նյութի ճիշտ ընտրություն՝ հիմնված տվյալ զազի նկատմամբ նյութի քիմիական ակտիվության վրա (ադսորբցիոն/դեսորբցիոն երևույթներ, քիմիական ռեակցիաներ) և զազագայուն նյութի համապատասխան միկրոկառուցվածքի ընտրություն՝ հաշվի առնելով զազագայուն մատրիցում թիրախային զազի դիֆուզիոն պրոցեսները [1]: Չնայած այն բանի, որ այս մոդելների շրջանակներում նորագույն տեխնոլոգիաների և կոմպոզիտային նյութերի վրա հիմնված սենսորների ստեղծման ուղղությամբ կատարվել և կատարվում են մեծածավալ աշխատանքներ, սակայն արդի պահանջներին ամբողջությամբ բավարարող պարամետրերով սենսորներ դեռևս չկան: Գազագայունությունը որոշվում է ֆիզիկաքիմիական և կառուցվածքային բազմաթիվ գործոնների միաժամանակյա ազդեցությամբ, որոնց օպտիմալ համադրությունը կրեթի սենսորի աշխատունակության բարձր մակարդակի [2]:

Աշխատանքի հիմնական նպատակները

Նախագծել և զարգացնել թունավոր, պայթյունավտանգ զազերի, ցնդող օրգանական միացությունների և այլ նյութերի գոլորշիների նկատմամբ բարձր արդյունավետությամբ օժտված կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորներ հիմնված միաչափ, երկչափ և եռաչափ նանոկառուցվածքների և կոմպոզիտային նյութերի վրա: Հանգամանորեն հետազոտել պատրաստված սենսորների էլեկտրաքիմիական և զազագայունության պարամետրերը և հնարավոր տեխնոլոգիական մեթոդները, որոնք կհանգեցնեն ավելի լավարկված պարամետրերով սենսորային համակարգերի ստեղծման:

Աշխատանքում առաջադրվել և լուծվել են հետևյալ խնդիրները

1. Մինթեզվել կիսահաղորդչային միա- և բազմակոմպոնենտ նանոկառուցվածքներ, որոնք բարձր զգայունություն, կայունություն և ընտրողունակություն կցուցաբերեն թունավոր, պայթյունավտանգ գազերի, ցնդող օրգանական միացությունների և այլ տեսակի նյութերի գոլորշիների նկատմամբ:
2. Հետազոտել և վերլուծել սինթեզված նյութերի կառուցվածքային և էլեկտրաֆիզիկական պարամետրերը:
3. Մշակել և զարգացնել տեխնոլոգիական ռեժիմներ՝ ստացված կառուցվածքներից կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորների պատրաստման և դրանց բնութագրերի հեշտ կառավարման համար:
4. Հետազոտել պատրաստված սենսորների զագագայունության պարամետրերը և դրանց աշխատունակության պայմանները՝ դրանք ենթարկելով մանրակրկիտ լաբորատոր փորձարկման:
5. Ձեռք բերված փորձարարական տվյալների և դրանց ուսումնասիրությունների արդյունքում վեր հանել զագագայունության պարամետրերի լավարկմանն ուղղված խնդիրները և դրանց հնարավոր լուծումները:

Ստացված արդյունքների գիտական նորույթը

1. Մշակվել է նոր տեխնոլոգիական ռեժիմներ, որոնցով հաջողվել է ստանալ կառավարելի պարամետրերով միա- և բազմակոմպոնենտ նանոկառուցվածքներ, որոնց տվյալ բաղադրություններն առաջին անգամ օգտագործվել են որպես զագագայուն նյութեր տվյալ գազի հայտնաբերման համար:
2. Մշակվել է զագային սենսորների պատրաստման նոր կամ լավարկված տեխնոլոգիական մեթոդներ և հաջողվել է պատրաստել բարձր արդյունավետությամբ աշխատող սենսորային համակարգեր, որոնց հիմնական բնութագրերը, ինչպիսիք են զգայունությունը, զգայունության նվազագույն շեմը, արագագործությունը, ընտրողունակությունը և աշխատանքային ջերմաստիճանը, համեմատած առկա այլ սենսորների բնութագրերի հետ, էականորեն բարելավվել են:

Աշխատանքում ներկայացված հետազոտությունների գործնական արժեքը

1. Մինթեզված կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքները գործնականում կիրառելի են զագային սենսորներում շնորհիվ պարամետրերի կայունության և ցածր ինքնարժեքի:
2. Այստեղ օգտագործվող նանոկոմպոզիտային նյութերի քիմիական և մեխանիկական կայունությունը, ինչպես նաև դրանց ոչ թունավոր լինելը թույլ են տալիս դրանց հիման վրա պատրաստված սենսորների երկարատև և անվտանգ կիրառում իրական միջավայրերում:
3. Սենսորներում որպես զագագայուն համակարգ օգտագործվող մետաղօքսիդների և դրանց հիման վրա նանոկոմպոզիտային նյութերի ցածր ինքնարժեքը և կիրառությունը հարակից այլ ոլորտներում բերում են մեր սենսորների գործնական

կիրառման լայն հնարավորության և համատեղելիության այլ տեխնոլոգիաների հետ:

4. Մշակված նանոկառուցվածքային սենսորներն ունեն փոքր չափսեր, դյուրակիր են և օգտագործման համար անվնաս, որոնք գործնական կիրառության համար կարևորագույն չափորոշիչներ են:
5. Զգայուն նյութերի և սենսորային համակարգերի պատրաստման տեխնոլոգիան բավական պարզ է, էժան և փոքր մասշտաբներից մեծին անցնելու հնարավորությամբ օժտված, որոնք թույլ են տալիս ունենալ ցածր ինքնարժեքով, բարձր վերարտադրելիությամբ օժտված, գործնականում կիրառելի սենսորներ:

Պաշտպանությանը ներկայացված հիմնական դրույթները

1. Բազմապատ ածխածնային նանոխողովակների (ԲԱՆԽ) և ZnO-ի տարբեր կոնցենտրացիաների ներմուծումը համապատասխանաբար SnO₂-ի և Fe₂O₃-ի մեջ ապահովել են ջրածնի նկատմամբ բարձր գազազգայունություն (S=R_{on}/R_{qu}) (մինչև 500):
2. Կշռ. 20 % Nb₂O₃-ի ներմուծումը SnO₂-ի մեջ և ուլտրամանուշակագույն (ՈւՄ) ճառագայթների առկայությունը գազազգայուն նանոկառուցվածքի մակերևույթին իջեցրել են հեղուկացված նավթային գազի (ՀՆԳ) սենսորի աշխատանքային ջերմաստիճանը (50 °C-ով) և բարձրացրել գազազգայունությունը (մինչև 45 %) ու արագագործությունը (արձագանքման ժամանակը թույլեններից նվազել է մինչև վայրկյաններ):
3. Տարբեր կոնցենտրացիաներով Ru(OH)Cl₃ կատալիզային նյութի հավելումը ԱՆԽ (ածխածնային նանոխողովակներ)/SnO₂ նանոկառուցվածքային սենսորի մակերևույթին բերել է իզոթրոփան գազի նկատմամբ սենսորի գազազգայունության (2.5 անգամ) ու արագագործության (արձագանքման ժամանակը թույլեններից նվազել է մինչև վայրկյաններ) բարելավման և աշխատանքային ջերմաստիճանի նվազման (50 °C-ով):
4. Ga₂O₃:SnO₂-ի ներմուծումը In₂O₃-ում, ԲԱՆԽ-ներինը՝ Fe₂O₃-ում, Co₂O₃-ինը՝ SnO₂-ում և La₂O₃-ինը՝ ZnO-ում բերել են դրանց բարձր գազազգայունության (մինչև 300) էթանոլի գոլորշիների նկատմամբ:
5. ՈւՄ ճառագայթների առկայությունն էականորեն բարելավել է ացետոնի՝ Fe₂O₃+0.1ատ. % Sn նանոկառուցվածքային սենսորի պարամետրերը (արձագանքման ժամանակը թույլեններից նվազել է մինչև վայրկյաններ, իսկ գազազգայունությունը՝ հասել մինչև 4.2):
6. Fe₂O₃:ZnO (60:40 մոլ. %) նանոկառուցվածքային սենսորի՝ ամոնիակի նկատմամբ գազազգայունության նվազագույն շեմը 250 °C աշխատանքային ջերմաստիճանում եղել է 14 ppm:
7. Co₂O₃-ի և ԲՄԱԽ-ների տարբեր կոնցենտրացիաների ներմուծումը SnO₂-ի մեջ և ՈւՄ ճառագայթների առկայությունը գազազգայուն մակերևույթին բերել են ջրածնի պերօքսիդի նանոկառուցվածքային սենսորների բնութագրերի լավարկման (գազազգայունությունն աճել է 1.5 անգամ):

8. La_2O_3 -ի տարբեր կոնցենտրացիաներով հագեցած ZnO -ի հիման վրա պատրաստված նանոկառուցվածքային սենսորներից առավելագույն զագագայունություն (120) ցուցաբերել է $\text{ZnO}<2$ առ. % La կառուցվածքը:
9. Համապատասխան տեխնոլոգիական ռեժիմների ընտրությամբ ստացվել է կոբալտով հագեցած և ածխածնային նանոխողովակներով ֆունկցիոնալացված SnO_2 -ի այնպիսի նանոկառուցվածքներ, որոնք քիմիական ազդանյութերի նկատմամբ ցուցաբերել են բարձր զագագայունություն (մինչև 400):
10. Մագնետրոնային փոշեցրման տեխնոլոգիական ռեժիմների (գեներատորի հզորություն, փոշեցրման ժամանակ, տակդիրի ջերմաստիճան և այլն) ճիշտ մշակումը բերել է $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Zn}$ բազմաբյուրեղային նյութի և ածխածնային նանոկառուցվածքների հաջող սինթեզման:

Տպագրությունները

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրվել են 28 գիտական աշխատանքներում, 17 գիտաժողովներում և 5 արտոնագրերում:

Ատենախոսության թեմայով տպագրված աշխատանքները ներկայացված են ատենախոսության վերջում:

Աշխատանքի կառուցվածքը և ծավալը

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, հինգ գլուխներից և 260 անուն պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքում առկա են 176 նկար և 18 աղյուսակ, իսկ աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 260 էջ է:

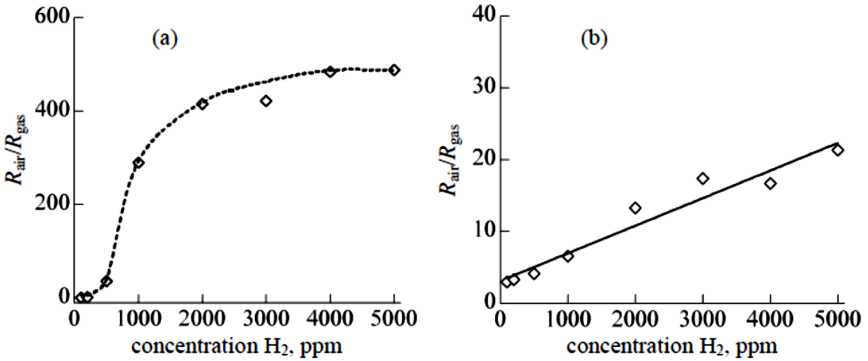
Աշխատանքի բովանդակությունը

Ներածական մասում ներկայացված է թեմայի արդիականությունը, ձևակերպված է աշխատանքի նպատակը և առաջադրված ու լուծված խնդիրները, ցույց է տրված ստացված արդյունքների գիտական նորոյթը և գործնական արժեքը, ինչպես նաև բերված են պաշտպանության ներկայացված հիմնական դրույթները:

Առաջին գլխում ներկայացված են այժմ առկա զագային սենսորների տեսակները, կիսահաղորդչային մետաղօքսիդային զագային սենսորների կառուցվածքը և առանձնահատկությունները: Այստեղ ներկայացված են նաև բազում գործոնների ազդեցությունը սենսորի զագագայունության պարամետրերի վրա, ինչպիսիք են զգայուն թաղանթի հաստությունը, հատիկների չափսերը, զագագայուն նյութի մակերևույթի կազմաբանությունը և այլն: Այստեղ նաև ներկայացված են վերջին տարիներում տարբեր հեղինակների կողմից առաջարկված թունավոր/պայթյունավտանգ զագերի, ցնդող օրգանական միացությունների և ջրածնի պերօքսիդի սենսորների բնութագրերը:

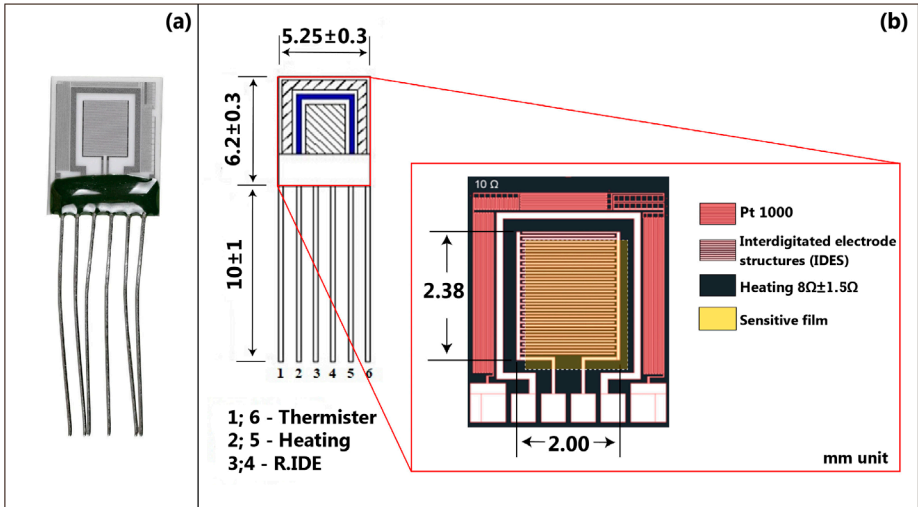
Երկրորդ գլխում ներկայացված են մեր կողմից մշակված ջրածնի, հեղուկացված նավթային գազի և բութանի նկատմամբ զգայուն սենսորների պատրաստման տեխնոլոգիան, ինչպես նաև ստացված զգայուն նյութերի կառուցվածքային, էլեկտրաքիմիական և զագագայունության բնութագրերը: Այստեղ ներկայացված են նաև վերը նշված զագերի զագագայունության մեխանիզմները և դրանց վրա ազդող

հնարավոր գործոնները: Մասնավորապես՝ մշակվել է տեխնոլոգիա SnO_2 -ով ֆունկցիոնալացված բազմապատ ածխածնային նանոխողովակների (ԲԱՆԽ) և $\text{WO}_3\cdot\text{SnO}_2$ նյութի հիման վրա ջրածնային սենսորների պատրաստման համար: Պոլիկոոր/ԲԱՆԽ/ $\text{SnO}_2(1:66)/\text{Pd}$ և պոլիկոոր/ $\text{WO}_3\cdot\text{SnO}_2(1:9)/\text{Pd}$ սենսորների արձագանքի ($S=R_{\text{on}}/R_{\text{off}}$) կախվածությունները թիրախային գազերի կոնցենտրացիաներից բերված են Նկ. 1-ում: Ինչպես տեսնում ենք, պոլիկոոր/ԲԱՆԽ/ $\text{SnO}_2(1:66)/\text{Pd}$ կառուցվածքի դեպքում ունենք բավական մեծ զգայունության արժեքներ (ավելի քան 400) և հագեցման բնութագիր, մինչդեռ պոլիկոոր/ $\text{WO}_3\cdot\text{SnO}_2(1:9)/\text{Pd}$ սենսորն ունի գրեթե գծային բնութագիր, սակայն ավելի ցածր զգայունություն:



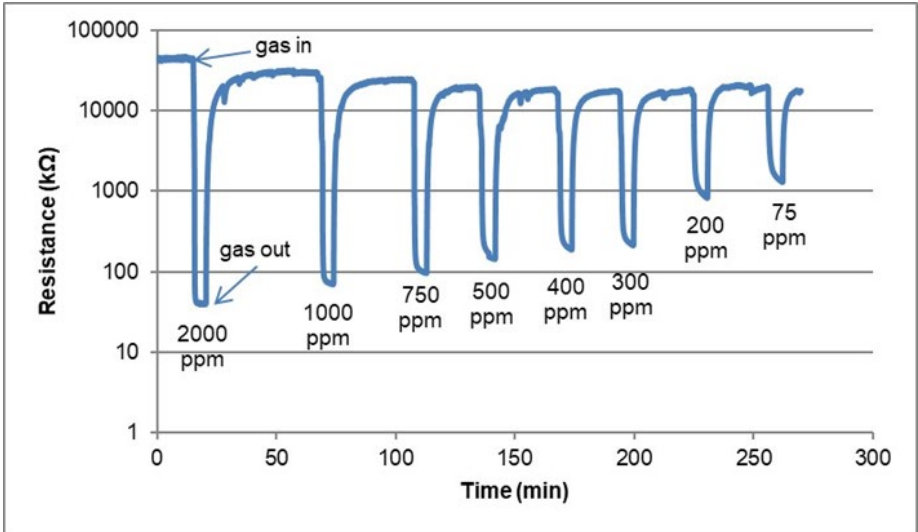
Նկ. 1 Պոլիկոոր/ԲԱՆԽ/ $\text{SnO}_2(1:66)/\text{Pd}$ (a) և պոլիկոոր/ $\text{WO}_3\cdot\text{SnO}_2(1:9)/\text{Pd}$ (b) սենսորների գազազգայունության կախվածությունը ջրածնի կոնցենտրացիայից 300°C -ում:

$\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{ZnO}$ նյութի հիման վրա պատրաստվել է նանոկառուցվածքային գազային սենսոր և հանգամանորեն ուսումնասիրվել դրա գազազգայունության բնութագրերը



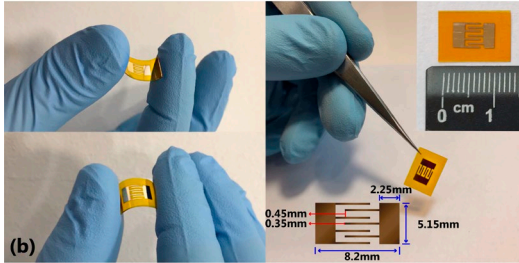
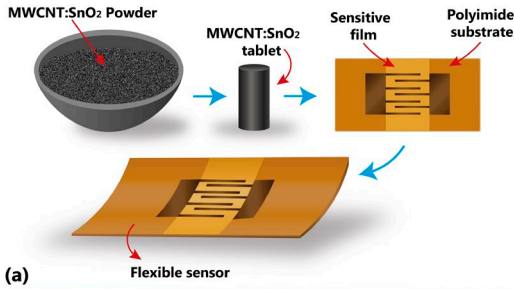
Նկ. 2 $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{ZnO}$ սենսորի լուսանկարը (a) և սխեմատիկ պատկերը (b):

ջրածնի տարբեր կոնցենտրացիաների առկայությամբ՝ աշխատանքային տարբեր ջերմաստիճաններում: $Fe_2O_3:ZnO$ (60:40 կշռ. %) սենսորի լուսանկարը և սխեմատիկ պատկերը համապատասխանաբար ներկայացված են Նկ. 2-ի a)-ում և b)-ում: Չափվել է սենսորի արձագանքը $200^\circ C$ աշխատանքային ջերմաստիճանում ջրածնի կոնցենտրացիայի 75-ից 2000 ppm տիրույթում (Նկ. 3): Ինչպես երևում է նկարից, սենսորը բոլոր կոնցենտրացիաների դեպքում ցուցաբերել է հստակ արձագանքման և վերականգնման բնութագիր և բարձր արագագործություն ($S=1137$, $n=2000$ ppm, $t_{արձ.}=48$ վ.):

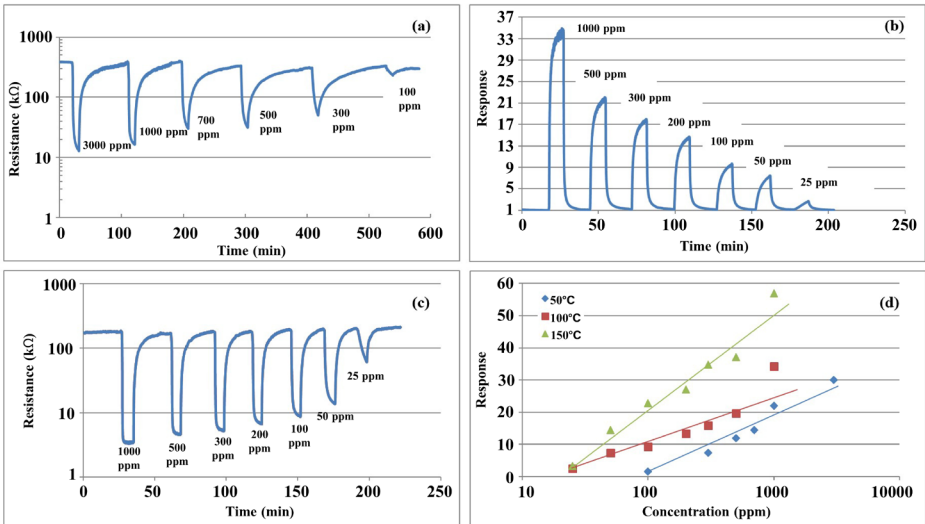


Նկ. 3 $Fe_2O_3:ZnO$ սենսորի դիմադրության փոփոխությունը ջրածնի տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում՝ $200^\circ C$ աշխատանքային ջերմաստիճանում:

Պատրաստվել են նաև ջրածնի ձկուն գազային սենսորներ $FU\text{ՆՆ}:SnO_2$ (5:95 կշռ.%) կոմպոզիտային նյութի հիման վրա և հետազոտվել դրանց գազազգայունության և էլեկտրաքիմիական պարամետրերը: Ձկուն սենսորի պատրաստման տեխնոլոգիական քայլերը և լուսանկարները ներկայացված են Նկ. 4-ում: Չափվել է սենսորի զգայունությունը ջրածնի 25-3000 ppm կոնցենտրացիաների տիրույթում՝ տարբեր աշխատանքային ջերմաստիճաններում և հանվել այդ ջերմաստիճաններում արձագանքի կախվածությունը կոնցենտրացիայից (Նկ. 5): Սենսորն արձագանքել է նույնիսկ 25 ppm ջրածնի նկատմամբ, որի դեպքում զգայուն շերտի դիմադրությունը փոխվել է ավելի քան 2.5 անգամ: Բոլոր ջերմաստիճաններում սենսորը ցուցաբերել է արձագանքման գրեթե գծային բնութագիր՝ կախված կոնցենտրացիայից: Ենթադրվում է [3], որ $FU\text{ՆՆ}$ -ների ներմուծումը SnO_2 -ի մեջ անագի օքսիդի արագելված գոտում առաջացնում են լրացուցիչ էներգիական մակարդակներ, որին կարելի է վերագրել ավելի փոքր էներգիական գոտով էֆեկտիվ արգելված գոտի: Այս դեպքում $FU\text{ՆՆ}$ -ները SnO_2 -ին օժտում են չափելի էլեկտրական դիմադրությամբ և միաժամանակ մեծացնում զգայուն շերտի արդյունաբար մակերեսը, որը բերում է զգայունության և արագագործության էական մեծացման:

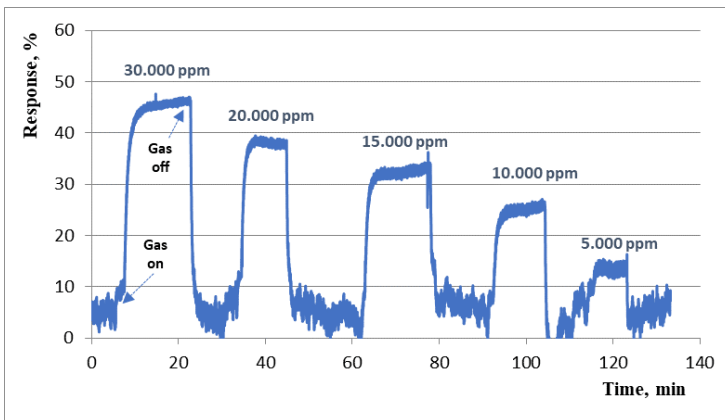


Նկ. 4 FU_{SnO_2} սենսորի պատրաստման տեխնոլոգիական քաղերը (a) և լուսանկարները (b):



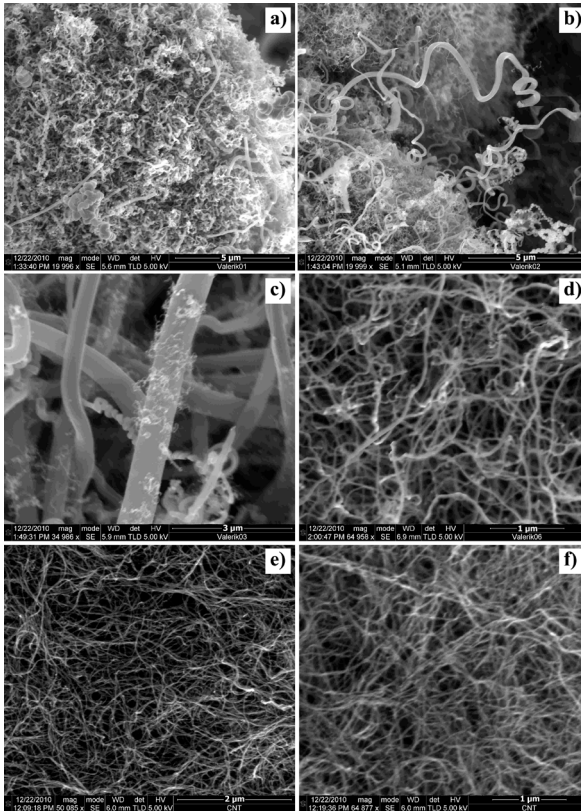
Նկ. 5 FU_{SnO_2} սենսորի դիմադրության փոփոխությունը ժամանակի ընթացքում ջրածնի տարբեր կոնցենտրացիաների առկայությամբ 50 °C-ում (a), սենսորի արձագանքման կորերը իրական ժամանակում 100 °C-ում (b), սենսորի դիմադրության փոփոխությունը ժամանակի ընթացքում ջրածնի տարբեր կոնցենտրացիաների առկայությամբ 150 °C-ում (c), սենսորի արձագանքման կախվածությունը կոնցենտրացիայից տարբեր ջերմաստիճաններում (d):

Որպես մագնետրոնային փոշեցրման թիրախ, պինդֆազային ռեակցիայի սինթեզման եղանակով պատրաստվել է SnO₂:Nb (80:20 կշռ.%) կիսահաղորդչային միացություն: Բարձրիաճախային մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով ստացված թիրախից պատրաստվել է հեղուկացված նավթային գազի (ՀՆԳ) նկատմամբ զգայուն սենսոր: 200 °C-ից ցածր ջերմաստիճաններում, նույնիսկ ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությամբ, սենսորը գրեթե զգայունություն չի ցուցաբերել ՀՆԳ-ի նկատմամբ: ՈւՄ ճառագայթները 300 °C և 250 °C աշխատանքային ջերմաստիճաններում բարելավել են սենսորի արձագանքը: Սենսորի օպտիմալ ջերմաստիճան ընտրվել է 250 °C-ը, որտեղ այն ցուցաբերել է համեմատաբար բարձր զգայունություն, արագագործություն և ցածր սպառման հզորություն՝ համեմատած՝ 300 °C-ում սպառած հզորության հետ: ՀՆԳ-ի տարբեր կոնցենտրացիաների նկատմամբ և ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությամբ չափվել է նաև սենսորի արձագանքը ($S = ((R_{on} - R_{off}) / R_{off}) \times 100\%$) 250 °C աշխատանքային ջերմաստիճանում: Սենսորը զգայունություն է ցուցաբերել ՀՆԳ-ի նկատմամբ 5000 ppm կոնցենտրացիայից սկսած և կախվածությունը գրեթե գծային է: Նույնիսկ 5000 ppm ՀՆԳ-ի առկայությամբ, սենսորի արձագանքը բավական բարձր է՝ 15 %, իսկ 30 000 ppm կոնցենտրացիայի դեպքում այն գերազանցում է 45 %-ը (Նկ. 6):

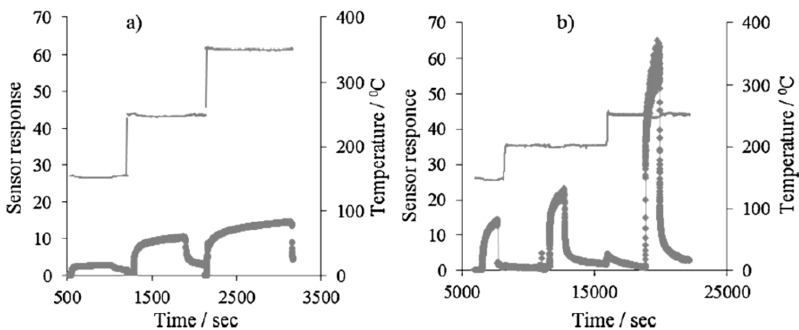


Նկ. 6 SnO₂:Nb սենսորի զգայունության կախվածությունը ժամանակից ՀՆԳ-ի տարբեր կոնցենտրացիաների առկայությամբ՝ 250 °C աշխատանքային ջերմաստիճանում:

Պատրաստվել է իզոբութանի սենսոր հիմնված կոմպոզիտային ԱՆԽ (ածխածնի նանոխողովակներ)/SnO₂ կառուցվածքի վրա: Զուլ-գել եղանակով պատրաստվել է կոմպոզիտային ԱՆԽ/SnO₂ միացություն՝ օգտագործելով քիմիական եղանակով նախապես աճեցված ԱՆԽ-ներ (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland): Սենսորի մակերևույթը պատվել է 0.01 մոլ և 0.03 մոլ չափաբաժնով Ru(OH)Cl₃-ի ծածկույթով՝ որպես զգայունությունը բարելավող կատալիզ: Հանվել են ստացված ածխածնային նանոխողովակների SEՄ (տեսածրոդ էլեկտրոնային մանրադիտակ) պատկերները և այստեղ դրանց տրամագիծը մոտ 100 նմ է, իսկ երկարությունը՝ 1-2 մկմ (Նկ. 7):



Նկ. 7 Մտացված ածխածնային նանոկառուցվածքների SEI պատկերները:

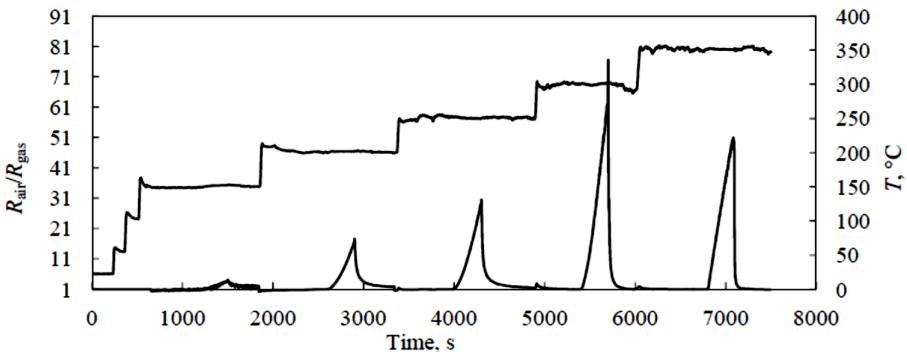


Նկ. 8 $\text{SnO}_2/\text{FUSiO}_2/\text{Pd}$ սենսորի արձագանքը 5000 ppm իզոբութանի նկատմամբ սենսորի մակերևույթը 0.01 մոլ (a) և 0.03 մոլ $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ (b) կատալիզային նյութով հագեցման դեպքում:

Հանվել են $\text{SnO}_2/\text{FUSiO}_2/\text{Pd}$ սենսորի արձագանքման բնութագրերը կատալիզային նյութի տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում (0.01 մոլ և 0.03 մոլ $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$) (Նկ. 8):

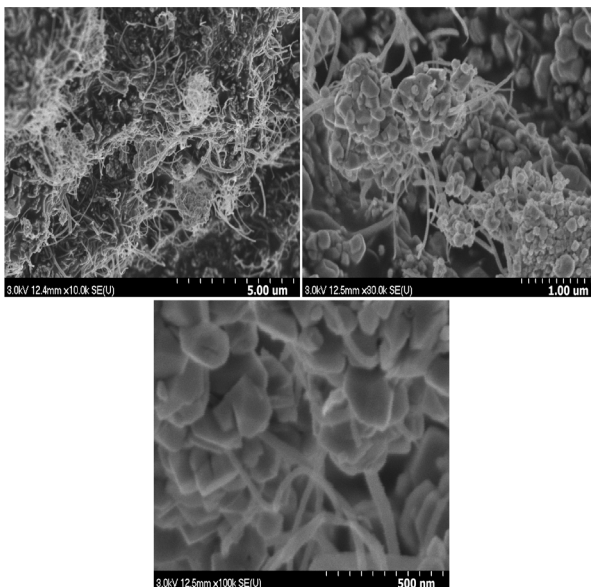
Առավելագույն զգայունությունը դիտվել է 0.03 մոլ Ru(OH)Cl₃ կոնցենտրացիայով կատալիզային նյութի դեպքում, սակայն այս դեպքում արձագանքման ժամանակները եղել են բավական մեծ՝ 2-3 ր., մինչդեռ 0.01 մոլ Ru(OH)Cl₃ կատալիզային նյութով հագեցած սենսորի համար դրանք եղել են 30-40 վ.: 0.03 մոլ Ru(OH)Cl₃-ով հագեցած SnO₂/FՄՆՆ/Pd սենսորի արձագանքման ժամանակները բարելավվելու համար այն թողնվել է իզոթրոֆանի միջավայրում 24 ժամ, որից հետո դիտվել է վերականգնման ժամանակների էական նվազում:

Երրորդ գլխում ներկայացված են մեր կողմից մշակված սենսորների բնութագրերը, որոնք զգայունություն են ցուցաբերել ցնդող օրգանական միացությունների նկատմամբ, ինչպիսիք են էթանոլը, ացետոնը և ամոնիակը: Այստեղ հանգամանորեն ներկայացված են զագագայուն նյութերի կառուցվածքի, բաղադրության և այլ ֆիզիկական հատկությունների վերաբերյալ հետազոտման արդյունքները: Այստեղ ներկայացված են նաև պատրաստված սենսորների զգայունության, կայունության, արագագործության և ընտրողունակության բնութագրերը՝ վերը նշված զագերի համար: Մասնավորապես՝ պինդֆազային ռեակցիայի սինթեզման եղանակով պատրաստվել է In₂O₃-Ga₂O₃-SnO₂ (70:20:10 կշռ.%) մագնետրոնային փոշեցրման թիրախ: Ստացված թիրախից բարձրհաճախային մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով նստեցվել է բարակ, զագագայուն շերտ: Սենսորը բավական մեծ զգայունություն (41) է ցուցաբերել 5000 ppm էթանոլի նկատմամբ 250 °C-ում, մինչ այդ նույն ջերմաստիճանում ացետոնի նկատմամբ զգայունությունը եղել է 6.5 (Նկ. 9):



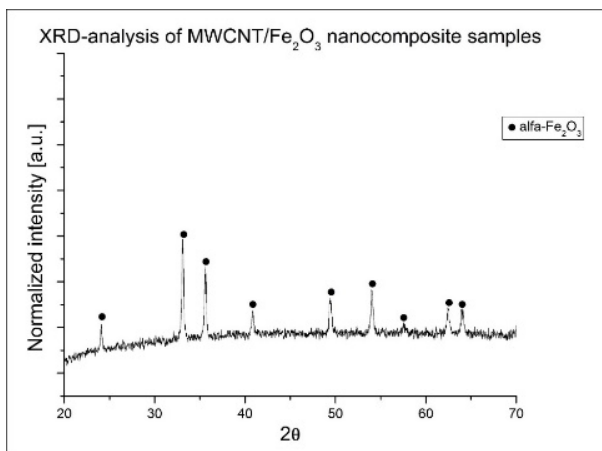
Նկ. 9 In₂O₃-Ga₂O₃-SnO₂ սենսորի արձագանքն էթանոլի տարբեր կոնցենտրացիաների նկատմամբ 250 °C ջերմաստիճանում:

Սզեգեդի համալսարանում (University of Szeged, Hungary) սինթեզվել է α-Fe₂O₃/FՄՆՆ (25:1) նանոկոմպոզիտային փոշի և մեր լաբորատորիայում (ԵՊՀ) էլեկտրոնաճառագայթային փոշեցրման եղանակով պատրաստվել բարակ զագագայուն թաղանթ որպես էթանոլի սենսոր: Հանվել են α-Fe₂O₃/FՄՆՆ նանոկոմպոզիտային նյութի ՏԷՄ պատկերները, որտեղ նանոփոշու հատիկների չափսերը ընկած են 100-110 նմ տիրույթում, իսկ նանոխողովակների տրամագծերը 30-40 նմ տիրույթում (Նկ. 10):

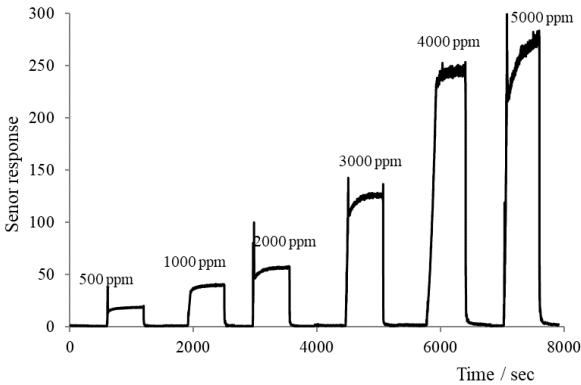


Նկ. 10 α - Fe_2O_3 /FԱՆՆ նանոկոմպոզիտային նյութի SEՄ պատկերները:

Հանվել է նաև α - Fe_2O_3 /FԱՆՆ նանոկոմպոզիտային նյութի ռենտգենյան պատկերը (Նկ. 11), որտեղ ակնհայտ երևում են α - Fe_2O_3 -ի պիկերը (012), (104), (110), (113), (024), (116), (122), (214) և (300): Ենթադրվում է, որ FԱՆՆ-ի պիկերը ռենտգենյան պատկերում չեն արտահայտվել դրանց քիչ լինելու պատճառով: Հանվել է սենսորի արձագանքը 300 °C-ում էթանոլի տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում: Ինչպես երևում է Նկ.12-ից, սենսորն արձագանքել է սկսած էթանոլի 500 ppm կոնցենտրացիայից, որի դեպքում այն հասել է ավելի քան 30-ի: Այս ջերմաստիճանում սենսորի արձագանքման և վերականգնման ժամանակները վարյկյանների կարգի են:

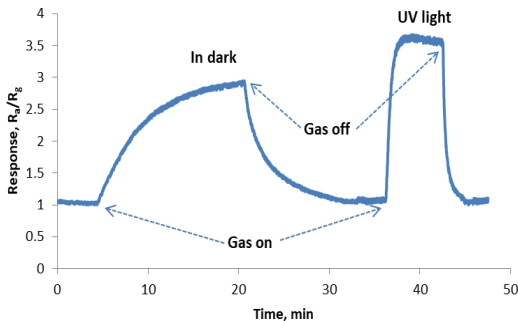


Նկ. 11 α - Fe_2O_3 /FԱՆՆ նանոկոմպոզիտային նյութի ռենտգենյան պատկերը:



Նկ. 12 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{FUUSn}$ սենսորի արձագանքը $300\text{ }^\circ\text{C}$ ջերմաստիճանում էթանոլի տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում:

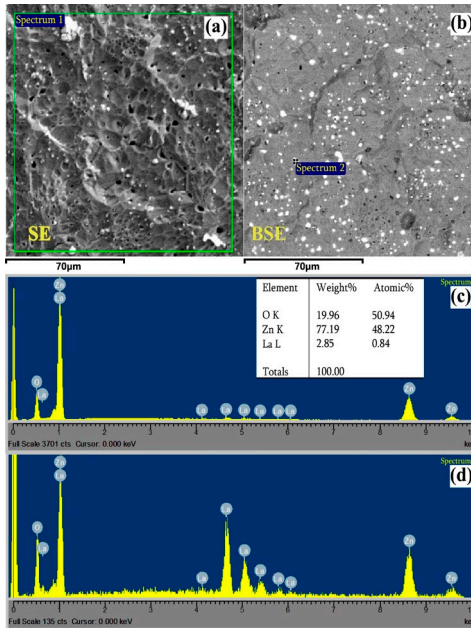
SnO_2+2 ատ.% Co մետաղօքսիդային նանոկառուցվածքների հիման վրա պատրաստվել են էթանոլի սենսորներ և հետազոտվել դրանց զագագայունության պարամետրերը ՈւՄ ճառագայթների առկայությամբ: Սենսորի արձագանքը էականորեն աճել է աշխատանքային ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց: Աշխատանքային ջերմաստիճանը $50\text{ }^\circ\text{C}$ -ից մինչև $100\text{ }^\circ\text{C}$ բարձրացնելիս սենսորի արձագանքը համապատասխանաբար բարձրացել է 2-ից մինչև 3.4: ՈւՄ ճառագայթների առկայությունն էականորեն բարելավել է սենսորի և արձագանքը, և՛ արագագործությունը: Մասնավորապես $150\text{ }^\circ\text{C}$ -ում սենսորի արձագանքը 300 ppm էթանոլի նկատմամբ 2.9-ից հասել է 3.5, իսկ արձագանքման և վերականգնման ժամանակները բոլորներից՝ վայրկյանների (Նկ. 13):



Նկ. 13 $\text{SnO}_2\langle\text{Co}\rangle$ սենսորի արձագանքն էթանոլի 300 ppm գոլորշիների առկայությամբ ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությամբ և առանց դրանց՝ $150\text{ }^\circ\text{C}$ ջերմաստիճանում:

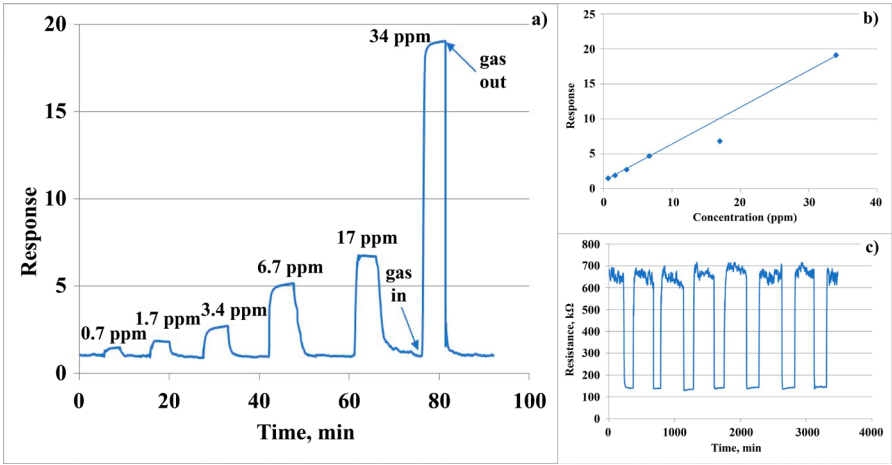
$\text{ZnO}\langle\text{La}\rangle$ թաղանթի հիման վրա պատրաստվել է էթանոլի ցածր կոնցենտրացիաների նկատմամբ բարձր զգայունությամբ օժտված ռեզիստիվ սենսոր: Պինդֆազային ռեակցիայի սինթեզման եղանակով պատրաստվել է փոշեցրման $\text{ZnO}+1$ ատ.% La թիրախ: Օգտագործելով պատրաստված թիրախը բարձրիաճախային

մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով նստեցվել է բարակ գազագայուն նանոկառուցվածքային թաղանթ: Հանվել են $ZnO<La>$ թիրախի SEU (SE, BSE) պատկերները և տարրային անալիզի արդյունքները VEGA TS 5130MM (microanalysis system of INCA Energy 300) սարքավորման միջոցով (Նկ. 14): Պատկերում ակնհայտ

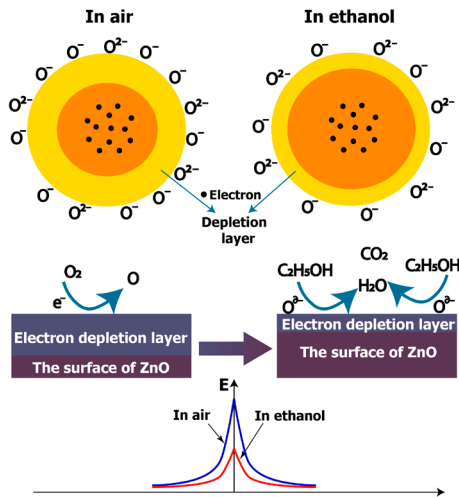


Նկ. 14 $ZnO<La>$ թաղանթի SEU (SE, BSE) պատկերները (a,b) և տարրային անալիզի (EDX) արդյունքները (c,d):

տեսանելի են լանթանի մասնիկները՝ գրեթե համասեռ բաշխված և սպիտակ գույներով: Սպեկտրում առկա են Zn, La, և O տարրերի ընգծված պիկերը, որը փաստում է La-ի իրական առկայությունը ցինկի օքսիդում: La-ի իրական կոնցենտրացիան 0.84 ատ.% է, որը փոքր ինչ տարբերվում է սկզբնական հաշվարկային թվից (1 ատ.%), որը, ենթադրվում է, կապված է սարքի սխալմունքով և տեխնոլոգիական պրոցեսների առանձնահատկություններով: Հանվել են նաև թաղանթի SEU պատկերները, որտեղ նանոհատիկների չափերը եղել են 20-40 նմ: Կատարվել է նաև $ZnO<La>$ թաղանթի մակերևույթի տարրային քարտեզավորում, որը ապացուցում է Zn, Al, O, և La տարրերի հավասարաչափ բաշխումը: Հանվել են նաև սենսորի արձագանքման կորերը ժամանակի ընթացքում էթանոլի տարբեր կոնցենտրացիաների առկայությամբ (Նկ. 15a) և սենսորի արձագանքի կախվածությունը գազի կոնցենտրացիայից (Նկ. 15b): Սենսորը զգայունություն է ցուցաբերել սկսած էթանոլի ծայրահեղ ցածր կոնցենտրացիայից (0.7 ppm) և արձագանք/կոնցենտրացիա կախվածությունն ունի ակնհայտ գծային բնութագիր: Սենսորը նաև ցուցաբերել է արձագանքման բարձր կրկնելիություն՝ արձագանքման/վերականգնման 7 ցիկլիկ կորերի դեպքում (Նկ. 15c):



Նկ. 15 $ZnO<La>$ սենսորի արձագանքն էթանոլի տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում (a), սենսորի արձագանքի կախվածությունը էթանոլի կոնցենտրացիայից (b) և սենսորի արձագանքի կրկնելիությունը ժամանակի ընթացքում 6.7 ppm էթանոլի դեպքում (c):

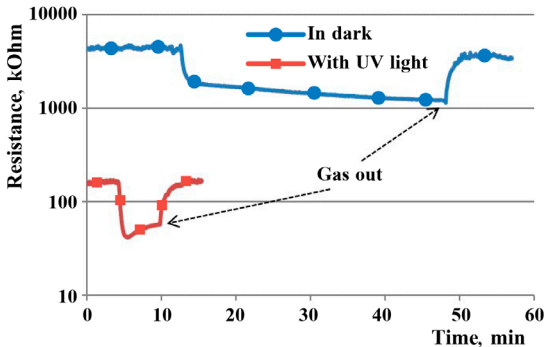


Նկ. 16 $ZnO<La>$ թաղանթի գազագայունության մեխանիզմն էթանոլի առկայությամբ:

$ZnO<La>$ սենսորի գազագայունության մեխանիզմը հատիկային մոդելի շրջանակներում ներկայացված է Նկ. 16-ում, որտեղ էթանոլի առկայությամբ տեղի ունեցող ռեակցիաների շնորհիվ փոխվում են հատիկների մերձավերնության աղբյուրները և հետևաբար՝ թաղանթի դիմադրությունը, որը հանդիսանում է որպես սենսորի ազդանշան: Հայտնի է, որ

բարձր զգայունություն դիտվում է այն դեպքում, երբ հատիկների չափերը համեմատելի են կամ փոքր նյութի Դեբայի երկարությունից ($d \leq 2L_D$): Քանի որ L_D -ն ZnO -ի դեպքում մոտ 20-22 նմ է՝ 250 °C -300 °C ջերմաստիճանային տիրույթում, իսկ մեր թաղանթում հատիկների չափերը՝ 20-40 նմ, ապա սենսորի բարձր զգայունությանը կարելի է վերագրել այս հարաբերակցությունը [4]:

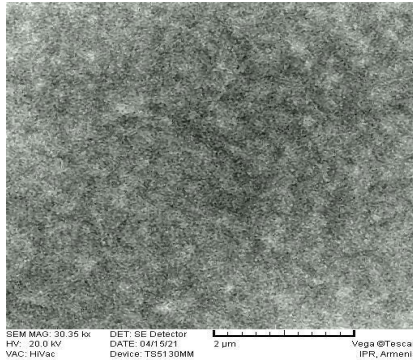
Պատրաստվել է $Fe_2O_3+0.1$ ատ.% Sn մետաղօքսիդային թիրախ պինդֆազային ռեակցիայի մեթոդով և մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով նստեցվել են սենսորի, ագետոնի նկատմամբ զգայուն թաղանթներ: Ուսումնասիրվել են սենսորի գազազգայունության բնութագրերը ագետոնի գոլորշիների առկայությամբ ՈւՄ ճառագայթների (365 նմ) ներքո և առանց դրանց: ՈւՄ ճառագայթների առկայությունն էականորեն բարելավել է սենսորի արձագանքը և արագագործությունը: Հանվել են $Fe_2O_3:Sn$ սենսորի գազազգայուն թաղանթի դիմադրության փոփոխությունը ժամանակի ընթացքում 450 ppm ագետոնի գոլորշիների առկայությամբ ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությամբ և առանց դրանց 250 °C ջերմաստիճանում (Նկ. 17): ՈւՄ ճառագայթների առկայությամբ գազային միջավայրում սենսորը հասել է հագեցման վիճակի բավական արագ, իսկ առանց ՈւՄ ճառագայթների հագեցումը բավական մեծ է: ՈւՄ ճառագայթներն արագացնում են քիմիական ռեակցիաների ընթացքը և խթանում գազ/կիսահաղորդիչ ավելի արդյունավետ փոխազդեցությանը:



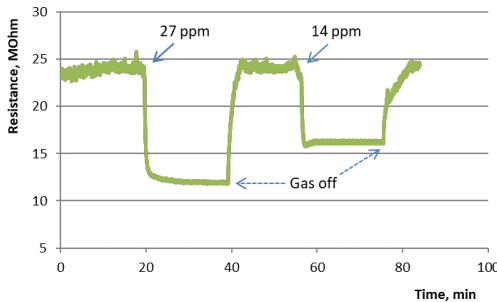
Նկ. 17 $Fe_2O_3:Sn$ թաղանթի դիմադրության փոփոխությունը ժամանակի ընթացքում 450 ppm ագետոնի գոլորշիների առկայությամբ ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությամբ և առանց դրանց՝ 250 °C ջերմաստիճանում:

$Fe_2O_3:ZnO$ (60:40 մոլ.%) նյութի հիման վրա նախագծվել և պատրաստվել է ռեզիստիվ նանոկառուցվածքային սենսոր: Հանգամանորեն ուսումնասիրվել են սենսորի գազազգայունության բնութագրերն ամոնիակի տարբեր կոնցենտրացիաների առկայությամբ՝ աշխատանքային տարբեր ջերմաստիճաններում: Էլեկտրոնային մանրադիտակի միջոցով հետազոտվել է $Fe_2O_3:ZnO$ թաղանթի մակերևույթը և հանվել ՏԷՄ պատկերը: Ինչպես երևում է Նկ.18-ից թաղանթն իրականում բաղկացած է նանոմասնիկներից և դրանց չափերը մոտ 50 նմ են: $Fe_2O_3:ZnO$ սենսորը զգայունություն է ցուցաբերել ամոնիակի ծայրահեղ ցածր կոնցենտրացիաների նկատմամբ: Մասնավորապես՝ սենսորի զգայուն թաղանթի դիմադրությունը փոխվել է 1.5 և 2 անգամ ամոնիակի

համապատասխանաբար 27 ppm և 14 ppm կոնցենտրացիաների դեպքում (Նկ. 19): Հատկանշական է, որ սենսորի զգայունության նվազագույն շեմը (14 ppm) ավելի փոքր է, քան ամոնիակի թույլատրելի առավելագույն կոնցենտրացիան (50 ppm):



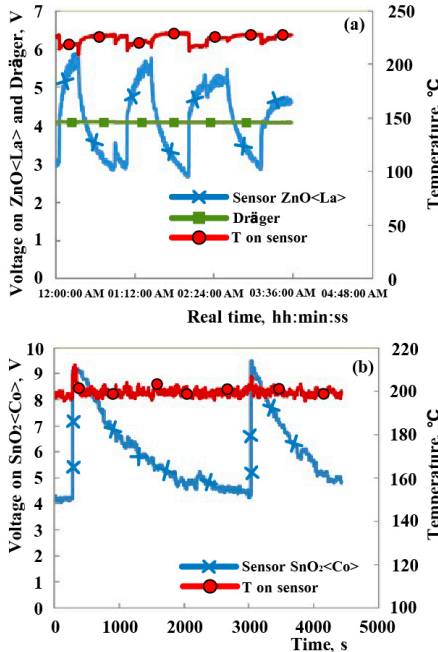
Նկ. 18 Fe₂O₃:ZnO թաղանթի SEI պատկերը:



Նկ. 19 Fe₂O₃:ZnO սենսորի դիմադրության փոփոխությունն ամոնիակի 27 ppm և 14 ppm կոնցենտրացիաների դեպքում 250 °C աշխատանքային ջերմաստիճանում:

Չորրորդ գլխում ներկայացված են մշակված ջրածնի պերօքսիդի սենսորների պատրաստման տեխնոլոգիական քայլերը և գազազգայունության պարամետրերի չափման արդյունքներն ունակային, վոլտամպերային և ռեզիստիվ եղանակներով: Այստեղ ներկայացված են նաև մեր կողմից մշակված ջրածնի պերօքսիդի ձկուն սենսորների բնութագրերը և ձկնան ազդեցությունը այդ պարամետրերի վրա: Մասնավորապես՝ պինդֆազային ռեակցիայի սինթեզման եղանակով պատրաստվել են ZnO + 1 ատ. % La, ZnO + 2 ատ. % La և SnO₂ + 2 ատ. % Co կերամիկական թիրախներ և դրանք ենթարկել մեխանիկական ու քիմիական մշակման: Ստացված թիրախների տարրային անալիզը (NitonTM XL 3t GOLDD+ XRF Analyzer) ցույց է տվել, որ ZnO + 1 ատ. % La և ZnO + 1 ատ. % La թիրախներում լանթանիումի իրական կոնցենտրացիաները եղել են համապատասխանաբար 0.71 ատ.% և 1.47 ատ.%, իսկ SnO₂ + 2 ատ. % Co թիրախում կորպոլը եղել է 1.23 ատ. %: Այսպիսով ստացվել են Sn_{0.9877}Co_{0.0123}O₂, Zn_{0.9929}La_{0.0071}O և Zn_{0.9853}La_{0.0147}O բաղադրություններ: Zn_{0.9929}La_{0.0071}O թիրախից նստեցվել են երկու տարբեր հաստությամբ թաղանթներ (80 նմ և 210 նմ) և չափվել դրանց գազազգայունության բնութագրերը 1800 ppm ջրածնի պերօքսիդի

գոլորշիների առկայությանը (42–45 % RH) տարբեր աշխատանքային ջերմաստիճաններում: Սենսորները ցուցաբերել են ընդգծված արձագանքման/վերականգնման կորեր: $Zn_{0.9929}La_{0.0071}O$ կառուցվածքը ցուցաբերել է լավագույն արդյունքը, ընդ որում, 210 նմ հաստությանը թաղանթը ցուցաբերել է ավելի բարձր զգայունություն աշխատանքային ավելի ցածր ջերմաստիճանում:

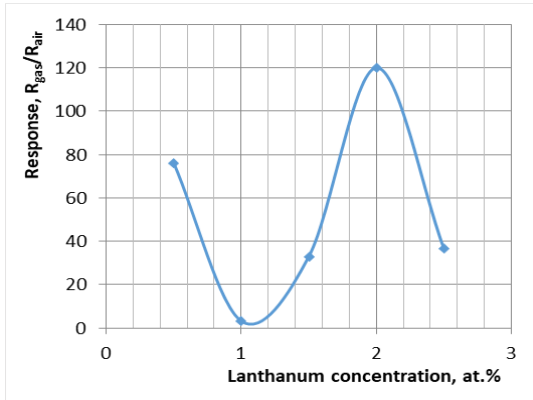


Նկ. 20 $Zn_{0.9929}La_{0.0071}O$ սենսորի արձագանքման/վերականգնման կորերը 10 ppm ջրածնի պերօքսիդի դեպքում 220 °C-ում (a) և $SnO_2<Co>$ սենսորի արձագանքման/վերականգնման կորերը 75 ppm H_2O_2 -ի նկատմամբ 220 °C-ում (b):

Պրահայի քիմիական տեխնոլոգիաների համալսարանում (University of Chemistry and Technology, Prague) չափվել է այս սենսորի զգայունությունը ջրածնի պերօքսիդի նկատմամբ 220 °C-ում և համեմատվել գերմանական “DRAEGER” դետեկտորի արդյունքների հետ: Բնչպես երևում է Նկ. 20a-ից, մեր սենսորը բավական կրկնելի արձագանքել է 10 ppm գազի նկատմամբ, սակայն “DRAEGER”-ն այս կոնցենտրացիայի նկատմամբ զգայունություն չի ցուցաբերել: Նույն լաբորատորիայիում չափվել է նաև $SnO_2<Co>$ սենսորի զգայունությունը 75 ppm գազի նկատմամբ ևս 220 °C-ում: Այս դեպքում նույնպես ստացվել են գազազգայունության բավարար արդյունքներ (Նկ. 20b):

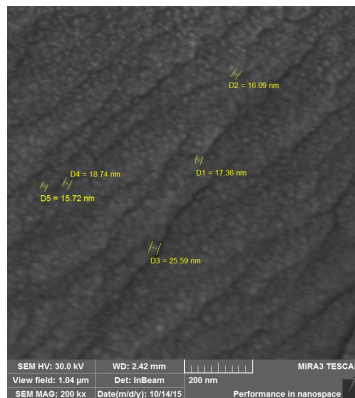
Պինդֆազային ռեակցիայի սինթեզման եղանակով ստացվել են ZnO (wurtzite)-ի 5 թիրախներ հավելած 0.5; 1; 1.5; 2; 2.5 ատ.% La_2O_3 -ով: $ZnO<La>$ թիրախներից “VTC-600-2HD DC/RF Dual-Head High” համակարգի միջոցով նստեցվել են բարակ նանոկառուցվածքային թաղանթներ: Չափվել է լանթանի տարբեր

կոնցենտրացիաներով հագեցած ZnO<La> սենսորների արձագանքը 100 ppm H₂O₂-ի առկայությամբ՝ 150 °C-ում: Առավելագույն արձագանքը (120, (S= R_{gas}/R_{air})) այս գազի նկատմամբ ցուցաբերել է ZnO<2 ատ.% La> կառուցվածքը (Նկ. 21):



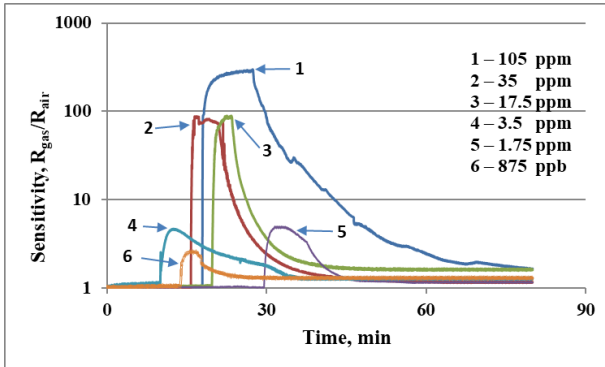
Նկ. 21 ZnO<La> թաղանթի արձագանքի կախվածությունը լանթանի կոնցենտրացիայից 100 ppm H₂O₂ առկայությամբ 150 °C-ում:

Պատրաստվել է SnO₂+2 ատ.% Co թիրախ՝ պինդֆազային սինթեզման եղանակով: Թիրախից մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով պատրաստվել է նանոկառուցվածքային սենսոր՝ H₂O₂-ի գոլորշիների հայտնաբերման համար: Քանի որ թաղանթում հատիկների չափերը բավական մեծ ազդեցություն ունեն գազազայունության պարամետրերի վրա, հանվել է զգայուն թաղանթի SEU պատկերը Mira 3 LMH (Tescan) մանրադիտակի միջոցով: Ինչպես երևում է Նկ. 22-ից, թաղանթն ունի հատիկային կառուցվածք, որտեղ հատիկների չափերը մոտ 19 նմ են:



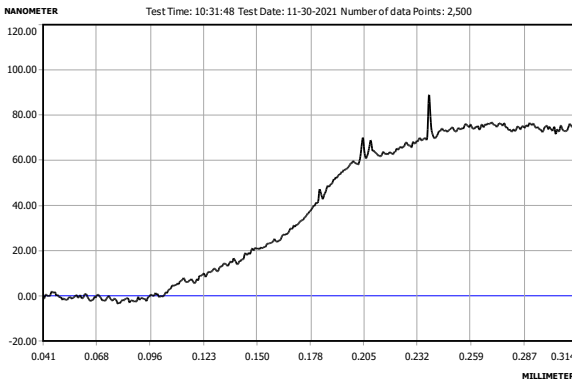
Նկ. 22 SnO₂<Co> թաղանթի SEU լուսանկարը:

Հանվել են աշխատանքային ջերմաստիճանում (150 °C) սենսորի արձագանքման կորերը ջրածնի պերօքսիդի գոլորշիների տաքեր կոնցենտրացիաների դեպքում (Նկ. 23): Սենսորը զգայունություն (4) է ցուցաբերել 875 ppb ջրածնի պերօքսիդի նկատմամբ և այն կոնցենտրացիայի աճին զուգընթաց գծային աճել է մինչև 300:



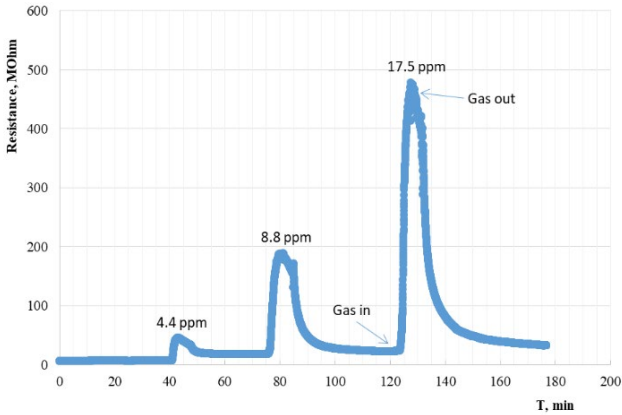
Նկ. 23 SnO₂-Co սենսորի արձագանքման կորերը H₂O₂-ի տարբեր կոնցենտրացիաների առկայությամբ 150 °C ջերմաստիճանում:

SnO₂-Co/FԱՆՆ նյութի հիման վրա պատրաստվել են ձկուն գազային սենսորներ և հանգամանորեն ուսումնասիրվել դրանց գազազգայունության բնութագրերը ջրածնի պերօքսիդի տարբեր կոնցենտրացիաների առկայությամբ աշխատանքային տարբեր ջերմաստիճաններում: Չափվել է փոշեցրման 15 րոպե տևողությամբ ստացված SnO₂-Co/FԱՆՆ թաղանթի հաստությունը Alpha-Step D-300 (KLA Tencor) պրոֆիլամետրի միջոցով: Ինչպես երևում է Նկ. 24-ից, թաղանթի հաստությունը մոտ 75 նմ է:



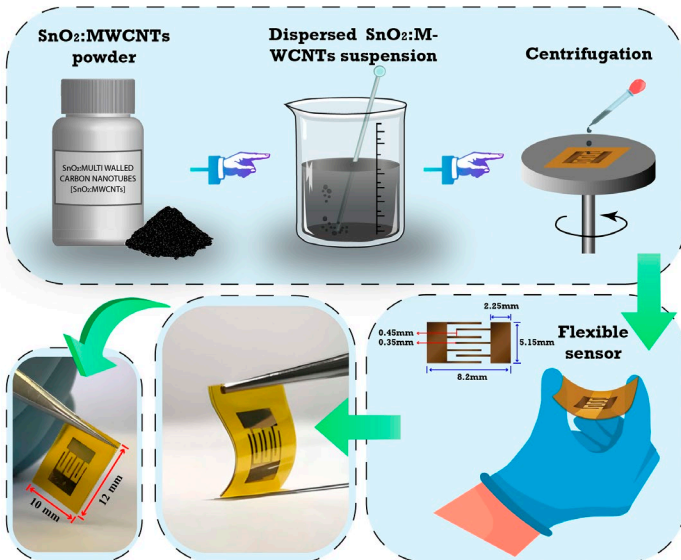
Նկ. 24 SnO₂-Co/FԱՆՆ թաղանթի հաստության չափման արդյունքը:

Չափվել է սենսորի արձագանքը ջրածնի պերօքսիդի տարբեր կոնցենտրացիաների նկատմամբ 120 °C աշխատանքային ջերմաստիճանում (Նկ. 25): Այս ջերմաստիճանում սենսորը ցուցաբերել է բարձր արձագանք՝ սկսած H₂O₂-ի 4.4 ppm կոնցենտրացիայից: Այս կոնցենտրացիայի դեպքում զգայուն շերտի դիմադրությունը փոխվում է ավելի քան 44 անգամ, մինչ 17.5 ppm H₂O₂-ի կոնցենտրացիայի դեպքում այն փոխվում է մոտ 478 անգամ: Տվյալ ջերմաստիճանում տարբեր կոնցենտրացիաների համար արձագանքման ժամանակները տասնյակ վայրկյանների կարգի են, մինչդեռ վերականգնման ժամանակները ընկած են րոպեների տիրույթում:

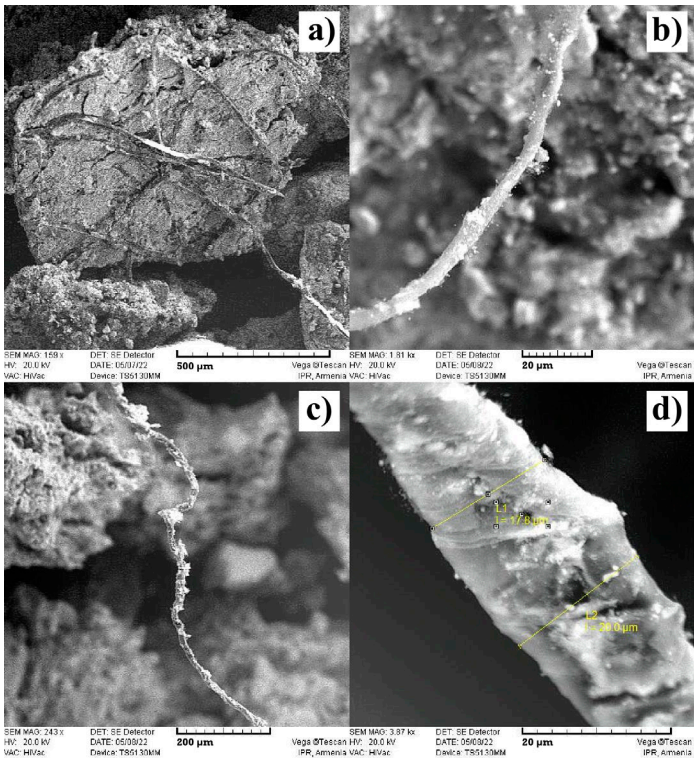


Նկ. 25 SnO₂<Co>/ԲԱՆՆ սենսորի դիմադրության փոփոխությունը ջրածնի պերօքսիդի տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում 120 °C-ում:

Քիմիական նստեցման եղանակով պատրաստվել է SnO₂/ԲԱՆՆ ձկուն սենսոր և հետազոտվել դրա գազազգայունության բնութագրերը ջրածնի պերօքսիդի նկատմամբ: Նախապես պատվիրվել է SnO₂/ՊԱՆՆ-ների փոշի (75:25 wt.%, supplied Nanoshel-UK Ltd. UK) և այն նստեցվել 130 մկմ հաստությամբ պոլիմիդային տակդիրի վրա (Zhongcheng Insulating Material Ltd., China): Տակդիրի վրա հաստատուն դաշտերով մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով նախապես նստեցվել են ոսկյա սանրաձև ռոմբական հպակներ (Նկ. 26): SnO₂/ԲԱՆՆ փոշու և ստացված թաղանթի

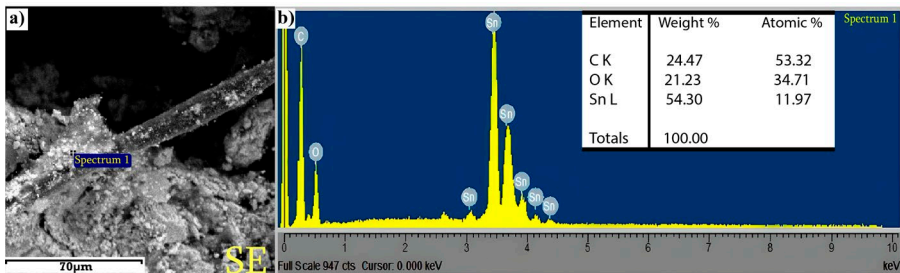


Նկ. 26 SnO₂/ԲԱՆՆ սենսորի պատրաստման տեխնոլոգիական քայլերը և լուսանկարները:

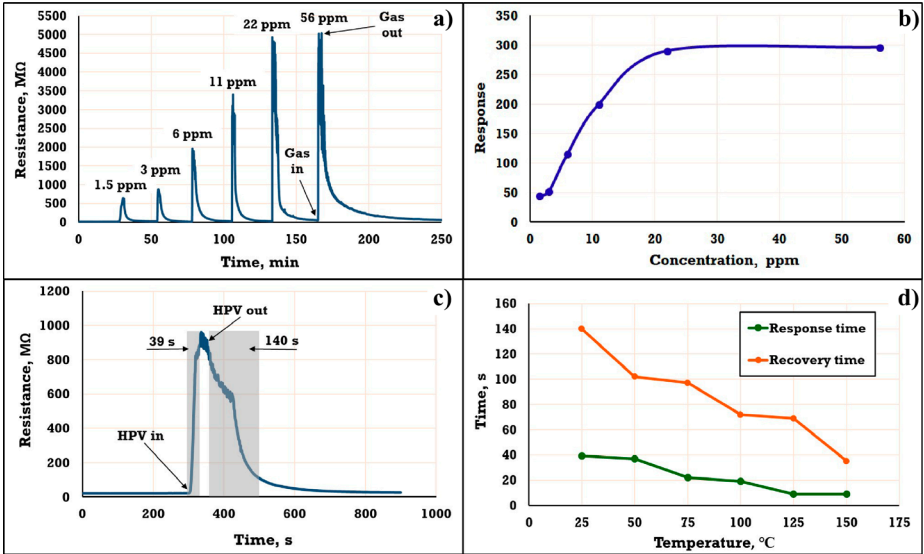


Նկ. 27 SnO₂/FA ՆՆ փոշու (a) և թաղանթի (b-d) ՏԷՄ պատկերները:

ՏԷՄ պատկերները հանվել են VEGA TS 5130MM սարքավորման միջոցով: Նանոխողովակները փոշում ակնհայտ երևում են, որոնք ունեն 15-20 մկմ տրամագիծ և 200-900 մկմ երկարություն (Նկ. 27): Հանվել է նաև թաղանթի “SEM SE” պատկերը և կատարվել տարրային անալիզ: C-ի իրական կոնցենտրացիան SnO₂/FA ՆՆ նյութում եղել է 24.47 կշո.% (Նկ. 28), որը փոքր ինչ տարբերվում է նախնական հաշվարկված արժեքից (25 կշո.%): Սա կարող է պայմանավորված լինել չափող սարքավորման սխալմունքով:



Նկ. 28 SnO₂/FA ՆՆ թաղանթի “SEM SE” պատկերը (a) և տարրային անալիզի (EDX) արդյունքները (b):

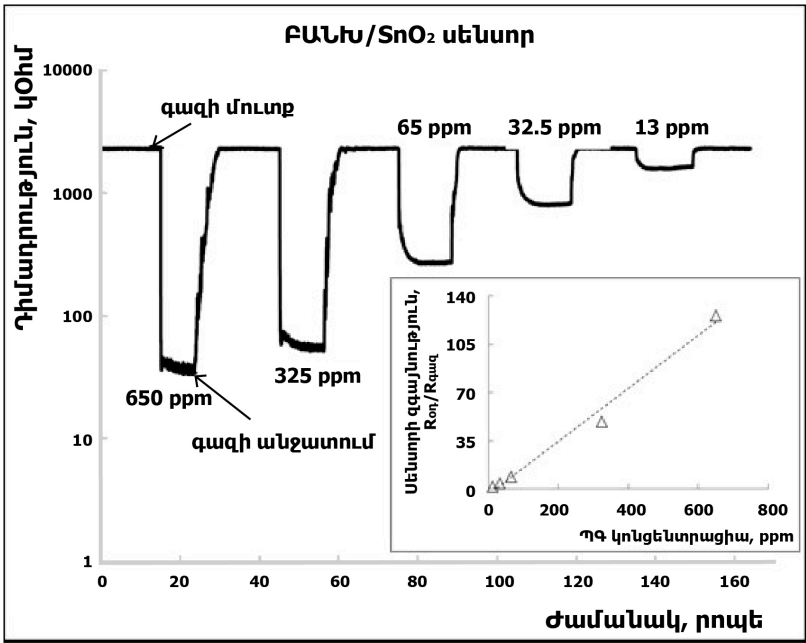


Նկ. 29 SnO₂/FUUV թաղանթի արձագանքման կորերը ջրածնի պերօքսիդի տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում (a), սենսորի արձագանքի կախվածությունը ջրածնի պերօքսիդի գոլորշիների կոնցենտրացիայից (b), սենսորի դիմադրության փոփոխությունը 3 ppm ջրածնի պերօքսիդի առկայությամբ արտացոլված արձագանքման և վերականգնման ժամանակներով (c) և սենսորի արձագանքման և վերականգնման ժամանակների փոփոխությունը կախված ջերմաստիճանից (d):

Սենսորն առավելագույն զգայունություն է ցուցաբերել 75 °C-ում ՈւՄ ճառագայթների առկայությամբ (365 նմ), որտեղ արձագանքը գերազանցել է 400-ը, իսկ առանց ՈւՄ ճառագայթների առավելագույն զգայունությունը դիտվել 125 °C -ում (այս դեպքում զգայունությունը եղել է ավելի փոքր): Հաշվի առնելով, որ սենյակային ջերմաստիճանում ՈւՄ ճառագայթների առկայությամբ ևս սենսորը ցուցաբերել է բավական բարձր զգայունություն (50), ապա որպես աշխատանքային ջերմաստիճան ընտրվել է հենց այս ջերմաստիճանը: Հանվել է նաև սենսորի դիմադրության փոփոխության կորերը 1.5 ppm-ից 56 ppm տիրույթում, որտեղ արձագանքման արժեքները համապատասխանաբար եղել են 44-ից 300 (Նկ. 29a): Սենսորը ցուցաբերել է նաև զծայնություն ջրածնի պերօքսիդի կոնցենտրացիաների 1.5-20 ppm տիրույթում, իսկ ավելի բարձր կոնցենտրացիաների դեպքում նկատվել է որոշակի հագեցման միտում (Նկ. 29b): Ենթադրվում է, որ այս տիրույթում զգայուն շերտի մակերևույթն ամբողջությամբ հագեցնում է գազի մոլեկուլներով և դրանց հետագա ադսորբցիան անհնար է դառնում: Սենսորի արձագանքման և վերականգնման ժամանակները համապատասխանաբար եղել են 39 վ. և 140 վ., իսկ ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց դրանք նվազել են (Նկ. 29c,d): ՈւՄ ճառագայթների կիրառումը գազային սենսորներում բերում է սենսորի սպառման հզորության նվազման: Մյուս կողմից, ճառագայթների առկայությամբ կիսահաղորդչում գեներացվում են էլեկտրոն/խոռոչ զույգեր, որոնք նվազեցնում են կիսահաղորդչի դիմադրությունը և

մասնակցում գազ/կիսահաղորդիչ քիմիական ռեակցիաներին: Ենթադրվում է, որ ՈւՄ ճառագայթներն ազդում են նաև քիմիական ռեակցիաների ակտիվացիայի էներգիաների վրա՝ դարձնելով դրանք ավելի բուռն և արագ [5]:

Հինգերորդ գլխում ներկայացված են ռազմական թունավոր ազդանյութերի (ՌԹԱ) և արդյունաբերական թունավոր նյութերի (ԱԹՆ) նկատմամբ զգայուն սենսորների գազազգայունության բնութագրերը: Այստեղ ներկայացված են նաև ածխածնային նանոկառուցվածքների աճեցման տեխնոլոգիական նկարագրությունը և դրանց բնութագրերը: Այստեղ նկարագրված են նաև կերամիկական թիրախների սինթեզման տեխնոլոգիական քայլերը և բազմաբյուրեղային նյութերի կառուցվածքային բնութագրերը: Այստեղ ամփոփված են ռեզիստիվ սենսորների գազազգայունության մեխանիզմները և տարբեր գազերի քիմիական ռեակցիաները: Մասնավորապես՝ մեր կողմից պատրաստվել են կոբալտով հագեցած և ածխածնային նանոխողովակներով ֆունկցիոնալացված SnO₂ հիման վրա քիմիական ազդանյութերի նկատմամբ բարձր զգայունությամբ օժտված ռեզիստիվ սենսորներ: Որպես գազազգայուն թաղանթ օգտագործվել են 2 ատ. % կոբալտով հագեցած կամ բազմապատ ածխածնային

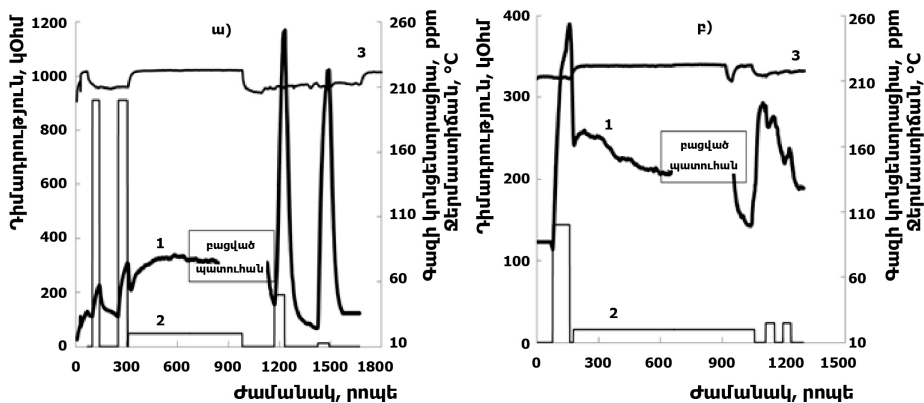


Նկ. 30 ԲԱՆԽ/ՏՆՕ₂ սենսորի դիմադրության փոփոխության կորերը ԴԳ-ի տարբեր կոնցենտրացիաների ազդեցությամբ 200 °C աշխատանքային ջերմաստիճանում: Ներդիրում ներկայացված է ԲԱՆԽ/ՏՆՕ₂ սենսորի զգայունության կախվածությունը ԴԳ-ի կոնցենտրացիայից 200 °C աշխատանքային ջերմաստիճանում:

նանոխողովակներով ֆունկցիոնալացված SnO₂ նանոկառուցվածքային թաղանթները, ինչը բերել է զգայունության էական աճի և աշխատանքային ջերմաստիճանի նվազման: ԲԱՆԽ/ՏՆՕ₂ հիման վրա սենսորի զգայունությունը

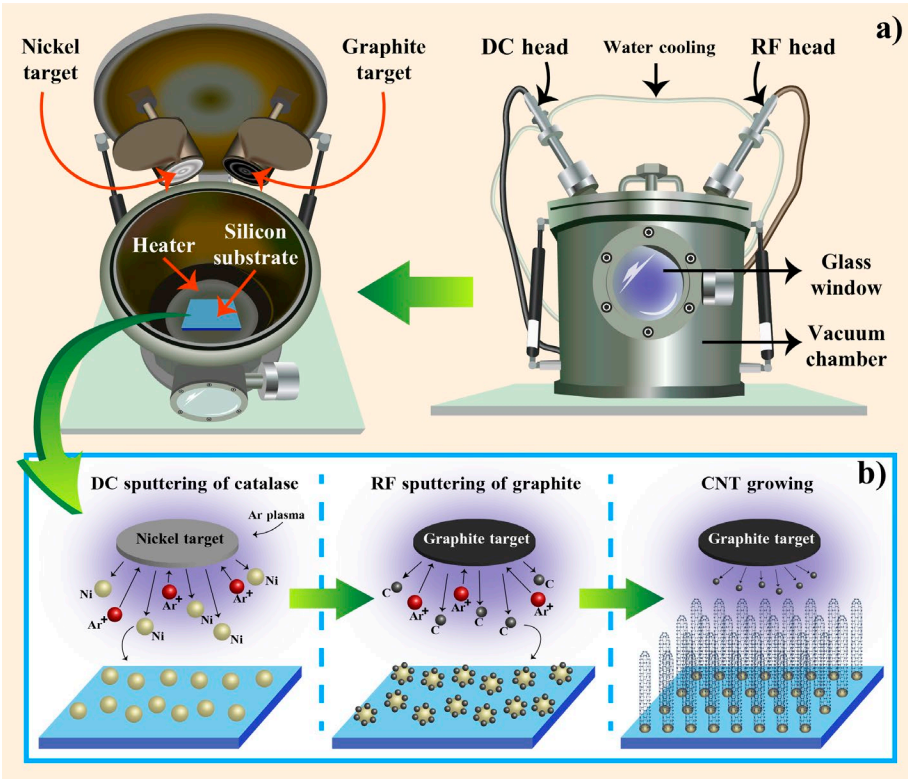
զգալիորեն ավելի բարձր է քան առանձին SnO_2 -ից և FUSiV -ից պատրաստված սենսորների զգայունությունները, այսինքն տեղի ունի սիներգիկ ազդեցություն: Պրոպիլեն գլիկոլի (ՊԳ) բոլոր կոնցենտրացիաների դեպքում սենսորը ցուցաբերել է արագ արձագանք (վայրկյանների կարգի) և ընդունելի վերականգնման ժամանակ՝ 200°C աշխատանքային ջերմաստիճանում (Նկ. 30): Սենսորի զգայունության կախվածությունը գազի կոնցենտրացիայից բոլոր դեպքերում գծային է: Սենսորի զգայունության գծային կախվածությունը ՊԳ-ի, երկվեթիֆորմալդի (ԵՄՖ) և ֆորմալդեհիդի (ՖԱ) կոնցենտրացիայից թույլ է տալիս ճշգրիտ որոշել մթնոլորտում վերը նշված գազերի իրական կոնցենտրացիաները:

$\text{SnO}_2<\text{Co}>$ սենսորը կարող է օգտագործվել $\Omega\text{F-U}$ -ի, մասնավորապես, զարինի և իպրիտի գոլորշիների հայտնաբերման համար: Կոբալտով հագեցած SnO_2 սենսորի զգայունությունը զարինի և իպրիտի գոլորշիների տարբեր կոնցենտրացիաների նկատմամբ չափվել է "University of Defence"-ում (Վիշկով, Չեխիա) "NATO"-ի դրամաշնորհային ծրագրի շրջանակներում: $\text{SnO}_2<\text{Co}>$ սենսորը ցուցաբերել է զգայունություն իպրիտի գոլորշիների նկատմամբ սկսած 25 ppm կոնցենտրացիայից: Սենսորի զգայունությունը զարինի 12,5 ppm կոնցենտրացիայի դեպքում եղել է մոտ $15 \cdot 210^\circ\text{C}$ ջերմաստիճանում (Նկ. 31):



Նկ. 31 $\text{SnO}_2<\text{Co}>$ սենսորի դիսադրության փոփոխության կորերը (1) $\Omega\text{F-U}$ -ների՝ զարինի (ա) և իպրիտի (բ) ազդեցությամբ: (2) և (3) կորերը ցույց են տալիս համապատասխանաբար գազի կոնցենտրացիան և աշխատանքային ջերմաստիճանը:

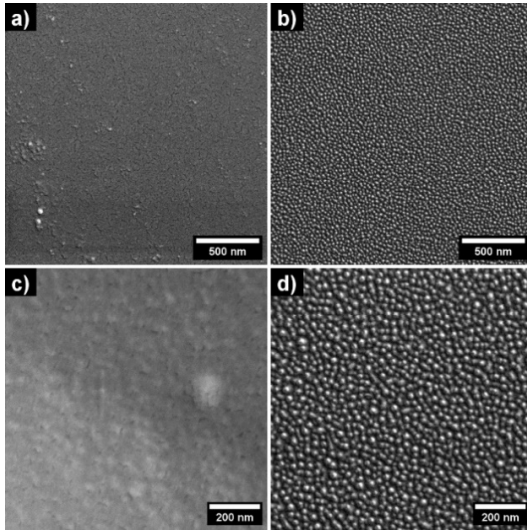
Խնդիր է դրվել մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով ստանալ ոչ միայն նանոհատիկային թաղանթ, այլ նաև միաչափ կառուցվածքներ: Բարձրահալիային մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով հաջողվել է ստանալ ուղղահայաց ուղղությամբ դասավորված ածխածնի նանոխողովակներ: Երկու՝ հաստատուն և փոփոխական դաշտերով աշխատող մագնետրոնային փոշեցրման համակարգը, որով աճեցվել են ածխածնային նանոկառուցվածքները, հնարավորություն է տալիս միևնույն վակուումային միջավայրում փոշեցրում կատարել երկու թիրախներից: Ածխածնային նանոկառուցվածքներն աճեցվել են հետևյալ եղանակով: Փոշեցրման



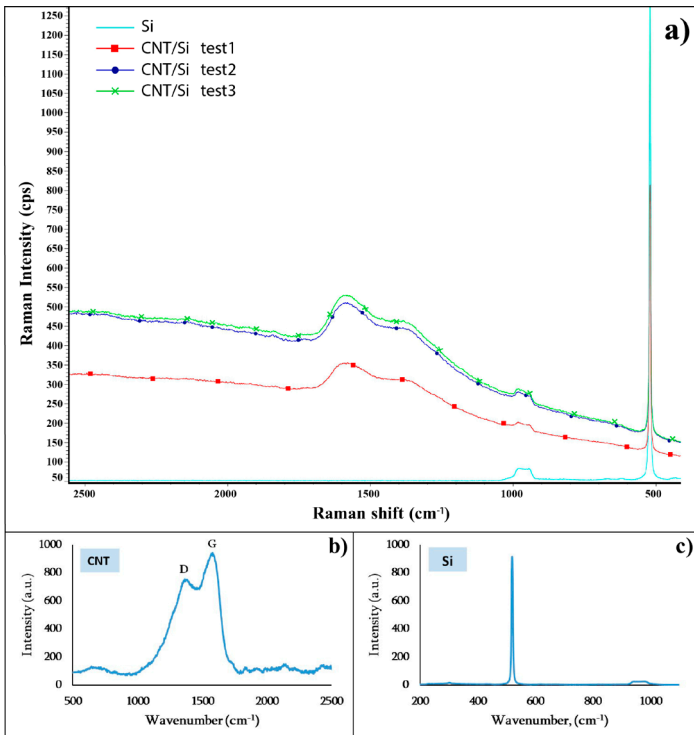
Նկ. 32 Ածխածնային նանոկառուցվածքների աճեցման տեխնոլոգիական ընթացքը:

փոփոխական դաշտերով գլխիկում տեղադրվել է բարձր մաքրությամբ գրաֆիտե թիրախ, իսկ հաստատուն դաշտերով գլխիկում՝ բարձր մաքրությամբ նիկելե թիրախ: Խցիկում բարձր վակուումային մակարդակ ստանալուց հետո նիկելե թիրախից սիլիցիումային տակդիրի (Si(100)) վրա նստեցվել են մետաղական նանոհատիկներ՝ կատալիզային սաղմնային կենտրոններ: Այնուհետև գրաֆիտե թիրախից փոշեցրվել են գրաֆիտե ատոմներ կամ նանոմասնիկներ, որոնք էլ կատալիզային հատիկների շուրջը կուտակվելով ձևավորել են նանոխողովակներ (Նկ. 32):

Միևնույն պրոցեսի ժամանակ փորձ է արվել ածխածնի նանոխողովակներ աճեցնել նաև սիլիցիումի չողորկած մակերևույթին: Այդ մակերևույթի SEU պատկերները ցույց են տվել, որ տակդիրի այս մակերևույթին նանոխողովակներ չեն աճել, այլ միայն նստել է գրաֆիտե ամորֆ թաղանթ: Si(100) մակերևույթին ուղղահայաց ուղղությամբ աճեցված ածխածնի նանոխողովակների SEU պատկերները ներկայցված են Նկ. 33-ում (University of Chemistry and Technology, Prague): Ենթադրվում է, որ աճեցված նանոհամակարգերն ունեն գրեթե բամբուկանման կառուցվածք և բաշխված են



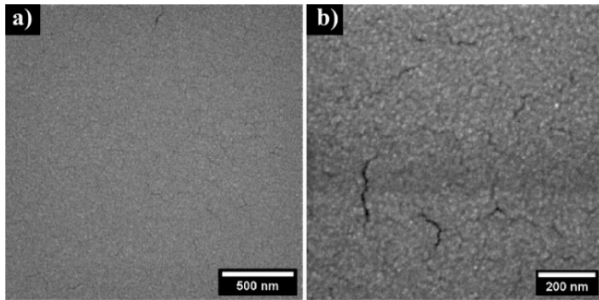
Նկ. 33 Միլիցիումի ողորկած մակերևույթի SEՄ պատկերները մաքուր (a, c) և ածխածնի նանոխողովակների աճեցման դեպքում (b, d):



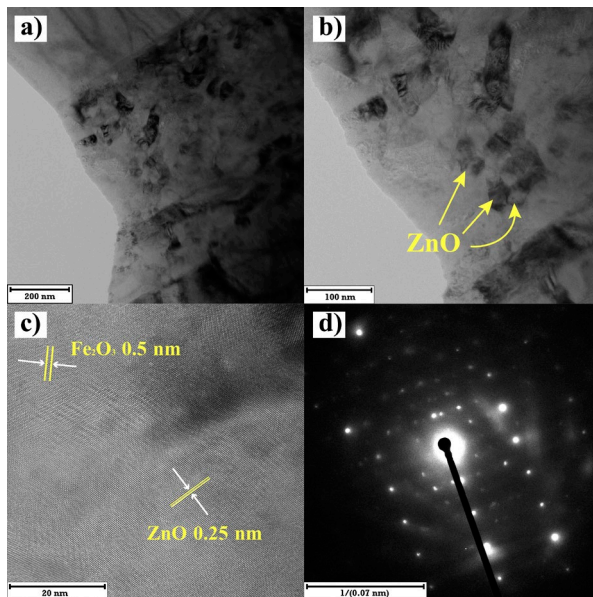
Նկ. 34 Աճեցված նանոկառուցվածքների Ռամանյան սպեկտրը:

բավական համասեռ: Նանոխողովակների տրամագծերն այնքան էլ իրարից չեն տարբերվում և ընկած են 15-25 նմ տիրույթում: Հանվել է նաև աճեցված նանոկառուցվածքների Ռամանյան սպեկտրը (University of Chemistry and Technology, Prague), որտեղ ակնհայտ առկա են հեքսագոնալ կառուցվածքին բնորոշ D (1367 սմ^{-1}) և G (1580 սմ^{-1}) պիկերը (Նկ. 34): Այստեղ առկա մյուս պիկը, որը համընկնում է մոտ 500 սմ^{-1} պիքային թվին, համապատասխանում է սիլիցոնային տակդիրին:

Հաջողվել է սինթեզել $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ բազմաբյուրեղային կառուցվածք և հանգամանորեն հետազոտել դրա բյուրեղական հատկությունները: Նախ և առաջ հանվել են թիրախի ՏԷՄ պատկերները, որտեղ խոռոչների միջին տրամագիծը տատանվել է 5-10 մկմ տիրույթում: Հանվել են նաև մագնետրոնային եղանակով փոշեցրված թաղանթի ՏԷՄ պատկերները: Այստեղ հատիկների չափսերը ընկած են 10-20 նմ տիրույթում (Նկ. 35):



Նկ. 35 Փոշեցրված $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ թաղանթի ՏԷՄ պատկերները:



Նկ. 36 Սինթեզված $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ նյութի ՓԷՄ (a-c) և ընտրված տարածքի (էլեկտրոնի) դիֆրակցիոն (d) պատկերները:

$\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ թաղանթը հետազոտվել է նաև Փոխանցման էլեկտրոնային մանրադիտակով (ՓԷՄ) (EFTEM Jeol 2200 FS, University of Chemistry and Technology, Prague): Ինչպես երևում է Նկ. 36a-c-ից, ZnO -ի հեքսագոնալ կառուցվածքն ակնհայտ է և Fe_2O_3 ու ZnO նյութերի բյուրեղական հարթությունների հեռավորությունները (d) համապատասխանաբար ստացվել են 0.5 նմ և 0.25 նմ: Ընտրված տարածքի (էլեկտրոնի) դիֆրակցիոն պատկերը (SAED) ցույց է տվել, որ սինթեզված նյութը բազմաբյուրեղային է (Նկ. 36d):

Եզրակացությունների մասում ամփոփված են ատենախոսության գլխավոր եզրահանգումները և արդյունքները:

1. Պոլիկոոր/ $\text{FUSi}/\text{SnO}_2(1:66)/\text{Pd}$ կառուցվածքը ցուցաբերել է բավական մեծ զազագայունության արժեքներ (ավելի քան 400) և հազեցման բնութագիր ջրածնի նկատմամբ, մինչդեռ պոլիկոոր/ $\text{WO}_3\text{-SnO}_2(1:9)/\text{Pd}$ սենսորն ունի գրեթե գծային բնութագիր, սակայն ավելի ցածր զգայունություն:
2. $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ սենսորը ջրածնի 75-2000 ppm կոնցենտրացիաների տիրույթում (200-250 °C ջերմաստիճանային տիրույթում) ցուցաբերել է հստակ արձագանքման և վերականգնման բնութագիր, արագ արձագանք (48-91 վ.), սակայն ժամանակի ընթացքում դիտվել է դիմադրության փոքր ինչ շեղում սկզբնական արժեքից: 200 °C աշխատանքային ջերմաստիճանում սենսորի արձագանքը եղել է ավելի քան 1137 և դիտվել է դիմադրության արժեքի 90 %-ից բարձր վերականգնում:
3. $\text{FUSi}:\text{SnO}_2$ ձկուն սենսորը ցուցաբերել է բարձր զգայունություն ջրածնի ցածր կոնցենտրացիաների նկատմամբ (25-1000 ppm), ինչպես նաև բարձր ընտրողունակություն և կրկնելիություն: Սենսորն արձագանքել է նույնիսկ 25 ppm ջրածնի նկատմամբ, որի դեպքում զգայուն շերտի դիմադրությունը փոխվել է ավելի քան 2.5 անգամ: Սենսորը ցուցաբերել է նաև բարձր արագագործություն (տասնյակ վայրկյաններ) և արձագանքի կայունություն բազմաթիվ ձկումների նկատմամբ:
4. $\text{SnO}_2+\text{Nb}_2\text{O}_5$ (80:20 կշռ.%) սենսորը 250 °C ջերմաստիճանում ZnO -ի տարբեր կոնցենտրացիաների դեպքում ցուցաբերել է 15 %-ից 45 % արձագանք: Սենսորի արձագանքման և վերականգնման ժամանակները վայրկյանների կարգի են:
5. $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Ga}_2\text{O}_3$ (96:4 կշռ.%) թիրախից բարձրհաճախային մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով նստեցվել են փոշեցրման 15 և 25 բույե տևողությամբ թաղանթներ, որոնց հաստությունները եղել են համապատասխանաբար 125 նմ և 180 նմ: Ավելի բարակ թաղանթը համեմատաբար ավելի բարձր և գծային զգայունություն է ցուցաբերել ZnO -ի նկատմամբ 250 °C-ում: ZnO -ի նկատմամբ առավելագույն զգայունությունը դիտվել է փոշեցրման 60 Վտ հզորության դեպքում (փոշեցրման հաստատուն տևողության դեպքում), որի ժամանակ ձևավորվել է նպաստավոր կառուցվածք՝ ZnO -ի մոլեկուլների ադսորբցիայի և դեպի թաղանթի խորք դիֆուզիայի համար:
6. Զուլ-գել եղանակով պատրաստվել է իզոբութանի սենսոր՝ հիմնված կոմպոզիտային USi/SnO_2 կառուցվածքի վրա: Սենսորի մակերևույթը պատվել է 0.01 մոլ և 0.03 մոլ չափաբաժնով $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ -ի ծածկույթով՝ որպես զգայունությունը բարելավող կատալիզ: Սենսորները սկսել են զգայունություն ցուցաբերել արդեն 120 °C ջերմաստիճանում և առավել բարձր զգայունությամբ է օժտված եղել 0.03 մոլ $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ -ով հազեցած սենսորը:

7. $\text{SnO}_2/\text{F}_2\text{U}_2\text{N}_2/\text{Pd}$ սենսորի առավելագույն զգայունությունը իզոթրոթանի նկատմամբ դիտվել է 0.03 մոլ $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ կոնցենտրացիայով կատալիզային նյութի դեպքում, սակայն այս դեպքում արձագանքման ժամանակները եղել են բավական մեծ՝ 2-3 ր., իսկ 0.01 մոլ $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ -ի դեպքում՝ 30-40 վ.: Կապակցող նյութի՝ պոլիպրոպիլենի հավելումից հետո 0.03 մոլ $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ -ով հագեցած կառուցվածքը ավելի զգայուն է դարձել իզոթրոթանի նկատմամբ 250 °C-ից ցածր ջերմաստիճաններում, սակայն առավել բարձր զգայունություն գրանցվել է 0.01 մոլ $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ կատալիզային հավելման դեպքում՝ 300 °C-ում:
8. $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{F}_2\text{U}_2\text{N}_2$ (25:1) նյութի հիման վրա պատրաստվել է նանոկոմպոզիտային սենսոր և չափվել դրա զգայունությունը էթանոլի նկատմամբ: Սենսորը արձագանքել է էթանոլի գոլորշիներին սկսած 150 °C-ից, իսկ արդեն 200 °C-ում արձագանքը հասել է մոտ 100-ի: Միևնույն կոնցենտրացիայի դեպքում սենսորն ավելի քան 5 անգամ ավել արձագանք է ցուցաբերել ալկոհոլի նկատմամբ, քան ջրածնի, մեթանի և իզոթրոթանի:
9. ՈւՄ ճառագայթների ազդեցությունը SnO_2+2 ատ.% Co_2O_3 սենսորին սենյակային ջերմաստիճանում օժտել է զգայունությամբ՝ 150 ppm էթանոլի գոլորշիների առկայությամբ սենսորի դիմադրությունը փոխվել է մոտ 400 Օհմ-ով: Սենսորի արձագանքը 900 ppm էթանոլի գոլորշիների նկատմամբ ուլտրամանուշակագույն ճառագայթների ազդեցությամբ սենյակային ջերմաստիճանում եղել է ավելի քան 24 %: 200 °C ջերմաստիճանում սենսորի արձագանքը 0.5 ppm էթանոլի նկատմամբ եղել է ավելի քան 3.5:
10. $\text{ZnO}<\text{La}>$ թաղանթի հիման վրա պատրաստվել է էթանոլի ցածր կոնցենտրացիաների նկատմամբ բարձր զգայունությամբ օժտված ռեզիստիվ սենսոր: La-ի իրական կոնցենտրացիան թաղանթում եղել է 0.81 ատ.%, որը էականորեն չի տարբերվել սկզբնական հաշվարկային արժեքից (1 ատ.%): "FTIR" անալիզը ցույց է տվել ZnO -ի ընդգծված պիկը և O-H խմբերի բացակայությունը սպեկտրում: Սենսորը զգայունություն է ցուցաբերել սկսած էթանոլի ծայրահեղ ցածր կոնցենտրացիայից (0.7 ppm) և արձագանք/կոնցենտրացիա կախվածությունն ունեցել է ակնհայտ գծային բնութագիր: Սենսորը ցուցաբերել է նաև արձագանքման բարձր կրկնելիություն և բարձր ընտրողունակություն:
11. Պատրաստվել է ացետոնի սենսոր՝ $\text{Fe}_2\text{O}_3+0.1$ ատ.% Sn նյութի հիման վրա: ՈւՄ ճառագայթների առկայությունն էականորեն բարելավել է սենսորի արձագանքը և արագագործությունը: Սենսորը ացետոնի գոլորշիների նկատմամբ ցուցաբերել է բավական բարձր արձագանք (4.2) գործնականում վայրկյանների ընթացքում (32 վ.): 225 °C և 250 °C ջերմաստիճաններում ՈւՄ ճառագայթները բարելավել են սենսորի զգազգայունության պարամետրերը:
12. $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ նյութի հիման վրա նախագծվել և պատրաստվել է ռեզիստիվ սենսոր: $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ սենսորը զգայունություն է ցուցաբերել ամոնիակի ծայրահեղ ցածր կոնցենտրացիաների նկատմամբ՝ սենսորի զգայուն թաղանթի դիմադրությունը փոխվել է 1.5 անգամ ամոնիակի 14 ppm կոնցենտրացիայի դեպքում:
13. Պինդֆազային սինթեզման եղանակով պատրաստվել են $\text{ZnO} + 1$ ատ. % La, $\text{ZnO} + 2$ ատ. % La և $\text{SnO}_2 + 2$ ատ. % Co կերամիկական թիրախներ: $\text{ZnO}_{9929}\text{La}_{0.0071}\text{O}$ կառուցվածքը ցուցաբերել է զգայունության ավելի լավ արդյունքներ ջրածնի

- պերօքսիդի նկատմամբ, ընդ որում, 210 նմ հաստությամբ թաղանթը ցուցաբերել է ավելի բարձր զգայունություն աշխատանքային ավելի ցածր ջերմաստիճանում ($R_{\text{գազ}}/R_{\text{օդ}}=78$, $n=1800$ ppm, $T=250$ °C): Մեր սենսորը բավական կրկնելի արձագանքել է 10 ppm գազի նկատմամբ, սակայն գերմանական "DRAEGER" դետեկտորը այս կոնցենտրացիայի նկատմամբ զգայունություն չի ցուցաբերել: $\text{SnO}_2 <\text{Co}>$ սենսորը զգայունություն է ցուցաբերել 75 ppm H_2O_2 -ի նկատմամբ 220 °C-ում:
14. Պինդֆազային սինթեզման եղանակով պատրաստվել են ZnO -ի 5 թիրախներ հազեցած 0.5; 1; 1.5; 2; 2.5 առ. % La_2O_3 -ով և դրանցից նստեցվել են բարակ նանոկառուցվածային թաղանթներ: Չափվել է լայնթանի տարբեր կոնցենտրացիաներով հազեցած $\text{ZnO}<\text{La}>$ սենսորների արձագանքը 100 ppm ջրածնի պերօքսիդի առկայությամբ 150 °C-ում և առավելագույն արձագանք (120) ցուցաբերել է $\text{ZnO}<2$ առ. % $\text{La}>$ կառուցվածքը:
15. Պատրաստվել է 2 առ. % Co -ով հազեցած SnO_2 թիրախ՝ պինդֆազային ռեակցիայի սինթեզման եղանակով: Նույնիսկ ջրածնի պերօքսիդի ծայրահեղ ցածր՝ 875 ppb կոնցենտրացիայի դեպքում սենսորի արձագանքը եղել է 2.8 և 2.15՝ համապատասխանաբար 100 °C և 150 °C ջերմաստիճաններում: 150 °C-ում ջրածնի պերօքսիդի կոնցենտրացիայի աճին գուզնթաց սենսորի արձագանքը գծային աճել է մինչև 300:
16. $\text{SnO}_2 <\text{Co}>/\text{FUS}$ նյութի հիման վրա պատրաստվել են ձկուն գազային սենսորներ և հանգամանորեն ուսումնասիրվել դրանց գազազգայունության բնութագրերը ջրածնի պերօքսիդի տարբեր կոնցենտրացիաների առկայությամբ աշխատանքային տարբեր ջերմաստիճաններում: Սենսորը ցուցաբերել է գրեթե ամբողջությամբ վերականգնվող արձագանքման բնութագիր և ծայրահեղ ցածր զգայունության նվազագույն շեմ (4.4 ppm): Սենսորը 105 ppm ջրածնի պերօքսիդի գոլորշիների առկայությամբ ցուցաբերել է բավական բարձր զգայունություն՝ 237:
17. Քիմիական նստեցման եղանակով պատրաստվել է SnO_2/FUS (75:25 կշռ. %) ձկուն սենսոր և հետազոտվել դրա բնութագրերը ջրածնի պերօքսիդի նկատմամբ: FUS -ների տրամագիծը տատանվել է 15-20 մկմ, իսկ երկարությունը՝ 200-900 մկմ տիրույթներում: C-ի իրական կոնցենտրացիան SnO_2/FUS նյութում եղել է 24.47 կշռ. %, թաղանթի տարրային քարտեզում C, O և Sn տարրերը բաշխված են եղել գրեթե հավասարաչափ, իսկ ռենտգենյան պատկերում առկա են եղել անագի օքսիդի և ածխածնի պիկերը: Որպես աշխատանքային ջերմաստիճան ընտրվել է սենյակային ջերմաստիճանը՝ ՈւՄ ճառագայթների առկայությամբ: Սենսորի արձագանքման արժեքները գազի կոնցենտրացիայի 1.5 ppm-ից 56 ppm տիրույթում ընկած են եղել 44-300 միջակայքում և այն ցուցաբերել է բարձր ընտրողունակություն:
18. $\text{SnO}_2 <\text{Co}>$ սենսորը C_6F_6 -ի նկատմամբ զգայունություն է ցուցաբերել սկսած 100 °C ջերմաստիճանից, իսկ C_6F_6 -ի, C_2F_6 -ի և CF_4 -ի նկատմամբ՝ 150 °C-ից: $\text{SnO}_2 <\text{Co}>$ սենսորը ցուցաբերել է զգայունություն իպրիտի գոլորշիների նկատմամբ սկսած 25 ppm կոնցենտրացիայից, իսկ զգայունությունը զարհնի 12.5 ppm կոնցենտրացիայի դեպքում եղել է մոտ 15: FUS/SnO_2 սենսորը զգայունություն է ցուցաբերել CF_4 -ի, C_2F_6 -ի և SF_6 -ի նկատմամբ սկսած համապատասխանաբար 50 °C, 100 °C և 120 °C աշխատանքային ջերմաստիճաններից: Աշխատանքային

օպտիմալ ջերմաստիճանում (200-220 °C) FУՆԽ/SnO₂ սենսորի դիմադրությունը փոփոխվել է 42, 125 և 5.5 անգամ համապատասխանաբար ՊԳ-ի, ԵՄՖ-ի և ՖԱ-ի գոլորշիների առկայությամբ:

19. Մագնետրոնային փոշեցրման եղանակով աճեցվել և հետազոտվել են ուղղահայաց ուղղությամբ դասավորված ածխածնի նանոկառուցվածքներ: Սիլիցիումային տակդիրի խորդուրդ կողմը նպաստավոր պայմաններ չի ապահովել նանոխողովակների աճի համար: Si(100) մակերևույթին աճեցված նանոկառուցվածքները դիտվել են դրանց ՏԷՄ պատկերներում, իսկ դրանց Ռամանյան սպեկտրում առկա պիկերը փաստել են հեքսագոնալ կառուցվածքի առկայությունը:

20. Մինթեզվել է Fe₂O₃:ZnO թիրախ և հանգամանորեն հետազոտվել դրա բյուրեղային հատկությունները: ՓԷՄ պատկերներից ակնհայտ է եղել ZnO-ի հեքսագոնալ կառուցվածքը և Fe₂O₃ ու ZnO նյութերի բյուրեղական հարթությունների հեռավորությունները համապատասխանաբար ստացվել են 0.5 նմ և 0.25 նմ: Ընտրված տարածքի (էլեկտրոնի) դիֆրակցիոն պատկերը (SAED) ցույց է տվել, որ սինթեզված նյութը բազմաբյուրեղային է:

Օգտագործված գրականության ցանկ

1. G. Korotcenkov, The role of morphology and crystallographic structure of metal oxides in response of conductometric-type gas sensors, Mater. Sci. Eng. R 61, 2008, 1-39.
2. S. Dhall, B. Mehta et al., A review on environmental gas sensors: Materials and technologies, Sensors International 2, 2021, 100116.
3. A. Srivastava and P. Chakrabarti, Modulation of electronic conductivity and bandgap of electrochemically polymerised polycarbazole films using montmorillonite, multi-walled carbon nanotube and reduced graphene oxide as nanofillers, Micro Nano Lett. 13, 2018, 1335.
4. Y. Sun, S. Liu et al., Metal Oxide Nanostructures and Their Gas Sensing Properties: A Review, Sensors 12, 2012, 2610-2631.
5. J. Suh, T. Eom et al., Light-activated gas sensing: a perspective of integration with micro-LEDs and plasmonic nanoparticles, Mater. Adv. 2, 2021, 827-844.

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրվել են հետևյալ աշխատանքներում

Հոդված գիտական ամսագրում (28 հատ)

1. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Khachaturyan E.A., Aleksanyan M.S., Gambaryan K.M., Horvath E., Smajda R., Forro L. and Magrez A. // Manufacture and investigation of gas sensor made of CNT/SnO₂ tube / Armenian Journal of Physics, 2011, 4, 206-210.
2. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Khachaturyan E.A., Aleksanyan M.S., Forro L., Magrez A., Hernadi K. and Nemeth Z. // Manufacturing and investigations of i-butane sensor made of SnO₂/multiwall-carbon-nanotube nanocomposite / Sensors and Actuators B, 2012, 173, 890-896.
3. Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S., Hovhannisyan R.V., Shahnazaryan G.E., Aroutiounian V.M., Hernadi K., Nemeth Z. and Forro L. // Gas sensors made of multiwall carbon nanotubes modified by tin dioxide / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2013, 48, 176-183.

4. Hovhannisyan R.V., Khondkaryan H.D., Aleksanyan M.S., Arakelyan V.M., Semerjyan B.O., Gasparyan F.V. and Aroutiounian V.M. // Static and noise characteristics of nanocomposite gas sensors / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2014, 49, 151-157.
5. Gasparyan F.V., Khondkaryan H.D. and Aleksanyan M.S. // New applications of the noise spectroscopy for hydrogen sensors / Journal of Modern Physics, 2014, 5, 1662-1669.
6. Hovhannisyan R.V., Khondkaryan H.D., Aleksanyan M.S., Gasparyan F.V., Arakelyan V.M. and Aroutiounian V.M. // Sensitivity and low-frequency noises of gas sensors made on nanoscale composite material / Nano Studies, 2014, 9, 21-28.
7. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Shahnazaryan G.E., Aleksanyan M.S., Hernadi K., Nemeth Z., Berki P., Papa Z., Toth Z. and Forro L. // The ethanol sensors made from α -Fe₂O₃ decorated with multiwall carbon nanotubes / Advances in Nano Research, 2015, 3, 1-11.
8. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahnazaryan G.E., Vrnata M., Fitl P., Viček J., Gharajyan K.S. and Kasparyan H.S. // Sensor for detection of chemical agents made of Co-doped SnO₂ / Armenian Journal of Physics, 2017, 10, 122-127.
9. Shahkhatuni G.H., Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S. and Shahnazaryan G.E., // Conductometric sensor for hydrogen peroxide vapors detection / Armenian Journal of Physics, 2018, 11, 153-159.
10. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S., Shahnazaryan G.E., Kacer P., Picha P., Kovarik J., Pekarek J. and Joost B. // Thin-film SnO₂ and ZnO detectors of hydrogen peroxide vapors / Journal of Sensors and Sensor Systems, 2018, 7, 281-288.
11. Aleksanyan M.S. // Magnetron Sputtering Techniques and Their Applications at Gas Sensors Manufacturing / Armenian Journal of Physics, 2019, 12, 62-77.
12. Shahkhatuni G.H., Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S. and Shahnazaryan G.E. // Investigation of Sensor Made of ZnO:La for Detection of Hydrogen Peroxide Vapours by Impedance Spectroscopy Method / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2019, 54, 188-195.
13. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Zakaryan H.A., Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M. and Shahnazaryan G.E. // Influence of UV Rays on the Volt-Capacity Characteristic of SnO₂:Co Sensor of Vapors of Hydrogen Peroxide / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2020, 55, 151-156.
14. Aleksanyana M.S., Sayunts A.G., Zakaryan A.A., Harutyunyan V.M., Arakelyan V.M., and Shahnazaryan G.E. // Investigations of Sensors for Detection of Hydrogen Peroxide Vapors under the Influence of UV Illumination / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2020, 55, 205-212.
15. Aghamalyan M.A., Hunanyan A.A., Aroutiounian V.M., Aleksanyan M.S., Sayunts A.G. and Zakaryan H.A. // First-Principles Study of the Interaction of H₂O₂ with the SnO₂ (110) Surface / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2020, 55, 235-239.
16. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Zakaryan H.A., Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M. and Shahnazaryan G.E. // Effects of UV Irradiation on the Sensing Properties of Co-doped

- SnO₂ Thin Film for Ethanol Detection / International Journal on Advances in Systems and Measurements, 2020, 13, 312-321.
17. Aleksanyan M.S., Aroutiounian V.M., Shahnazaryan G.E. and Sayunts A.G. // Cobalt Doped SnO₂ Thin Film for Detection of Vapor Phase Hydrogen Peroxide / Armenian Journal of Physics, 2021, 14, 8-18.
 18. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Aroutiounian V.M., Shahnazaryan G.E. and Shahkhatuni G.H. // Influence of Ultraviolet Rays on Sensitivity of Sensors for Acetone Vapor Detection / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2021, 56 (2), 109-116.
 19. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahkhatuni G.H., Shahnazaryan G.E. and Aroutiounian V.M. // Study of Gas Sensitivity of SnO₂ (Nb) Film in Liquefied Petroleum Gas / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2021, 56 (2), 139-145.
 20. Aleksanyan M.S. // Influence of the Lanthanum Doping on the Gas Sensing Properties of the Magnetron Sputtered ZnO films for H₂O₂ Vapor Detection / Armenian Journal of Physics, 2021, 14, 110-116.
 21. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Aroutiounian V.M., Shahnazaryan G.E. and Shahkhatuni G.H. // Study of Characteristics of the Sensor Detecting of Low Concentration of Ammonia / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2021, 56, 352-358.
 22. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahkhatuni G.H., Simonyan Z.G., Shahnazaryan G.E. and Aroutiounian V.M. // Use of Nanostructured Fe₂O₃:ZnO Film for Detection of Hydrogen / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2022, 57 (2), 140-145.
 23. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahkhatuni G.H., Simonyan Z.G., Aroutiounian V.M. and Shahnazaryan G.E. // Flexible SnO₂(Co)/MWCNT Sensor for Detection Low Concentrations of Hydrogen Peroxide Vapors / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2022, 57 (2), 133-139.
 24. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahkhatuni G.H., Simonyan Z.G., Shahnazaryan G.E. and Aroutiounian V.M. // Gas Sensor Based on ZnO Nanostructured Film for the Detection of Ethanol Vapor / Chemosensors, 2022, 10 (7), 245.
 25. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahkhatuni G.H., Simonyan Z.G., Aroutiounian V.M. and Shahnazaryan G.E. // Flexible sensor based on multi-walled carbon nanotube-SnO nanocomposite material for hydrogen detection / Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 2022, 13 (3), 035003.
 26. Shahnazaryan G.E., Shahkhatuni G.A., Aleksanyan M.S., Simonyan Z.G., Aroutiounian V.M. and Sayunts A.G. // Investigations of the Impedance Characteristics of a Nanostructured ZnO Sensor for Hydrogen Peroxide Vapors / Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), 2022, 57 (3), 254-262.
 27. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahkhatuni G.H., Simonyan Z.G., Kasparyan H.S. and Kopecký D. // Room Temperature Detection of Hydrogen Peroxide Vapor by Fe₂O₃:ZnO Nanograins / Nanomaterials, 2022, 13 (1), 120.
 28. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahkhatuni G.H., Simonyan Z.G., Aroutiounian V.M. and Khachatryan E.A., Detection of hydrogen peroxide vapor using flexible gas sensor based on SnO₂ nanoparticles decorated with multi-walled carbon nanotubes. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 2023, in press.

Գիտաժողովի մասնակցություն (17 հաստ)

1. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Khachaturyan E.A., Shahnazaryan G.E., Aleksanyan M.S., Gambaryan K.M., Horvath E., Smajda R., Forro L. and Magrez A. // Manufacture and investigation of gas sensor made of carbon nanotube / 2011 / Proc. of the 8 th Intern. Conf. Semiconductor Micro- and Nanoelectronics, 14-18, Armenia.
2. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Shahnazaryan G.E., Khachaturyan E.A., Aleksanyan M.S., Forro L., Margez A., Hernadi K. and Nemeth Z. // i-Butane sensor made of SnO₂/multiwall-carbon-nanotube nanocomposite / 2012 / Proc. of the 14th Intern. Meeting on Chemical sensors (IMCS 2012), 1068-1069, Germany.
3. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Shahnazaryan G.E., Khachaturyan E.A., Aleksanyan M.S., Forro L., Margez A., Hernadi K. and Nemeth Z. // i-Butane sensor made of SnO₂/multiwall-carbon-nanotube nanocomposite / 2012 / Booklet of the 14th Intern. Meeting on Chemical sensors (IMCS 2012), 169, Germany.
4. Arakelyan V.M., Shahnazaryan G.E., Aleksanyan M.S., Hovhannisyanyan R.V., Hernadi K., Nemeth Z. and Forro L. // Alcohol sensor made of MWCNT decorated with Fe₂O₃ nanoparticles / 2013 / Proc. of the Ninth Intern. Conf. Semiconductor Micro- and Nanoelectronics, 76-79, Armenia.
5. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Shahnazaryan G.E., Aleksanyan M.S., Hovhannisyanyan R.V., Hernadi K., Nemeth Z. and Forro L. // Gas sensors made of nanocomposite MWCNT/SnO₂/ 2013 / Proc. of the Ninth Intern. Conf. Semiconductor Micro- and Nanoelectronics, 80-83, Armenia.
6. Khondkaryan H.D., Hovhannisyanyan R.V., Aleksanyan M.S., Gasparyan F.V., Arakelyan V.M. and Aroutiounian V.M. // Sensitivity and low-frequency noises of gas sensors made on nanoscale composite material / 2014 / Book of Abstracts of Third International Conference “Nanotechnologies” (Nano-2014), 64, Georgia.
7. Aleksanyan M.S., Arakelyan V.M., Aroutiounian V.M. and Sayunts A.G. // Gasoline sensor based on ZnO / 2015 / Proceedings of AMA Conferences 2015 - SENSOR 2015 and IRS2, 740-743, Germany.
8. Aleksanyan M.S., Arakelyan V.M. and Aroutiounian V.M. // Detection of gasoline vapor by ZnO thin film sensor / 2015 / Proceedings of the tenth International Conference Semiconductor Micro- and Nanoelectronics, 82-84, Armenia.
9. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S., Kacer P., Picha P., Kovarik J.A., Pekarek J. and Joost B. // SnO₂ and ZnO detectors of hydrogen peroxide vapors / 2017 / Proc. of the 18th Intern. Conf. on Sensors and Measurement Technology (AMA Conferences 2017 SENSOR 2017 and IRS2), 714-719, Germany.
10. Sykorová A., Marešová E., Tomeček D., Havlová Š., Hozák P., Viček J., Fišer L., Fitl P., Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Aroutiounian V.M. and Vrnata M. // Detection of simulants of chemical warfare agents on textile chemiresistors. / 2017 / Proc. of the 18th Intern. Conf. on Sensors and Measurement Technology (AMA Conferences 2017 SENSOR 2017 and IRS2), 700-701, Germany.
11. Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahnazaryan G.E., Vrnata M., Fitl P., Viecek J., Gharajyan K.S. and Kasparyan H.S. // Co-doped SnO₂ sensor for detection of

- chemical agents / 2017 / Proc. 11th Intern. Conf. Semiconductor Micro- & Nanoelectronics, 70-75, Armenia.
12. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S., Shahnazaryan G.E., Kacer P., Picha P., Kovarik J.A., Pekarek J. and Joost B // Manufacturing and investigations of hydrogen peroxide vapors sensor / 2017 / Proc. 11th Intern. Conf. Semiconductor Micro- & Nanoelectronics, 76-81, Armenia.
 13. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahnazaryan G.E., Kacer P., Picha P., Kovarik J.A., Pekarek J. and Joost B. // Hydrogen peroxide vapours sensors made from ZnO<La> and SnO₂<Co> films / 2017 / Proc. of the Second Intern. Conf. on Advances in Sensors, Actuators, Metering and Sensing (ALLSENSORS 2017), 36-38, France.
 14. Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Aleksanyan M.S., Shahnazaryan G.E., Sayunts A.G. and Joost B. // Co-doped SnO₂ Sensor for Detection of Hydrogen Peroxide Vapors / 2018 / Proc. 4th International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumentation Advances (SEIA' 2018), 49-52, The Netherlands.
 15. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Zakaryan H.A., Aroutiounian V.M., Arakelyan V.M., Shahnazaryan G.E. // UV-assisted Chemiresistive Alcohol Sensor Based on Cobalt Doped Tin Dioxide / 2020 / Proc. of The Fifth International Conference on Advances in Sensors, Actuators, Metering and Sensing (ALLSENSORS 2020), 1-5, Spain.
 16. Aroutiounian V.M., Aleksanyan M.S., V Arakelyan.M., Shahnazaryan G.E. and Shahkhatuni G.H. // Hydrogen Peroxide Vapor Sensor Based on Zinc Oxide / 2020 / Proc. of 6th International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumentation Advances (SEIA' 2020), 13-17, Portugal.
 17. Aleksanyan M.S., Sayunts A.G., Shahkhatuni G.H., Simonyan Z.G., Shahnazaryan G.E. and Aroutiounian V.M. // Highly sensitive hydrogen gas sensor based on Fe₂O₃:ZnO nanostructured thin film / 2022, Canada.

Արտոնագիր (5 հատ)

1. Ռազմական թունավոր ազդանյութերի ռեզիստիվ սենսոր // Վ. Հարությունյան, Վ. Առաքելյան, Մ. Վրնաթա, Մ. Ալեքսանյան, Զ. Ադամյան, Ա. Սայունց, Գ. Շահնազարյան, Ֆ. Պրեմիալ, Վ. Յան և Հ. կասպարյան / AM 31 59 – 2018:
2. Արդյունաբերական թունավոր նյութերի ռեզիստիվ սենսոր // Վ. Հարությունյան, Վ. Առաքելյան, Մ. Վրնաթա, Մ. Ալեքսանյան, Զ. Ադամյան, Ա. Սայունց, Գ. Շահնազարյան, Ա. Ադամյան, Է. Խաչատուրյան, Ֆ. Պրեմիալ և Վ. Յան/ AM 31 60 – 2018:
3. Օդում ջրածնի պերօքսիդի գոլորշիների կոնցենտրացիայի որոշման եղանակ // Վ. Հարությունյան, Վ. Առաքելյան, Մ. Ալեքսանյան, Զ. Ադամյան, Ա. Սայունց, Գ. Շահնազարյան և Պ. Կաչեր / AM 33 24 – 2019:
4. Ջրածնի պերօքսիդի գոլորշիներ հայտնաբերող սենսորի պատրաստման եղանակ // Մ. Ալեքսանյան, Վ. Հարությունյան, Գ. Շահնազարյան և Գ. Շահխաթունի / AM 3448 A – 2021:
5. Ջրածնի նանոկառուցվածքային ռեզիստիվ սենսոր // Մ. Ալեքսանյան, Ա. Սայունց, Գ. Շահխաթունի, Զ. Սիմոնյան, Վ. Հարությունյան և Գ. Շահնազարյան / 753 Y – 2022:

Резюме

Диссертационная работа посвящена изготовлению и исследованию металлоксидных наноструктурных газовых сенсоров. Разработаны новые технологические методы синтеза полупроводниковых многокомпонентных наноструктурных соединений и изготовления на их основе газовых сенсоров. Систематически исследованы характеристики синтезированных наноструктур и параметры газочувствительности изготовленных сенсоров. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении представлена актуальность темы, сформулированы цель работы, поставленные и решенные задачи, показаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также приведены вынесенные на защиту основные положения.

В первой главе представлены типы существующих в настоящее время газовых сенсоров, структура и особенности полупроводниковых металлоксидных газовых сенсоров. Описано влияние многочисленных факторов, таких как толщина чувствительной пленки, размеры зерен, морфология поверхности чувствительного материала и другие, на параметры газочувствительности сенсора. Приведены характеристики предложенных в последние годы разными авторами сенсоров для обнаружения токсичных/взрывоопасных газов, летучих органических соединений и перекиси водорода.

Во второй главе представлены разработанная нами технология изготовления сенсоров, чувствительных к водороду, сжиженному нефтяному газу и бутану, а также структурные, электрохимические и газочувствительные характеристики синтезированных чувствительных материалов. Представлены также механизмы газочувствительности к вышеуказанным газам и влияющие на них факторы. В частности, введение в SnO_2 и Fe_2O_3 разных концентраций, соответственно, многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и ZnO позволило обеспечить высокую газочувствительность ($S=R_{\text{воздух}}/R_{\text{газ}}$) сенсоров к водороду (до 500). Введение в SnO_2 20вес.% Nb_2O_5 и воздействие ультрафиолетовых (УФ) лучей на поверхность газочувствительной наноструктуры позволило снизить рабочую температуру сенсора сжиженного нефтяного газа (на 50°C), а также повысить газочувствительность (до 45%) и быстродействие (время отклика уменьшается с минут до секунд). Добавление на поверхность УНТ(углеродные нанотрубки)/ SnO_2 наноструктурного сенсора разных концентраций каталитического вещества $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ привело к улучшению газочувствительности (в 2.5 раза) и быстродействия (время отклика уменьшилось с минут до секунд), а также к понижению рабочей температуры (на 50°C) сенсора газа изобутан.

В третьей главе представлены характеристики разработанных нами сенсоров, чувствительных к летучим органическим соединениям, таким как этанол, ацетон и аммиак. Здесь подробно описаны результаты исследований структуры, состава и других физических свойств полученных газочувствительных материалов. Приведены также характеристики чувствительности, стабильности, быстродействия и селективности изготовленных сенсоров вышеуказанных газов. В частности, введение $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$ в In_2O_3 , МУНТ в Fe_2O_3 , Co_2O_3 в SnO_2 и La_2O_3 в ZnO привело к их высокой газочувствительности (до 300) к парам этанола. Воздействие УФ лучей значительно улучшило параметры $\text{Fe}_2\text{O}_3+0.1\text{ат.}\% \text{Sn}$ наноструктурного сенсора ацетона (время отклика уменьшилось с минут до секунд, а газочувствительность достигла 4.2). Минимальный порог газочувствительности $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ (60:40 мол.%) наноструктурного сенсора к аммиаку равнялся 14 ppm при рабочей температуре 250 °C.

В четвертой главе представлены технологические этапы изготовления разработанных сенсоров перекиси водорода и результаты измерений параметров их газочувствительности емкостным, вольтамперным и резистивным методами. Здесь представлены также характеристики разработанных нами гибких сенсоров перекиси водорода и результаты исследования влияния изгибов подложки на их газочувствительные параметры. В частности, введение в SnO_2 различных концентраций Co_2O_3 и МУНТ, а также воздействие УФ лучей на газочувствительную поверхность привели к улучшению характеристик наноструктурных сенсоров перекиси водорода (газочувствительность возросла в 1.5 раза). Среди наноструктурных сенсоров на основе ZnO , содержащих различные концентрации La_2O_3 , наибольшую газочувствительность (120) имела структура $\text{ZnO}<2 \text{ ат.}\% \text{La}>$.

В пятой главе представлены характеристики газочувствительности сенсоров военных токсичных агентов (ВТА) и промышленных токсичных веществ (ПТВ). Представлены технология выращивания углеродных наноструктур и их характеристики. Описаны также технологические этапы синтеза керамических мишеней и структурные характеристики поликристаллических материалов. Обобщены механизмы газочувствительности резистивных сенсоров и химические реакции различных газов. В частности, подбором соответствующих технологических режимов были получены такие наноструктуры SnO_2 , насыщенные кобальтом и функционализированные углеродными нанотрубками, которые проявили высокую газочувствительность к химическим агентам (до 400). Чувствительность сенсора SnO_2 , насыщенного кобальтом, к различным концентрациям паров зарина и иприта была измерена в "University of Defence" (Университете обороны, Чехия). Сенсор $\text{SnO}_2<\text{Co}>$ проявил чувствительность к парам иприта начиная с концентрации 25 ppm. Чувствительность сенсора составила около 15 при концентрации паров зарина 12.5 ppm при рабочей температуре 210 °C. Правильная разработка технологических режимов магнетронного распыления

(мощность генератора, время распыления, температура подложки и др.) привела к успешному синтезу поликристаллического $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ и углеродных наноструктур.

Summary

The dissertation is devoted to the preparation and investigation of gas sensors based on metal oxide nanostructured materials. New technological methods for the synthesis of semiconductor multicomponent nanostructured compounds and for the preparation of gas sensors based on these materials were developed. The characteristics of the synthesized nanostructures and the gas sensing parameters of the fabricated sensors were studied in detail. The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusions, and a list of references.

The dissertation begins with an introduction, where the relevance of the topic is presented, the purpose of the work and the problems presented and solved are formulated, the scientific novelty and practical importance of the obtained results are shown, and the basic results to be defended are presented.

The first chapter presents the types of gas sensors currently available and the structure and features of semiconductor metal oxide based gas sensors. The influence of different factors on the gas sensing parameters of the sensor, such as the thickness of the sensitive film, grain sizes, the surface morphology of the gas sensing material, etc., are also presented here. The characteristics of gas sensors for toxic/explosive gases, volatile organic compounds, and hydrogen peroxide vapor proposed by various authors in recent years are also presented here.

The second chapter presents the manufacturing technology of fabricated sensors sensitive to hydrogen, liquefied petroleum gas (LPG), and butane developed by us, and the structural, electrochemical, and gas sensing characteristics of the obtained sensitive materials. The gas sensing mechanisms for above-mentioned gases and possible factors affecting them are also presented here. In particular, the introduction of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and different concentrations of ZnO into SnO_2 and Fe_2O_3 materials, respectively, provided high gas sensitivity ($S=R_{\text{air}}/R_{\text{gas}}$) to hydrogen (up to 500). The introduction of 20 wt. % Nb_2O_3 into SnO_2 material and the presence of ultraviolet (UV) rays on the surface of the gas-sensitive nanostructure lowered the operating temperature of the LPG sensor (by 50 °C) and increased the gas sensitivity (up to 45%) and the speed (response time reduced from minutes to seconds). The addition of $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ catalyst with different concentrations to the surface of the carbon nanotubes/ SnO_2 nanostructured sensor led to an improvement in the gas sensitivity (2.5 times) and speed (response time decreased from minutes to seconds) of the sensor to isobutane gas and a decrease in the operating temperature (by 50 °C).

The third chapter presents the characteristics of the developed sensors sensitive to volatile organic compounds such as ethanol, acetone, and ammonia. The results of research on the

structure, composition, and other physical properties of gas-sensitive materials are presented here in detail. The gas sensing characteristics of the fabricated sensors such as sensitivity, stability, speed, and selectivity are also presented here. In particular, the introduction of $\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$ in In_2O_3 , MWNTs in Fe_2O_3 , Co_2O_3 in SnO_2 and La_2O_3 in ZnO materials resulted in their high gas sensitivity (up to 300) to ethanol vapors. The presence of UV rays significantly improved the parameters of the $\text{Fe}_2\text{O}_3+0.1$ at.% Sn acetone nanostructured sensor (the response time decreased from minutes to seconds and the gas sensitivity reached up to 4.2). The low detection limit of the $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ (60:40 mol.%) nanostructured sensor to ammonia was 14 ppm at the working temperature of 250 °C.

The fourth chapter presents the fabrication steps of hydrogen peroxide vapor sensors and the measurement results of the gas sensing parameters by capacitive, voltammetric, and resistive methods. The characteristics of the developed flexible hydrogen peroxide vapor sensors and the effect of bending on these parameters are also presented here. In particular, the introduction of different concentrations of Co_2O_3 and MWNTs into SnO_2 material and the presence of UV rays on the gas-sensitive surface improved the characteristics of hydrogen peroxide nanostructured sensors (gas sensitivity increased 1.5 times). Among the nanostructured sensors based on ZnO material saturated with different concentrations of La_2O_3 , the $\text{ZnO}<2$ at.% La structure showed the highest gas sensitivity (120).

The fifth chapter presents the gas sensing characteristics of the fabricated sensors sensitive to chemical warfare agents (CWAs) and toxic industrial chemicals (TICs). A technological description of the growth of carbon nanotubes and their characteristics are also presented here. The technological steps for synthesizing ceramic targets and the structural characteristics of polycrystalline materials are also described here. The gas sensing mechanisms of resistive sensors and the chemical reactions of various gases are summarized here. In particular, with the selection of appropriate technological modes, SnO_2 based nanostructures saturated with cobalt and functionalized with carbon nanotubes were obtained, which showed high gas sensitivity to CWAs and TICs (up to 400). The sensitivity of a cobalt-doped SnO_2 sensor to different concentrations of sarin and yprite gas was measured at the University of Defense (Czech Republic) within the NATO project. The $\text{SnO}_2<\text{Co}>$ sensor showed sensitivity to yprite gas from a concentration of 25 ppm. The sensitivity of the sensor to 12.5 ppm sarin concentration was about 15 at 210 °C. Besides, the effective development of magnetron sputtering technological regimes (power of the generator, sputtering time, substrate temperature, etc.) led to the successful synthesis of $\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ polycrystalline material and carbon nanostructures.