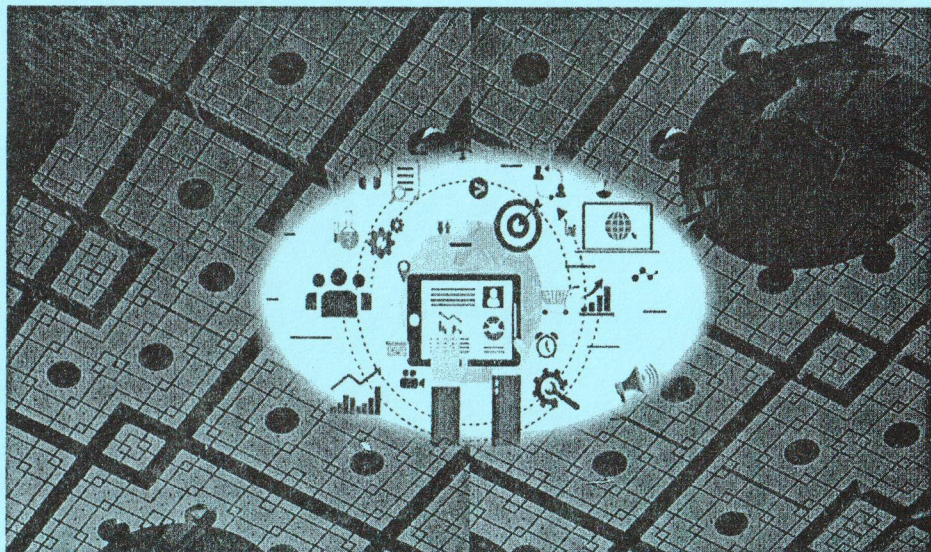


ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՄԻՔԱՅԵԼ ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ

ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ
ԳԱՓԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

ՈՒՍՈՒՄՆԱՄԵԹՈՂԱԿԱՆ ՁԵՌՆԱՐԿ



ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՄԻՔԱՅԵԼ ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ

**ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ
ԳԱԶԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ**

ՈՒՍՈՒՄՆԱՄԵԹՈՂԱԿԱՆ ՁԵՌՆԱՐԿ

**ԵՐԵՎԱՆ
ԵՊՀ ՀՐԱՏԱՐԱԿՉՈՒԹՅՈՒՆ
2020**

ՀՏԴ 621.3(075.8)

ԳՄԴ 32.85g73

Ա 296

*Հրատարակության է երաշխավորել
ԵՊՀ ռադիոֆիզիկայի ֆակուլտետի խորհուրդը:*

Գրախոսներ՝

Ֆիզմաթ գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Խ. Վ. Ներկարարյան

Ֆիզմաթ գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Ֆ. Վ. Գասպարյան

Ալեքսանյան Մ. Ս.

Ա 296 Կիսահաղորդչային գազային սենսորների առանձնահատկությունները:
Ուսումնամեթոդական ձեռնարկ/ Մ. Ս. Ալեքսանյան. -Եր.: ԵՊՀ հրատ.,
2020, 52 էջ:

Ուսումնամեթոդական ձեռնարկում ներկայացված են ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածու Միքայել Մերյոթայի Ալեքսանյանի կողմից մշակված նյութերը, որոնք ընդգրկում են ժամանակակից կիսահաղորդչային գազային սենսորների գրեթե բոլոր կարևոր բաժինները՝ գազային սենսորների տեսակները, կիսահաղորդչային սենսորների կառուցվածքը, օգտագործվող գազազգայուն և էլեկտրոդային նյութերը, կիսահաղորդչային սենսորների պարամետրերը և գազազգայնության մեխանիզմները:

Նախատեսված է «Ֆիզիկա», «Ռադիոֆիզիկա և էլեկտրոնիկա», «Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա և միկրոէլեկտրոնիկա», «Էլեկտրոնային տեխնիկայի նյութեր և տարրեր», «Նանոտեխնոլոգիա» և հարակից այլ մասնագիտությունների ուսանողների ու ասպիրանտների համար:

ՀՏԴ 621.3(075.8)

ԳՄԴ 32.85g73

ISBN 978-5-8084-2444-9

© ԵՊՀ հրատ., 2020

© Ալեքսանյան Մ. Ս., 2020

ԳԼՈՒԽ I

§ 1.1. ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ

Վերջին տասնամյակներում ամբողջ աշխարհում դիտվող գիտատեխնիկական կտրուկ առաջընթացը հանգեցրել է հրատապ լուծում պահանջող մի շարք խնդիրների: Հանածո էներգակիրների օգտագործման ծավալների աճը հրամայական է դարձրել դրանց արդյունահանման, վերամշակման և տեղափոխման գործընթացներում, արդյունաբերության մեջ, տրանսպորտում, կենցաղում և այլ ոլորտներում օգտագործման ժամանակ հրդեհների, պայթյունների, մասսայական թունավորումների կանխարգելման համար անվտանգության ժամանակակից համակարգերի ստեղծումն ու լայնամասշտաբ ներդրումը: Խիստ արդիական են մաս կենսոլորտի վերահսկողությունը, ահաբեկչության դեմ արդյունավետ պայքարը և մմանատիպ մի շարք այլ խնդիրներ: Անվտանգության վերը նշված համակարգերի հիմնական տարրերից են գազային սենսորները: Ներկայումս լայնածավալ հետազոտություններ և մշակումներ են կատարվում բարձր զգայնությամբ, արագագործությամբ, ընտրողունակությամբ, նվազ էներգատար և կայուն պարամետրերով դյուրակիր գազային սենսորների ստեղծման ուղղությամբ: Այդ հետազոտությունների արդյունքում արդեն ստեղծվել են ֆիզիկական տարբեր սկզբունքներով աշխատող տարատեսակ գազային սենսորներ [1, 2]:

Այդ բազմազանության մեջ առավել հեռանկարային են պինդմարմնային գազային սենսորները, որոնց նկատմամբ մեծ հետաքրքրությունը պայմանավորված է դրանց բազմաթիվ առավելություններով՝ փոքր չափսեր, բարձր զգայնություն գազի մույնիսկ ցածր կոնցենտրացիաների ժամանակ, առցանց աշխատանքի հնարավորություն, ցածր զին և այլն, մինչդեռ ավանդական անալիտիկ (հետազոտող) սարքավորումները թանկարժեք են, բարդ և խոշորածավալ: Ընդհանրապես հետազոտություններն ավելի հաճախ միտված են կիսահաղորդչային սենսորների ստեղծմանը, քանի որ դրանք ավելի էժան են, չափսերով փոքր, և տեխնոլոգիապես հեշտ է ստա-

նալ: Հարկ է նշել նաև, որ կիսահաղորդչային սենսորների հիման վրա հնարավոր է ստեղծել բազմասենսորային համակարգ (էլեկտրոնային քիթ)՝ միաժամանակ մի քանի գազերի հայտնաբերման համար [3, 4]:

Կիսահաղորդչային գազային սենսորների մեջ իրենց ուրույն տեղն են զբաղեցնում մետաղօքսիդային նյութերի հիման վրա պատրաստված սենսորները: Առաջին անգամ կիսահաղորդիչները որպես գազ հայտնաբերող նյութեր օգտագործելու գաղափարը տվել են Բարդին և Բրատտսին 1952 թ.-ին: Նրանք որպես գազ հայտնաբերող նյութ օգտագործում էին գերմանիումը: Հետագայում Մեյմանը բացահայտեց մետաղօքսիդների սենսորային հատկությունները, և վերջապես Տագուչին պատրաստեց մետաղօքսիդային սենսորներ, որոնք ներդրվեցին արտադրության մեջ: Տագուչի-տիպի սենսորներն այժմ էլ առկա են շուկայում [2, 5]:

Ներկայումս օգտագործվող մետաղօքսիդային կիսահաղորդչային սենսորները զգայնության, ընտրողունակության, կայունության և սպառման հզորության տեսանկյունից դեռևս բարելավման կարիք ունեն: Այս տիպի սենսորների հիմնական խնդիրներից մեկը կապված է աշխատանքային բարձր ջերմաստիճանի հետ, որի լուծումից են կախված դրանց կայունությունը և ազդանշանի մշակման էլեկտրական սխեմայի հետ ինտեգրման հնարավորությունը: Մետաղօքսիդային սենսորների մյուս կարևորագույն խնդիրը ընտրողունակությունն է, այսինքն՝ անհրաժեշտ են այնպիսի սենսորներ, որոնցից յուրաքանչյուրը զգայնություն կցուցաբերի միայն մեկ տիպի գազի նկատմամբ [6, 7]:

Նկատի ունենալով, որ գազագզայնության մեխանիզմը ներառում է բազմաթիվ տարաբնույթ գործոններ, ակնհայտ է, որ ժամանակակից պահանջներին բավարարող սենսորների ստեղծման համար անհրաժեշտ են համակարգված հետազոտություններ՝ նոր նյութերի ստացման և դրանց հիման վրա օպտիմալացված պարամետրերով կառուցվածքների ստեղծման ուղղությամբ:

§ 1.2. ԳԱԶԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ ՏԵՍԱԿՆԵՐԸ

Թունավոր և պայթյունավտանգ գազերի հայտնաբերման համար գոյություն ունեն տարբեր տիպի սենսորներ, որոնց աշխատանքը հիմնված է ֆիզիկաքիմիական տարաբնույթ երևույթների վրա: Չնայած այս սարքերի բազմազանությանը՝ դրանց աշխատանքի սկզբունքը նույնն է: Որպես կանոն, դա հետազոտվող գազի և գազազգայուն կառուցվածքի միջև տեղի ունեցող պրոցես է, որի հետևանքով փոփոխվում է գազային սենսորի այս կամ այն պարամետրը: Կախված սենսորի տեսակից՝ այդպիսի չափվող պարամետրեր կարող են լինել հաղորդականությունը, ունակությունը, էլքի աշխատանքը, բեկման ցուցիչը, միջավայրի կլանման գործակիցը, ջերմաէլշուն և այլն: Աղյուսակ 1-ում ներկայացված են առավել լայն կիրառություն գտած սենսորների տեսակները և համապատասխան չափվող պարամետրերը [3]:

Աղյուսակ 1

Գազային սենսորների տեսակները

	Սարքավորման տեսակը	Փոփոխվող պարամետրը
1	Կիսահաղորդչային գազային սենսորներ	Էլեկտրահաղորդականություն
2	Դաշտային տրանզիստորների հիման վրա պատրաստված գազային սենսորներ	Ելքի աշխատանք (էլեկտրական բևեռացում)
3	Պիեզոէլեկտրական սենսորներ	Չանգված
4	Օպտիկական սենսորներ	Օպտիկական պարամետրեր (բեկման ցուցիչ, կլանման գործակից և այլն)
5	Կատալիզային գազային սենսորներ	Ջերմաստիճան
6	Էլեկտրաքիմիական գազային սենսորներ	Էլեկտրաշարժ ուժ կամ էլեկտրական հոսանք (պինդմարմնային էլեկտրաքիմիական էլեմենտում)
7	Կենսաբանական սենսորներ	Մակերևութային լիցք, ունակություն, էլեկտրական հոսանք

Չնայած ներկայումս սենսորների կառուցվածքային և դրանցում որպես գազազգայուն տարր օգտագործվող նյութերի բազմազանությանը, ինչպես նաև նոր, ավելի կատարյալ պարամետրերով սարքերի ստեղծման ուղղությամբ կատարվող գիտահետազոտական աշխատանքների մեծ ծավալին՝ դեռևս ամբողջովին լուծված չեն այնպիսի կարևորագույն խնդիրներ, ինչպիսիք են սենսորի բարձր ընտրողունակությունը, արագագործությունը, զգայնությունը, պարամետրերի երկարաժամկետ կայունությունը և այլն:

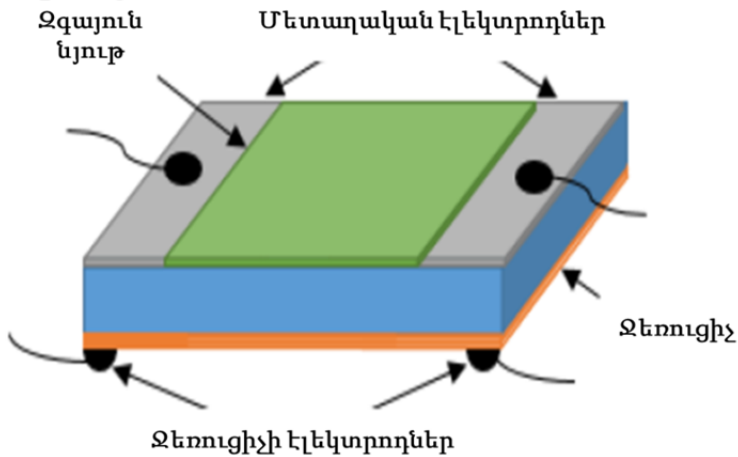
Ակնհայտ է, որ արդի պահանջներին բավարարող, պարամետրերի օպտիմալ համադրությամբ օժտված սարքերի պատրաստման համար անհրաժեշտ է ստեղծել այնպիսի նորագույն կառուցվածքներ, որոնք կունենան ցածր ինքնարժեք և սինթեզման դյուրին տեխնոլոգիա: Այս առումով, ինչպես արդեն նշվել է, հեռանկարային են պինդմարմնային գազային սենսորները, որոնց համար որպես գազազգայուն տարր կարող են օգտագործվել կիսահաղորդիչները, մետաղօքսիդային և օրգանական կիսահաղորդիչները, պինդ էլեկտրոլիտները, իոնական մեմբրանները և իոնական աղերը: Սակայն չի կարելի ասել, որ նշված բոլոր նյութերն էլ հավասարապես արդյունավետ են սենսորների պատրաստման համար:

ԳԼՈՒԽ II

§ 2.1. ՌԵԶԻՍՏԻՎ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԸ

Սենսորը կոչվում է ռեզիստիվ (դիմադրական), քիմոռեզիստիվ կամ հաղորդականության տիպի, երբ քիմիալային գազի առկայությանը քիմիական ռեակցիաների հետևանքով փոխվում է նրա զգայուն թաղանթի դիմադրությունը կամ հաղորդականությունը: Քիմոռեզիստիվ սենսորները բաղկացած են գազազգայուն թաղանթից, որը նստեցված է մեկուսիչ տակդիրի վրա: Գազազգայուն շերտի դիմադրության չափման համար թաղանթի վրա կամ հակառակ կողմում նստեցվում են ազնիվ մետաղներից (ոսկի, պլատին, պալադիում, արծաթ) օհմական հպակներ (հիմնականում՝ սանրածև): Սենսորի զգայունությունը և արագագործությունը բարելավելու համար դրա ակտիվ մակերևույթին նստեցվում են նաև ազնիվ մետաղների հատիկներ (պլատին, պալադիում, ռութենիում և այլն), որոնք անվանվում են կատալիզային հատիկներ: Աշխատանքային ջերմաստիճանն ապահովելու համար տակդիրի վրա՝ ակտիվ տիրույթի շուրջը կամ տակդիրի հակառակ կողմում, պատրաստում են պարուրածև տաքացուցիչ: Տաքացուցիչը հիմնականում պատրաստվում է պլատինից, որը միաժամանակ ծառայում է որպես ջերմաստիճանի սենսոր, սակայն, ըստ նպատակահարմարության, երբեմն պատրաստում են առանձին պլատինե ջերմաստիճանային սենսոր (Նկ. 1) [8, 9]: Որոշ դեպքերում աշխատանքային ջերմաստիճանի նվազեցման համար սենսորի գազազգայուն մակերևույթից որոշակի հեռավորության վրա տեղակայվում է լուսադիոդային համակարգ, որն ինտենսիվորեն լուսավորում է ակտիվ տիրույթը: Լույսի ազդեցությամբ գեներացված լիցքակիրները նվազեցնում են կիսահաղորդչի դիմադրությունը և նպաստում կիսահաղորդիչ-գազ քիմիական ռեակցիաների ավելի դյուրին ընթանալուն: Նախապես ուսումնասիրված և փորձարկված սենսորի համար նախագծվում և պատրաստվում են ազդանշանի մշակման համակարգ և պատյան: Գազազգայուն տարրը՝ սենսորը, կցվում է տպա-

սալին և տեղակայվում պատյանում, ինչի արդյունքում ունենում ենք գազ հայտնաբերող ավարտում համակարգ՝ դետեկտոր:



Նկ. 1. Ռեզիստիվ սենսորի եռաչափ պարկերը

§ 2.2. ԳԱԶԱԶԳԱՅՈՒՆ ՆՅՈՒԹԵՐ

Տեսականորեն պինդմարմնային գազային սենսորներում որևէ մետաղօքսիդի օգտագործման սահմանափակում գրեթե չկա, սակայն չենք կարող ասել, որ բոլոր նյութերն էլ հավասարապես արդյունավետ են սենսորներում կիրառության համար: Նյութերի մեծ բազմազանության մեջ օպտիմալ պարամետրերով գազային սենսորի համար համապատասխան բաղադրությամբ նյութի ընտրությունը (բազմաբաղադրիչ նյութերի դեպքում), որի դեպքում սենսորը կունենա բավարար աշխատունակության պարամետրեր, հիմնական խնդիրն է այս ոլորտում: Ռեզիստիվ սենսորներում որպես զգայուն տարր հիմնականում օգտագործվում են երեք տիպի նյութեր՝ մետաղօքսիդներ, կիսահաղորդիչներ և պոլիմերներ (Աղյուսակ 2) [10-12]:

Մետաղօքսիդներ	Կիսահաղորդիչներ	Պոլիմերներ
SnO ₂ , ZnO, In ₂ O ₃ , WO ₃ , MgO, CaO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , TeO ₂ , SrO, Y ₂ O ₃ , HfO ₂ , ZrO ₂ , BaO, La ₂ O ₃ , CeO ₂ , Ga ₂ O ₃ , TiO ₂ , Nb ₂ O ₅ , Ta ₂ O ₅ , V ₂ O ₅ , Cr ₂ O ₃ , NiO, Fe ₂ O ₃ , Co ₃ O ₄ , PdO, CuO, Sb ₂ O ₃	Si, InP, GaAs, SiC, GaN, ալմաստ	պոլիմերներ, տրամա-պոլիացետի- լեն, պոլիֆենիլեն, պոլիպիրոլ, պոլիթիոֆեն

Կիսահաղորդիչներն այս ոլորտում օգտագործվել են ի սկզբանե, սակայն քիմիապես ակտիվ չլինելու և ցածր զգայնության պատճառով կարճ ժամանակահատվածում հիմնովին դուրս են մղվել կիրառությունից: Պոլիմերները հիմնականում օգտագործվում են ցածր ջերմաստիճանում ($< 100^{\circ}\text{C}$) աշխատող սենսորներում, քիմիապես այնքան էլ կայուն չեն և ժամանակի ընթացքում հանդես են բերում պարամետրերի սկզբնական արժեքներից էական շեղումներ: Պինդ-մարմնային քիմնեզիստիվ սենսորներում առավել նախընտրելի են կիսահաղորդչային մետաղօքսիդների հիման վրա պատրաստված կառուցվածքները, քանի որ դրանք քիմիապես ակտիվ են, ունեն բարձր կայունություն, մեխանիկական ամրություն, ցածր գին, ինչպես նաև բարձր զգայնություն տարբեր գազերի և հեղուկների գոլորշիների նկատմամբ: Տարատեսակ խառնուրդների ներմուծման միջոցով կարելի է կառավարել նաև այս կառուցվածքների դիմադրությունը, զգայնությունը, արագագործությունը, ընտրողունակությունը և այլն (նշված պարամետրերին հանգամանորեն կանոնադաշտանք **ԳԼՈՒԽ III**-ում): Կախված խառնուրդի տեսակից, քանակությունից և թիրախային գազի նկատմամբ ռեակտիվությունից՝ գազագայուն նյութը կարող է դրականորեն փոխել իր հատկությունները՝ դառնալով տվյալ գազի համար ամենից նախընտրելի նյութը: Աղյուսակ 3-ում ներկայացված են ռեզիստիվ սենսորներում օգտագործվող հիմնա-

կան մետաղօքսիդային խառնուրդները, որոնք զգալուն են այս կամ այն գազի նկատմամբ [13, 14]:

Աղյուսակ 3
Կիսահաղորդչային սենսորներում օգտագործվող
հիմնական մետաղօքսիդային խառնուրդները և
հայրնաքերվող թիրախային գազերը

Մետաղօքսիդային խառնուրդներ	Թիրախային գազ
$\text{Cr}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_y$; $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4$; $\text{SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$; $\text{SnO}_2\text{-Mn}_2\text{O}_3$; $\text{SnO}_2\text{-MoO}_3$; $\text{SnO}_2\text{-ThO}_2$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Co}_3\text{O}_4$	CO
$\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$; $\text{SnO}_2\text{-CuO}$; $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$; $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2$; $\text{TiO}_2\text{-NiO}$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$; $\text{Zn}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$	H ₂
$\text{SnO}_2\text{-MoO}_3$; $\text{SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$; $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2\text{-AgO}_y$; $\text{SnO}_2\text{-RuO}_x$; ZnO-CuO ; ZnO-RuO_2 ; ZnO-MnO_2 ; $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$; $\text{TiO}_2\text{-CuO}$; $\text{TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$; $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$	NH ₃
$\text{ZnO-Ga}_2\text{O}_3$; ZnO-SnO_2 ; ZnO-CdO ; $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$; $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$; $\text{SnO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$; $\text{SnO}_2\text{-NiO}$; $\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$; $\text{SnO}_2\text{-MoO}_3$; $\text{SnO}_2\text{-SrO}$; $\text{SnO}_2\text{-CaO}$; $\text{SnO}_2\text{-WO}_3$; $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$; $\text{WO}_3\text{-In}_2\text{O}_3$; $\text{WO}_3\text{-TiO}_2$	NO _x
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$; $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$; $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$; $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-In}_2\text{O}_3$; $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CuO}$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$; $\text{SnO}_2\text{-MoO}_3$; $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$; $\text{SnO}_2\text{-CeO}_2$; $\text{SnO}_2\text{-CuO}$; $\text{SnO}_2\text{-CdO}$; $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2$; $\text{SnO}_2\text{-NiO}$; $\text{SnO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$; $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$; $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$; $\text{TiO}_2\text{-CuO}$; $\text{WO}_3\text{-TiO}_2$	CH ₃ CH ₂ OH
$\text{SnO}_2\text{-MoO}_3$; $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$; $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$; $\text{SnO}_2\text{-CuO}$; $\text{SnO}_2\text{-NiO}$; $\text{SnO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$; $\text{SnO}_2\text{-Sm}_2\text{O}_3$; $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$; $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-NiO}$; $\text{WO}_3\text{-SiO}_2$; $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$; ZnO-CuO	Ցնդող օրգանական միացություններ
$\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2\text{-TiO}_2$; $\text{SnO}_2\text{-CaO}$; $\text{SnO}_2\text{-K}_2\text{O}$; $\text{La}_{1-x}\text{Mg}_x\text{FeO}_3$	CH ₄
$\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-NiO}$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO-SnO}_2$; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$; $\text{SnO}_2\text{-CoO}_x$; $\text{SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$; $\text{WO}_3\text{-CoO}_x$; ZnO-CdO	O ₃
$\text{SnO}_2\text{-CuO}$; $\text{SnO}_2\text{-Ag}_2\text{O}$; ZnO-CuO ; ZnO-TeO_2 ; $\text{WO}_3\text{-CuO}$; $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$; $\text{TiO}_2\text{-Nb}_2\text{O}_5$; $\text{BaSrSnTiO}_3\text{-CuO}$; $\text{CdO-In}_2\text{O}_3$	H ₂ S
$\text{BaTiO}_3\text{-CuO-La}_2\text{O}_3$; $\text{CuO-Cu}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$; $\text{SnO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$	CO ₂
$\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$; $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3\text{-TiO}_2$; $\text{WO}_3\text{-Ag}_2\text{O}$; $\text{SnO}_2\text{-NiO}$	SO ₂
$\text{W}_{18}\text{O}_{49}\text{-SnO}_2$; NiFe_2O_4 ; ZnFe_2O_4 ; $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Cl ₂

Գրեթե բոլոր մետաղօքսիդները պինդմարմնային գազային սենսորներում կարելի է օգտագործել որպես հիմնական նյութ: Սակայն բոլոր պահանջները կամ դրանց մի մասը բավարարելու համար անհրաժեշտ է այնպիսի նյութ, որը կունենա ֆիզիկաքիմիական հատկությունների յուրահատուկ համակցություն: Հիմնական պահանջները կապված են գզայնության պարամետրերի (գզայնություն, ընտրողունակություն և արձագանքման ժամանակ) և կառուցվածքային պարամետրերի (սկզբնական դիմադրության դրեյֆ, կառուցվածքային կայունություն և քիմիական կայունություն սենսորի մակերևույթն աղտոտող գազերի նկատմամբ) հետ, իսկ այս ամենը կապված է գազազգայուն նյութի ընտրության հետ: Պարզ է, որ ոչ բոլոր նյութերը կբավարարեն այս պահանջներին: Ընդհանրապես գազազգայուն նյութերի ընտրության ժամանակ պետք է հաշվի առնել մետաղօքսիդների հետևյալ հատկությունները [10, 15, 16]՝

- ✓ մակերևութային հատկություններ,
- ✓ էլեկտրական և աղսորբցիոն/դեսորբցիոն հատկություններ,
- ✓ կատալիզային ակտիվություն,
- ✓ էներգետիկ գոտիական կառուցվածք,
- ✓ էլեկտրահաղորդականություն,
- ✓ հաղորդականության տեսակը,
- ✓ ջերմադինամիկական կայունություն,
- ✓ քիմիական ակտիվություն,
- ✓ երկարատև (ժամանակային) կայունություն,
- ✓ ջրային գոլորշիների նկատմամբ գզայնություն:

Չնայած ներկայացված խառնուրդային նյութերի բազմազանությանը՝ ռեզիստիվ սենսորներում առավելապես օգտագործվում են հետևյալ մետաղօքսիդները՝ **SnO₂**, **ZnO**, **In₂O₃**, **WO₃**, **Ga₂O₃** և **CTO (CrTiO)**, որոնք աչքի են ընկնում մի շարք առավելություններով: Նշված նյութերն էլ իրենց հերթին դառնում են մախրմտրելի՝ կախված թիրախային գազի տեսակից և սենսորի կիրառության ոլորտից: Աղյուսակ 4-ում ներկայացված են այդ նյութերի առավելությունները և թերությունները գազային սենսորներում կիրառության տեսանկյունից [10, 17]: Այնուամենայնիվ, նշված մետաղօքսիդներից առավել

կիրառելին և շատ ուսումնասիրվածն համարվում է անագի երկօքսիդն է (SnO_2): Այն ունի ֆիզիկաքիմիական պարամետրերի հիմնադրական համակցություն և ցածր ինքնաբժեք, որոնց շնորհիվ ռեզիստիվ սենսորների արտադրության մեջ ամենից նախընտրելի մետաղօքսիդն է [18]:

Աղյուսակ 4

Ռեզիստիվ սենսորներում օգտագործվող հիմնական մետաղօքսիդների առավելությունները և թերությունները

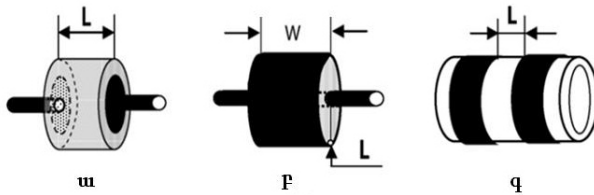
Չգայուն նյութ	Առավելություններ	Թերություններ
SnO_2	Բարձր զգայնություն, բարձր կայունություն վերականգնող միջավայրում	Ցածր ընտրողունակություն, զգայնություն խոնավության նկատմամբ
ZnO	Բարձր զգայնություն վերականգնող գազերի նկատմամբ, բարձր կայունություն վերականգնող միջավայրում	Բարձր զգայնություն խոնավության նկատմամբ
In_2O_3	Բարձր զգայնություն օքսիդացնող գազերի նկատմամբ, արագ արձագանքում և վերականգնում, ցածր զգայնություն խոնավության նկատմամբ	Ցածր կայունություն թթվածնի ցածր մասնակի ճնշման դեպքում
WO_3	Բարձր զգայնություն օքսիդացնող գազերի նկատմամբ, բարձր ջերմային կայունություն	Ցածր զգայնություն վերականգնող գազերի նկատմամբ, զգայնություն խոնավության նկատմամբ, դանդաղ արձագանքում
Ga_2O_3	Բարձր կայունություն, բարձր ջերմաստիճանում աշխատելու հնարավորություն	Ցածր ընտրողունակություն, ոչ բարձր զգայնություն
CTO (CrTiO)	Բարձր կայունություն, ցածր զգայնություն խոնավության նկատմամբ	Ոչ բարձր զգայնություն

Չնայած վերը թվարկված մետաղօքսիդների և բազմաբաղադրիչ մետաղօքսիդային միացությունների բազմաբյուրեղային կառուցվածքները լայնորեն կիրառվում են ռեզիստիվ սենսորներում, սակայն դրանք այնքան էլ չեն բավարարում արդի պահանջներին: Ծավալային մետաղօքսիդների (բազմաբյուրեղային կամ հատիկային կառուցվածք ունեցող) ավանդական կիրառությունն այս ոլորտում տարեցտարի հարցականի տակ է դրվում, քանի որ դրանց հատկությունները կարծես թե հիմնովին ուսումնասիրված են, իսկ գազազգայնության ունակությունների բարելավման հնարավոր ուղիները՝ գրեթե ամբողջությամբ օգտագործված: Այժմ բուռն հետազոտություններ են կատարվում նորանոր գազազգայուն նյութերի սինթեզման և դրանց պարամետրերի բարելավման ուղղությամբ: Այսպիսի նյութերից են միաչափ և երկչափ տարատեսակ կառուցվածքները, որոնց սինթեզումը և պարամետրերի կառավարումն արդեն երկու տասնամյակ է, ինչ հաջողությամբ իրականացվում են: Այդպիսի միաչափ և երկչափ համակարգերից են մանոխողովակները, մանոլարերը, մանոժապավենները, մանոբեղիկները, մանոծաղիկները և այլն [19-21]: Նշված կառուցվածքները, բազմաբյուրեղային նյութերի համեմատությամբ, ավելի ամուր են, ճկուն և ունեն քիմիական ու ջերմային ավելի բարձր կայունություն: Այս կառուցվածքների հիման վրա լաբորատոր մակարդակում արդեն իսկ պատրաստվել են գազային սենսորներ, որոնք ցուցաբերում են գազազգայնության բավականին լավ ցուցանիշներ (բարձր զգայնություն և արագագործություն), սակայն դրանք դեռևս շուկա չեն մտել և լրացուցիչ կատարելագործման ու ուսումնասիրության կարիք ունեն: Բանն այն է, որ սինթեզված նյութում միաչափ և երկչափ կառուցվածքներից բացի կան նաև այլ կառուցվածք ունեցող մասնիկներ, որոնցից լրիվ ազատվելը՝ նյութի գտումը, բավականին բարդ խնդիր է: Հարկ է նշել նաև, որ այս կառուցվածքների սինթեզումը և մշակումը դեռևս բավականին թանկ է, ինչը, բնականաբար, կրարձրացնի դրանց հիման վրա պատրաստված սենսորների ինքնարժեքը:

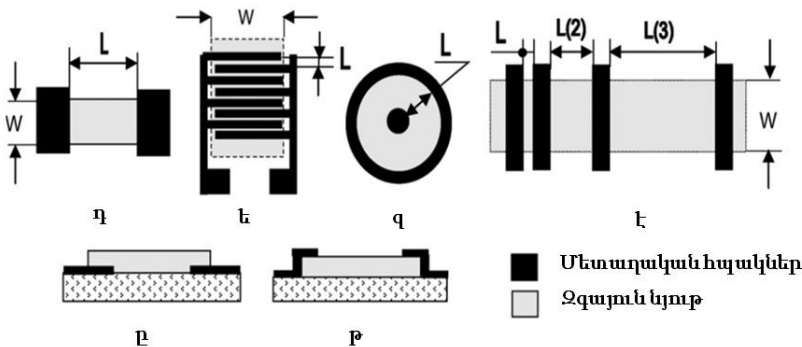
§2.3. ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ԷԼԵԿՏՐՈՂՆԵՐ

Կախված կիրառության ոլորտից, հետազոտվող գազի տեսակից, սենսորի աշխատանքային ջերմաստիճանից և աշխատունակության այլ պարամետրերից՝ ռեզիստիվ սենսորները կարող են ունենալ տարբեր կառուցվածքներ. զգայուն նյութը կարող է լինել կերամիկական-մետաղօքսիդային և թաղանթային (պլանար): Թաղանթայինն իր հերթին կարող է լինել բարակթաղանթային (50-500 նմ) և հաստթաղանթային (> 500 նմ): Հայտնի է, որ սենսորի գազազգայնության վրա էական ազդեցություն ունեն գազազգայուն տարրի (նյութի) երկրաչափությունը և մետաղական հպակների ձևն ու դիրքը: Նկ. 2-ում ներկայացված են գազային սենսորների հպակների մի քանի տարբերակներ [9, 22]:

Կերամիկական սենսորներ



Պլանար սենսորներ



Նկ. 2. Մետաղօքսիդային գազային սենսորներում հպակների հնարավոր տարբերակները

Իրական գործող սարքերում հիմնականում օգտագործվում են Նկ. 2-ի գ)-ից է) տարբերակներում պատկերված հպակները: Ընդհանրապես զույգ հպակները կարելի է նստեցնել թաղանթը նստեցնելուց առաջ և հետո (Նկ. 2. ը, ք): Բանն այն է, որ, ինչպես ազնիվ մետաղներից նստեցված կատալիզային հատիկների դեպքում, մետաղական հպակների և զգայուն թաղանթի մերձկոնտակտային հատվածներում ևս կարող են առաջանալ ակտիվ կատալիզային տիրույթներ (spillover zone), որոնք բարելավում են զգայնությունը և արագագործությունը: Այս տեսանկյունից նախընտրելի են զգայուն թաղանթի մակերևույթին նստեցված մետաղական հպակներով կառուցվածքները, սակայն մյուս կողմից թաղանթի հակառակ կողմում հպակների տեղակայումը թույլ է տալիս ստանալ զգայուն տարրի ավելի մեծ ակտիվ մակերես: Ընդհանրապես չափային էֆեկտներն ի հայտ են գալիս այն պատճառով, որ հետազոտվող գազի ազդեցությամբ թաղանթի հաղորդականությունը փոփոխվում է անհամասեռ ձևով և ոչ ակնթարթորեն. գազը պետք է դիֆուզվի թաղանթի խորքը՝ ազդելով հատիկների մակերևութային աղբատացված շերտերի վրա: Այդ պատճառով փոխվում է թաղանթի տեղային հաղորդականությունը: Եթե հպակները նստեցված են թաղանթի հակառակ կողմում, ապա միջհպակային հեռավորությունը մեծացնելիս զգայնությունն աճում է, իսկ եթե հպակները նստեցվում են թաղանթի վերևի մասում (մակերևույթին), ապա միջհպակային հեռավորությունը մեծացնելիս զգայնությունը նվազում է: Բավական մեծ է նաև միջհպակային հեռավորությունների դերը: Օրինակ՝ այդ հեռավորությունը 400 մկմ-ից 200 մկմ հասցնելու դեպքում SnO_2 -ի հիման վրա պատրաստված կերամիկական սենսորի զգայնությունը CO -ի նկատմամբ բավականին մեծանում է, քանի որ մերձկոնտակտային հատվածներում գտնվող ակտիվ կատալիզային տիրույթները մոտենում են իրար և ծածկում գազազգայուն մակերևույթի ավելի մեծ հատվածներ [23]: Սենսորի պարամետրերի ավելի մեծ փոփոխություններ կարող են տեղի ունենալ, երբ հպակների հեռավորությունը դառնում է փոքր որոշակի կրիտիկական արժեքից:

Աղյուսակ 5

Կիսահաղորդչային գազային սենսորներում օգտագործվող հիմնական
հալակային նյութերը և դրանց առանձնահատկությունները

Նյութ	Էլեկտրական հատկություններ	Առավելություններ	Թերություններ
Արծաթ	✓ Համատեղելիություն ռեզիստորների և դիէլեկտրական համակարգերի հետ ✓ Տեսակարար դիմադրություն՝ 1.59×10^{-8} Օհմ·մ	✓ Ամենաէժանն է ✓ Ունի լավ կաշտողականություն	✓ Բարձր խոնավության պայմաններում ենթարկվում է միգրացիայի
Ոսկի	✓ Հուսալիություն ✓ Տեսակարար դիմադրություն՝ 2.44×10^{-8} Օհմ·մ	✓ Հարմար է ուլտրաձայնային զոդման համար	✓ Ունի բարձր ինքնաքայքայում ✓ Անագային զոդման համար նպատակահարմար չէ
Պլատին	✓ Տեսակարար դիմադրություն՝ 11.0×10^{-8} Օհմ·մ	✓ Կայուն է բարձր ջերմաստիճանում	✓ Ամենաթանկն է
Պալադիում-արծաթ	✓ Համատեղելիություն ռեզիստորների և դիէլեկտրական համակարգերի հետ ✓ Մակերևութային դիմադրություն՝ 0.01-0.04 Օհմ/□	✓ Հարմար է ուլտրաձայնային զոդման համար	✓ Բարձր խոնավության պայմաններում արծաթը ենթարկվում է միգրացիայի
Պլատին-արծաթ	✓ Ալլոտրոպ է (Pd-Ag)-ին ✓ Մակերևութային դիմադրություն՝ 0.01-0.04 Օհմ/□	---	✓ Ուլտրաձայնային զոդման համար հարմար չէ
Պլատին-ոսկի	✓ Համատեղելիություն հաստթաղանթային կառուցվածքների հետ ✓ Մակերևութային դիմադրություն՝ 0.08-0.1 Օհմ/□	✓ Անագային զոդման համար գերազանց է	✓ Ունի բարձր գին ✓ Բարձր տեսակարար դիմադրություն

Պալա- դիում- ոսկի	✓ Ունի Pt-Au հպակի նույն հատկություն- ները ✓ Մակերևութային դիմադրություն՝ 0.04-0.10 Օհմ/□	✓Ավելի էժան է, քան Pt-Au հպակը	✓Անագային զոդ- ման դեպքում ու- նի ավելի վատ ժամանակային կայունություն, քան Pt-Au հպա- կը
-------------------------	--	--------------------------------------	--

Զգայնության, արագագործության և կայունության տեսանկյու-
նից բավական մեծ նշանակություն ունի գազային սենսորի հպա-
կային նյութի տեսակը: Որպես հպակային նյութ հիմնականում օգ-
տագործվում են ազնիվ մետաղները կամ դրանց խառնուրդները՝ ար-
ծաթ, ոսկի, պլատին, պալադիում-արծաթ, պլատին-արծաթ, պլա-
տին-ոսկի և պալադիում-ոսկի: Սրանք ունեն բավական բարձր հա-
ղորդականություն, քիմիական կայունություն, ամրություն և ժամա-
նակի ընթացքում գրեթե չեն օքսիդանում: **n** տիպի կիսահաղորդ-
չային մետաղօքսիդների հետ այս նյութերը հիմնականում ձևավո-
րում են բավական հուսալի օհմական հպակներ, չնայած որոշ դեպ-
քերում կարող են կաչողականությանն առնչվող խնդիրներ առաջա-
նալ (հատկապես՝ Ag-ի օգտագործման դեպքում): Այս դեպքում, ինչ-
պես ընդհանրապես կիսահաղորդչային սարքաշինության մեջ, օգ-
տագործվում են շատ բարակ (< 20 նմ) անցումային (ադգեզիոն) շեր-
տեր, որոնք կիսահաղորդչի և մետաղի միջև կապակցող դեր են կա-
տարում: Աղյուսակ 5-ում ներկայացված են կիսահաղորդչային գա-
զային սենսորներում օգտագործվող հիմնական հպակային նյութերը
և դրանց առանձնահատկությունները [8, 24]:

Առաջին մոտավորությամբ սենսորի արձագանքի վրա անմիջա-
կանորեն ազդում են ոչ թե նրա գազազգայուն թաղանթի երկրաչա-
փական պարամետրերը՝ երկարությունը (**L**) և լայնությունը (**W**), այլ
L/W հարաբերությունը: Սանրաձև հպակների դեպքում էլեկտրոդնե-
րի միջև փոքր հեռավորությունն առաջ է բերում փոքր մակերևու-
թային հաղորդականություն: Այս ձևով կարելի է ստանալ առավելա-
գույն զգայնություն և չափումների հարմարության համար ցանկալի
դիմադրության տիրույթ (Y Օհմ-երից մինչև տասնյակ MO Օհմ-եր):

ԳԼՈՒԽ III

ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԳՉԱՅԻՆ ԳԱԶԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԸ

§ 3.1. ՍԵՆՍՈՐԻ ԱՐՉԱԳԱՆՔՄԱՆ ԿՈՐԸ

Հայտնի է, որ կիսահաղորդչային գազային սենսորների արձագանքման բնութագրերը հիմնականում որոշվում են զգայուն նյութի տեսակով: § 2.2.-ում ներկայացված նյութերի այսպիսի մեծ բազմազանության մեջ աշխատանքային օպտիմալ պարամետրերով սենսորի զգայուն տարրի ընտրությունն այս ոլորտի հիմնական խնդիրներից մեկն է: Այդ խնդրի լուծման համար անհրաժեշտ է գտնել այնպիսի նյութ, որը կունենա ֆիզիկաքիմիական հատկությունների (պարամետրերի) յուրահատուկ համադրություն: Ինչպես արդեն նշել ենք, այս առումով առավել նախընտրելի են մետաղօքսիդները, որոնց հիման վրա կարող են պատրաստել և՛ բարակթաղանթային, և՛ հաստթաղանթային մանոկատոցվածքային, և՛ կերամիկական սենսորներ:

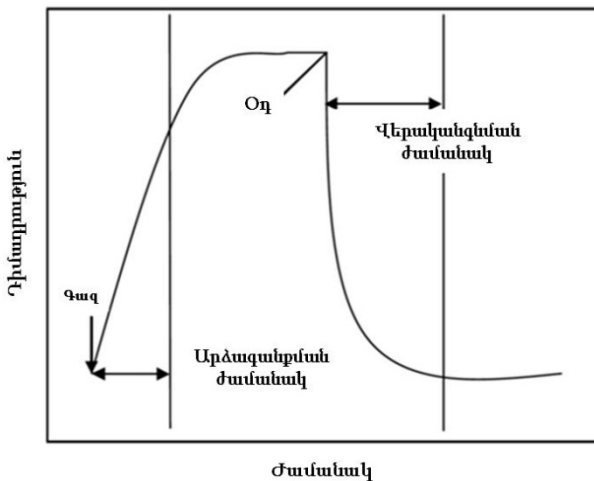
Կիսահաղորդչային ռեզիստիվ գազային սենսորի դիմադրությունը թիրախային գազի առկայությամբ փոխվում է, ինչն էլ ծառայում է որպես ազդանշան: Կիսահաղորդչի դիմադրությունն աճում է կամ նվազում՝ կախված հետազոտվող գազի տեսակից (օքսիդացնող կամ վերականգնող) և կիսահաղորդչի տիպից: Աղյուսակ 6-ում ներկայացված են կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորների դիմադրության փոփոխության հնարավոր դեպքերը: Հարկ է նշել նաև, որ վերականգնող գազի մոլեկուլը կիսահաղորդչի մակերևույթին ադսորբված թթվածնի ատոմի կամ մոլեկուլի հետ ռեակցիայի հետևանքով վերցնում է թթվածնի ատոմ կամ մոլեկուլ, իսկ օքսիդացնող գազը, ընդհակառակը, օքսիդացնում է կիսահաղորդչի մակերևույթը: Գազազգայնության հնարավոր մեխանիզմներին ավելի հանգամանորեն կանդրադառնանք **ԳԼՈՒԽ IV**-ում:

Կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորների դիմադրության
փոփոխության հնարավոր դեպքերը

Կիսահաղորդչի տիպը	Օքսիդացնող գազ	Վերականգնող գազ
n տիպ	Դիմադրությունն աճում է	Դիմադրությունը նվազում է
p տիպ	Դիմադրությունը նվազում է	Դիմադրությունն աճում է

Հետազոտվող գազի առկայությամբ կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորի արձագանքման կորն աշխատանքային ջերմաստիճանում (50°C - 350°C) ներկայացված է Նկ. 3-ում [25-27]: Սենսորի արձագանքման կորը բնութագրվում է 5 հիմնական պարամետրերով՝

- 1) զգայնություն,
- 2) ընտրողունակություն,
- 3) կայունություն,
- 4) արձագանքման ժամանակ,
- 5) վերականգնման ժամանակ:



Նկ. 3. Ռեզիստիվ գազային սենսորի արձագանքման կորը

Ստորև ավելի հանգամանորեն կներկայացնենք նշված 5 պարամետրերը և դրանց հնարավոր ազդեցությունները սենսորների աշխատունակության վրա:

§ 3.2. ԶԳԱՅՆՈՒԹՅՈՒՆ

Ինչպես արդեն նշել ենք, ռեզիստիվ սենսորների զգայնության մեխանիզմները հիմնված են թիրախային գազի առկայությամբ զգայուն նյութի այս կամ այն պարամետրերի (ֆիզիկական կամ քիմիական) փոփոխության վրա: Կիսահաղորդչային ռեզիստիվ գազային սենսորների դեպքում այդ պարամետրերը էլեկտրական դիմադրությունը (R) կամ հաղորդականությունն են: Ընդհանրապես զգայնությունը սահմանվում է որպես թիրախային գազի առկայությամբ և օդում զգայուն նյութի դիմադրությունների հարաբերություն (հավասարակշռության վիճակում): Օքսիդացնող գազերի դեպքում n տիպի կիսահաղորդչի զգայնությունը որոշվում է

$$S = \frac{R_{\text{գազ}}}{R_{\text{օդ}}} \quad (1)$$

բանաձևով, իսկ վերականգնող գազերի դեպքում՝

$$S = \frac{R_{\text{օդ}}}{R_{\text{գազ}}} \quad (2)$$

բանաձևով:

Ամեն դեպքում զգայնությունն անչափելի մեծություն է, սակայն հաճախ այն արտահայտվում է տոկոսներով, այլ ոչ թե ուղղակի դիմադրությունների հարաբերությամբ (այն արտահայտվում է հավասարակշռության վիճակում դիմադրությունների տարբերության և մեծ դիմադրության հարաբերությամբ): Օրինակ՝ վերականգնող գազերի դեպքում n տիպի կիսահաղորդչի համար այն կորոշվի հետևյալ կերպ.

$$S = \frac{R_{\text{օդ}} - R_{\text{գազ}}}{R_{\text{օդ}}} \times 100 \%: \quad (3)$$

Այս տիպի սենսորներում զգայնությունը մեծապես կախված է զգայուն թաղանթի ծակոտկենության աստիճանից և հաստությունից,

աշխատանքային ջերմաստիճանից, գազազգայուն նյութում պարունակվող խառնուրդների տեսակից և քանակից, մակերևույթին ազնիվ մետաղներից նստեցված կատալիզային հատիկների կոնցենտրացիայից, բազմաբյուրեղային թաղանթում բյուրեղիկների չափսերից և ձևից, սենսորի երկրաչափական ձևից և այլն: Քիմոնեզիստիվ գազային սենսորների գազազգայնության բարելավման մեխանիզմները բազմազան են, և հաճախ տվյալ պարամետրի փոփոխությունը՝ միտված գազազգայնության բարելավմանը, կարող է հանգեցնել սենսորի մեկ այլ պարամետրի վատթարացման: Այնուամենայնիվ, գազազգայնության բարելավման հիմնական ուղիներից են զգայուն թաղանթում բյուրեղիկների (հատիկների) չափսերի փոքրացումը, թաղանթի հաստության նվազեցումը, խառնուրդների և կատալիզային հատիկների օպտիմալ կոնցենտրացիաների, ինչպես նաև տվյալ գազի համար աշխատանքային օպտիմալ ջերմաստիճանի ընտրությունը:

§ 3.3. ԸՆՏՐՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Գազազգայուն մետաղօքսիդները հաճախ նույն կարգի զգայնություն են ցուցաբերում մի քանի գազերի նկատմամբ, և այս պարագայում դժվար է տարբերակել, թե ռեզիստիվ սենսորի պարամետրերը (դիմադրություն և հաղորդականություն) կոնկրետ որ գազի ազդեցությամբ են փոփոխվում: Սենսորի՝ միայն տվյալ թիրախային գազը հայտնաբերելու ունակությունը միջավայրում այլ գազային խառնուրդների առկայության դեպքում անվանում ենք ընտրողունակություն: Բարձր ընտրողունակությամբ սենսորը տարբեր գազերի առկայությամբ պետք է զգայնություն ցուցաբերի միայն տվյալ թիրախային գազի նկատմամբ, կամ գոնե նրա առավելագույն զգայնությունը դիտվի հենց այդ գազի նկատմամբ: Ընտրողունակությունը որոշվում է ընտրողունակության գործակցով, որն արտահայտվում է թիրախային գազի զգայնության (S_{pq}) և մեկ այլ գազի (առկա գազերից այն, որն ունի թիրախային գազից հետո ամենաբարձր զգայնու-

թյունը) զգայնության ($S_{ագ}$) հարաբերությամբ մույն կոնցենտրացիայի դեպքում.

$$K = \frac{S_{թգ}}{S_{ագ}} : \quad (4)$$

Շատ հաճախ տարբեր գազեր զգայուն նյութի վրա ունենում են նույնատիպ ազդեցություն, և մենք չենք կարող ասել, թե տվյալ փոփոխությունը որ գազի առկայությամբ է պայմանավորված: Օրինակ՝ էթանոլը, ածխածնի մոնօքսիդը և մեթանը կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորների կողմից մույն աշխատանքային ջերմաստիճանում մեծ դժվարությամբ են տարբերակվում, և շատ դեպքերում մենք ունենում ենք կեղծ տեղեկատվություն: Ընտրողունակությունը կարելի է բարելավել՝ ընտրելով համապատասխան աշխատանքային ջերմաստիճան (ջերմաստիճանային մոդուլացիա): Բանն այն է, որ այս տիպի սենսորները հիմնականում աշխատում են սենյակայինից բարձր ջերմաստիճանում, և տարբեր գազերի նկատմամբ սենսորն առավելագույն զգայնություն կարող է ցուցաբերել տարբեր ջերմաստիճաններում: Ջգայնության կամ ընտրողունակության կախվածությունն աշխատանքային ջերմաստիճանից բացատրվում է ադսորբցիոն/դեսորբցիոն երևույթների և գազ-կիսահաղորդիչ քիմիական ռեակցիաների ջերմաստիճանային կախվածությամբ: Այն գազերի նկատմամբ, որոնց ադսորբցիայի և դեսորբցիայի, ինչպես նաև ռեակցիաների ակտիվացիայի էներգիաները բավականին ցածր են, սենսորի զգայնությունը կոիտվի բավականին ցածր ջերմաստիճանում: Կիսահաղորդչի մակերևույթին ավելի դժվար ադսորբվող և տրոհվող գազերի դեպքում պահանջվում է ավելի բարձր աշխատանքային ջերմաստիճան: Յուրաքանչյուր գազի համար գոյություն ունի կրիտիկական ջերմաստիճան (հիմնականում համապատասխանում է այն ջերմաստիճանին, որից սկսած՝ գազազգայուն մակերևույթին թիրախային գազի դեսորբցիայի արագությունը գերազանցում է ադսորբցիայի արագությունը), երբ սենսորի ելքային ազդանշանն առավելագույնն է, հետևաբար ջերմաստիճանի միջոցով կարելի է կառավարել ընտրողունակությունը: Հարկ է նշել նաև, որ աշխատանքային ջերմաստիճանի կառավարման հայտնի և բավականին արդյունավետ մեթոդ

է կատալիզատորների կիրառումը, որոնք իջեցնում են աշխատանքային ջերմաստիճանը, և քիրախային գազի ցածր կոնցենտրացիաներն ավելի հեշտ են գրանցվում սենսորի կողմից: Այսպիսով, ջերմաստիճանային մոդուլացիայի շնորհիվ սենսորն առավելապես կարող է զգալ միայն տվյալ տեսակի գազը, ինչը նշանակում է, որ այն օժտված է բարձր ընտրողունակությամբ:

Ընտրողունակության բարձրացման մյուս եղանակը տարատեսակ ֆիլտրերի և դիմակների օգտագործումն է: Սենսորի զգայուն մակերևույթին տեղակայվում է այնպիսի ֆիլտր, որը մթնոլորտից դեպի սենսորի ակտիվ մակերևույթ բաց է թողնում միայն տվյալ գազի մոլեկուլները կամ ատոմները: Օրինակ՝ սենսորի՝ ջրածնի նկատմամբ զգայնության բարձրացման համար օգտագործվում է այնպիսի ֆիլտր, որի անցքերի տրամագիծը ջրածնի մոլեկուլի տրամագծի կարգի է: Այս դեպքում մոլեկուլի՝ ավելի մեծ տրամագիծ ունեցող գազերը (ածխաջրածնային գազեր և այլն) ուղղակի անանցանելի են: Հասկանալի է, որ այս մեթոդը կիրառելի չէ այն դեպքում, երբ քիրախային գազի մոլեկուլի տրամագիծն ավելի մեծ է, քան շրջակա միջավայրում եղած այլ գազերինը:

Սենսորի զգայուն թաղանթի կազմաբանությունը և կառուցվածքը նույնպես կարող են մեծապես ազդել ընտրողունակության վրա: Սենսորի զգայնությունը քիրախային գազի նկատմամբ սովորաբար բնութագրվում է կիսահաղորդչի մակերևույթին գազի ռեակցիայով և մակերևույթից դեպի թաղանթի խորքը գազի մոլեկուլների դիֆուզիայով: Գազը դիֆուզվում է ծակոտկեն թաղանթի միջհատիկային տիրույթներով և միաժամանակ սպառվում (դիսոցացվում) ռեակցիայի հաշվին: Այս պարագայում զգայուն, ծակոտկեն թաղանթի՝ ճիշտ ընտրված շառավղով ծակոտիները կարող են ծառայել որպես բնական ֆիլտր այս կամ այն տիպի գազի համար:

Ընտրողունակությունը կարելի է բարելավել նաև գազազգայուն նյութում համապատասխան խառնուրդային ատոմների ներմուծման և դրանց կոնցենտրացիաների փոփոխման միջոցով: Խառնուրդների առկայությամբ պայմանավորված՝ փոխվում է բազմաբյուրեղային կիսահաղորդչի Ֆերմի մակարդակը, հետևաբար նաև ազատ լիցքա-

կիրների կոնցենտրացիան, ինչպես նաև դրանք մեծապես ազդում են բազմաբաղադրիչ մետաղօքսիդների կատալիզային հատկությունների վրա: Հիմնական զգայուն նյութում ընտրելով համապատասխան խառնուրդ և գտնելով դրա օպտիմալ կոնցենտրացիան՝ կարելի է հասնել ընտրողունակության բարձր մակարդակի:

§ 3.4. ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆ

Գործնականում կիրառվող սենսորը պետք է անխափան աշխատի տևական ժամանակ (առնվազն մի քանի տարի)՝ չունենալով հիմնական պարամետրերի էական շեղում: Իրականում այս տիպի սենսորների գործնական կիրառության համար մեծ խոչընդոտ է ցածր կայունությունը: Այս պարամետրով բնութագրվում է սարքի անխափան աշխատանքի պարբերականությունը տևական ժամանակահատվածում: Առանձնացվում են սենսորի կայունությունը վատթարացնող 3 հիմնական պատճառներ: Առաջինը ժամանակի ընթացքում սենսորի մակերևույթի աղտոտվածության մեծացումն է: Ժամանակի ընթացքում աշխատանքային ռեժիմում սենսորի ակտիվ մակերևույթին մթնոլորտից ադսորբվում են որոշ բուրավոր (աղտոտող) գազեր (հիմնականում՝ ֆոսֆորային կամ սուլֆիդային), որոնք խոչընդոտում են սենսորի մակերևույթի և թիրախային գազի հետագա փոխազդեցությունը, ինչը հանգեցնում է զգայնության էական նվազման: Զգայուն շերտի մակերևույթի իմպուլսային տաքացումը կարող է լուծել այս խնդիրները: Սենսորի ակտիվ մակերևույթը պարբերաբար կարճ ժամանակով տաքացվում է մինչև նրա աշխատանքային ջերմաստիճանից նվազագույնը 100°C -ով բարձր ջերմաստիճան: Բարձր ջերմաստիճանում ադսորբված անցանկալի մասնիկների դեսորբցիան ավելի հավանական է դառնում:

Կայունության անկման երկրորդ պատճառը ժամանակի ընթացքում զգայուն նյութի բնութագրերի փոփոխությունն է: Օրինակ՝ երկարատև օգտագործման ընթացքում կարող են փոխվել սենսորի զգայուն նյութի և մետաղական հպակների միջև ձևավորված մետաղ-կիսահաղորդիչ անցման կոնտակտային բնութագրերը (դիմադրություն, ունակություն և այլն), ինչի պատճառը հիմնականում այս եր-

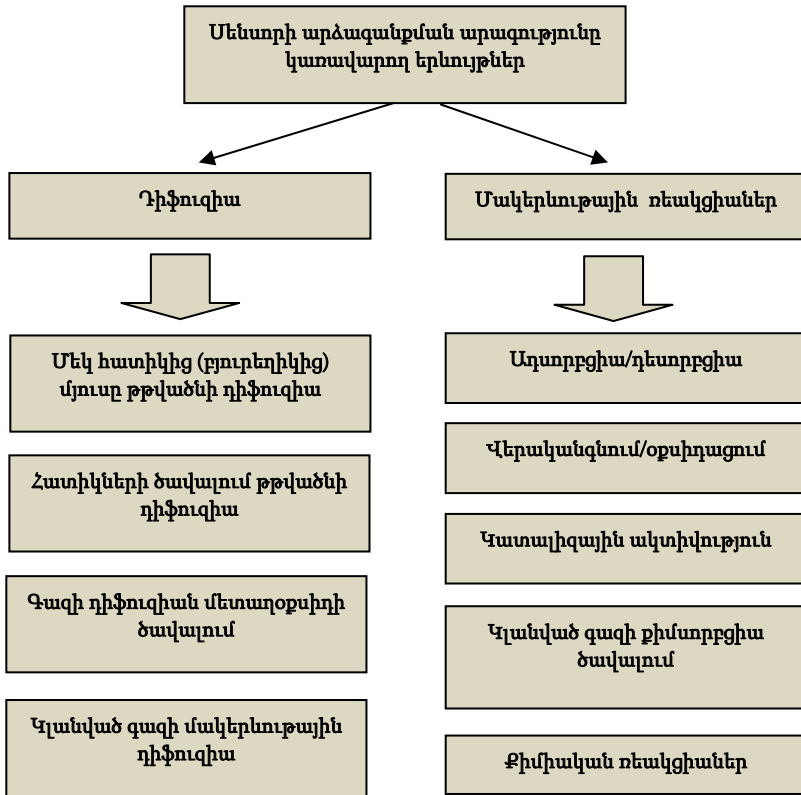
կու նյութերի ջերմային ընդարձակման գործակիցների տարբերությունն է: Բացի այդ՝ ժամանակի ընթացքում փոխվում են նաև զգայուն նյութում միջհատիկային կոնտակտների բնութագրերը: Նշված դեպքերում գրանցվում են սենսորի զգայնության և արագագործության էական շեղումներ իրենց սկզբնական արժեքներից: Նշված հետևանքներից խուսափելու լավագույն ճանապարհը սենսորի համար զգայուն նյութի և մետաղական հպակների ճիշտ ընտրությունն է և պատրաստման ընթացքում ճշգրիտ տեխնոլոգիական ռեժիմների կիրառումը:

Կայունության անկման մյուս պատճառը կապված է սենսորի զգայուն թաղանթի կառուցվածքային փոփոխությունների հետ: Երկար ժամանակ բարձր աշխատանքային ջերմաստիճանում գտնվող կիսահաղորդչային բազմաբյուրեղային (հատիկային) թաղանթի կառուցվածքը կարող է էականորեն փոփոխվել: Աշխատանքային բարձր ջերմաստիճանում (200°C - 500°C) զգայուն թաղանթի նանոչափային հատիկները կարող են միավորվել՝ ձևավորելով ավելի մեծ հատիկներ՝ ագլոմերացիաներ: Հայտնի է, որ թաղանթում հատիկների չափսերի մեծացումը հանգեցնում է զգայնության անկման, ուստի ավելի մեծ չափսեր ունեցող ագլոմերացիաների ձևավորումը կուղեկցվի գազազգայնության անկմամբ: Բացի այդ՝ նշված ջերմաստիճաններում կարող է տեղի ունենալ մույնիսկ խառնուրդային ատոմների միգրացիա, որը ևս մեծապես կազդի գազազգայնության պարամետրերի վրա: Կառուցվածքային փոփոխություններից բխող անկայունությունը բարելավելու լավագույն եղանակը սենսորի ջերմային մշակումն է: Թրծման բարձր ջերմաստիճանը և երկարատև ժամանակը թույլ են տալիս խուսափել կառուցվածքային անկայունություններից և ունենալ ժամանակի ընթացքում չփոփոխվող պարամետրեր: Հարկ է նշել, որ սենսորի կայունությունը մեծապես կախված է նաև քիմիային գազի տեսակից: Խնդիրն այն է, որ հաճախ հենց քիմիային գազն է (CO_2 , H_2O և այլն) քայքայիչ, և այս դեպքում սենսորի պարամետրերը ենթարկվում են անդարձելի փոփոխությունների: Այս դեպքում ևս բարձր ջերմաստիճանում ակտիվ մակերևույթի իմպուլսային տաքացումը կարող է մասամբ լուծել նշված խնդիրները:

§ 3.5. ԱՐՁԱԳԱՆՔՄԱՆ ԵՎ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿՆԵՐ

Սենսորի արագագործությունը հիմնականում որոշվում է երկու ժամանակային պարամետրերով՝ արձագանքման և վերականգնման ժամանակներով: Արձագանքման ժամանակը գազի առկայությամբ զգայուն թաղանթի դիմադրության փոփոխության առավելագույն արժեքի 80-90 %-ին հասնելու ժամանակն է, իսկ վերականգնման ժամանակը՝ ազդանշանի առավելագույն արժեքի 90 %-ը կորցնելու ժամանակը (Նկ. 3): Այս պարամետրերն առավելապես կարելի է կառավարել՝ փոփոխելով և՛ աշխատանքային ջերմաստիճանը, և՛ սենսորի կառուցվածքային բնութագրերը: Կախված այս բնութագրերից՝ սենսորի արձագանքման և վերականգնման ժամանակները կարող են գտնվել վայրկյաններից մինչև րոպեներ ընկած տիրույթում: Քանի որ սենսորի արագագործությունը հիմնականում պայմանավորված է կիսահաղորդչի մակերևույթին և ծավալում կիսահաղորդիչ-գազ քիմիական ռեակցիաների արագությամբ, ինչպես նաև կիսահաղորդչի մակերևույթին (ադսորբված գազը դիֆուզվում է ոչ միայն դեպի թաղանթի խորքը, այլ նաև մակերևույթի երկայնքով) և ծավալում ադսորբված գազի դիֆուզիայի արագությամբ, իսկ նշված երևույթները խիստ կախված են ջերմաստիճանից, ապա արագագործությունը (արձագանքման և վերականգնման ժամանակները) միանշանակ կորոշվի աշխատանքային ջերմաստիճանով (Նկ. 4) [28]: Սովորաբար ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց՝ նշված պրոցեսներն արագանում են, ինչը հանգեցնում է արձագանքման և վերականգնման ժամանակների կրճատման, սակայն ջերմաստիճանի՝ չափից շատ բարձրացման դեպքում գազի դետորբցիայի արագությունը կարող է գերազանցել ադսորբցիայի, արագությունը և կունենանք զգայնության կորուստ: Հարկ է նշել, որ սենսորը մշտապես գտնվում է աշխատանքային ջերմաստիճանում (50°C - 350°C), և նշված բոլոր պրոցեսները (ադսորբցիա և դետորբցիա, վերականգնում և արձագանքում) ընթանում են այդ ջերմաստիճանում: Ինչպես արդեն նշել ենք, արագագործությունը մեծապես կախված է նաև սենսորի բնութագրերից, ինչպի-

սիք են բյուրեղիկների (հատիկների) չափսերը, քաղանքի հաստությունը, հաժվելումները, կատալիզային մետաղի տեսակը, էլեկտրոդների ձևը, չափսերն ու դիրքը և այլն: Հարկ է նշել, որ արագագործության բարելավման նպատակով նշված պարամետրերի փոփոխությունը կարող է հանգեցնել կարևորագույն այլ պարամետրերի վատացման, ուստի պետք է գտնել այս բոլոր պարամետրերի այն օպտիմալ համադրությունը, որի դեպքում սենսորը կլինի հնարավորինս աշխատունակ:



Նկ. 4. Մենսորի արձագանքի արագությունը կառավարող երևույթները

Աղյուսակ 7
Կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորների
հիմնական պարամետրերը

Պարամետր	Պարամետրի սահմանումը
Աշխատանքային ջերմաստիճան	Որոշվում է առավելագույն զգայնությամբ
Զգայնություն	Գազի տվյալ կոնցենտրացիայի դեպքում հաղորդականության փոփոխությունը
Սկզբնական (բազային) դիմադրություն	Զգայուն շերտի սկզբնական դիմադրությունը թիրախային գազի բացակայության պայմաններում
Արձագանքման ժամանակ	Գազի առկայությամբ ստացիոնար վիճակին հասնելու ժամանակամիջոցը
Վերականգնման ժամանակ	Գազի ազդեցության վերացման դեպքում սկզբնական դիմադրության արժեքին հասնելու ժամանակամիջոցը
Ընտրողունակություն	Այլ գազերի ազդեցությունը թիրախային գազի զգայնության վրա
Երկարաժամկետ կայունություն	Դիմադրության սկզբնական արժեքի փոփոխությունը ժամանակի ընթացքում
Փոխանջատման ժամանակամիջոց	Սենսորը միացնելու պահից մինչև աշխատունակության վիճակին հասնելու ժամանակամիջոցը (զգայուն տարրի՝ սենյակայինից մինչև աշխատանքային ջերմաստիճանին հասնելու ժամանակամիջոցը)
Արձագանքման ունակություն	Զգայնության նվազագույն շեմը
Խոնավության ազդեցություն	Խոնավության առկայությամբ արձագանքի փոփոխությունը
Գծայնություն	Արձագանքի գծային կախվածությունը գազի կոնցենտրացիայից
Սպառման հզորություն	Հիմնականում սենսորի տաքացուցչի վրա սպառված հզորությունը
Ամրություն	Սենսորի մեխանիկական ամրությունը, որն անհրաժեշտ է այն տեղաշարժելու, այլ համակարգերի կցելու և օգտագործելու համար

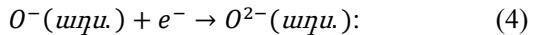
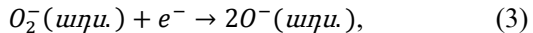
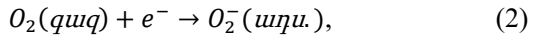
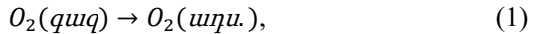
Հուսալիություն	Մենտորի երկարատև և անվտանգ օգտագործման ունակությունը
Վերարտադրելիություն	Նույնատիպ պարամետրերով սենսորների արտադրության հնարավորությունը
Արտադրողականություն	Նույնատիպ պարամետրերով բազմաթիվ սենսորների լայնամասշտաբ արտադրության հնարավորությունը
Ինքնարժեք	Մենստորում օգտագործվող նյութերի և պատրաստման ծառայությունների համար անհրաժեշտ գումարը

Բացի վերը նշված 5 հիմնական պարամետրերից՝ գազային սենսորները բնութագրվում են նաև այլ կարևորագույն պարամետրերով, որոնք սենսորների արտադրման և գործնական կիրառության տեսանկյունից մեծ նշանակություն ունեն: Մենսորի նախագծման, պատրաստման և օգտագործման ժամանակ առավել կարևոր բնութագրերը հետևյալներն են՝ արձագանքման ունակություն, խոնավության նկատմամբ կայունություն, գծայնություն, սպառման հզորություն, մեխանիկական ամրություն, հուսալիություն, վերարտադրելիություն և արտադրողականություն: Աղյուսակ 7-ում ներկայացված են կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորների հիմնական բնութագրերը և դրանց սահմանումները [29, 30]:

ԳԼՈՒԽ IV
ՔԻՄՈՒԶԻՍՏԻՎ ՄԵՆՍՈՐԻ ԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ
ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԸ

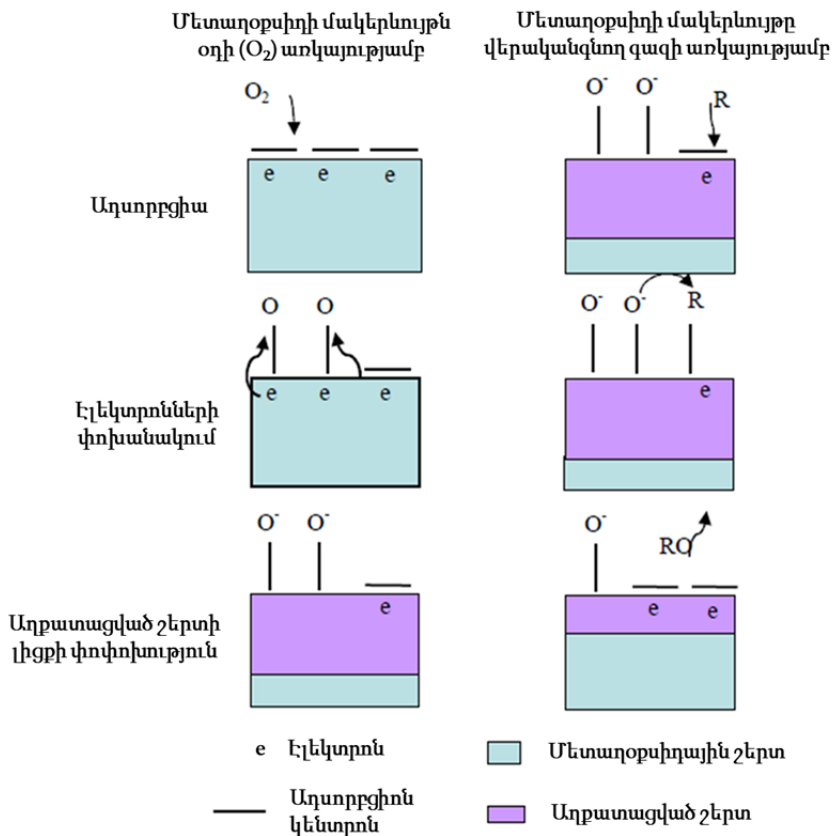
§ 4.1. ՔԻՄԻԱԿԱՆ ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐԻ ԳԵՐԸ

Ինչպես նշվել է, մետաղօքսիդային կիսահաղորդչային գազային սենսորների արձագանքը զգայուն շերտի մակերևույթին տեղի ունեցող ռեակցիաների հետևանք է: Սովորական պայմաններում օդից թթվածնի մոլեկուլներն ադսորբվում են **n** տիպի կիսահաղորդչի մակերևույթին, փոխազդում են կիսահաղորդչի հաղորդականության գոտում գտնվող էլեկտրոնների հետ, ինչի հետևանքով կլանված թթվածնի մոլեկուլների մի մասը փոխակերպվում է իոնների (O_2^- , O^- , O^{2-}) (Ռեակցիաներ 1-4):



Որպես արդյունք՝ **n** տիպի կիսահաղորդչի մերձմակերևութային բարակ շերտում առաջանում է էլեկտրոններից աղքատացված տիրույթ, այսինքն՝ տարածական լիցքի շերտ [31]: Վերականգնող գազի մոլեկուլները, հասնելով կիսահաղորդչի մակերևույթին, ռեակցիայի մեջ են մտնում թթվածնի տեղայնացված իոնների հետ, վերցնում դրանք՝ ցանցին վերադարձնելով էլեկտրոնները, ինչի հետևանքով փոքրանում է աղքատացված շերտի հաստությունը (Նկ. 5) [32]: Օքսիդացնող գազերի դեպքում իրավիճակը ճիշտ հակառակն է. գազի մոլեկուլները, հասնելով կիսահաղորդչի մակերևույթին, տարրալուծվում են՝ առաջացնելով թթվածնի մոլեկուլներ կամ ատոմներ, որոնք կիսահաղորդչից վերցնում են էլեկտրոններ՝ դառնալով տեղայնացված բացասական իոններ, ինչի հետևանքով մեծանում է աղքատացված շերտի հաստությունը: Տարածական լիցքի շերտի փոփոխությունը հանգեցնում է կիսահաղորդչային զգայուն շերտի մակերևութային դիմադրության կամ հաղորդականության փոփոխության: Հաստ թա-

դանթների (> 500 մմ) և փոքր մոլեկուլային շառավիղ ունեցող գազերի դեպքում փոխվում է մաս ծավալային դիմադրությունը: Ահա այս պատճառով են նմանատիպ սենսորները կոչվում ռեզիստիվ (դիմադրական) կամ հաղորդականության տիպի:



Նկ. 5. Կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորի գազազգայնության մեխանիզմի սխեմատիկ նկարագրությունը

Կիսահաղորդչի մակերևույթին վերականգնող և օքսիդացնող գազերի ռեակցիաները

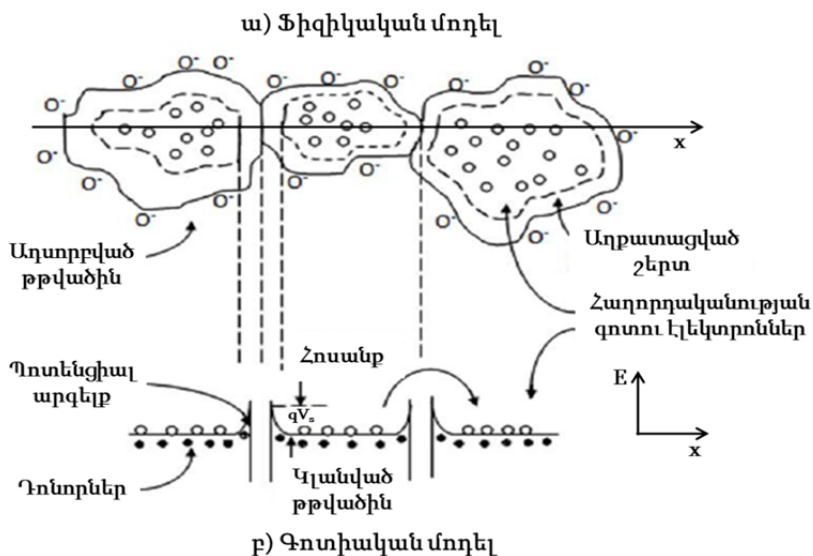
Վերականգնող գազեր	Քիմիական ռեակցիաներ
Ջրածին (H_2)	1) $H_2 \text{ գազ} \leftrightarrow H_2 \text{ աղյ.}$ 2) $H_2 \text{ աղյ.} + 1/2 O_2^- \rightarrow H_2O + e^-$
Բութան (C_4H_{10})	1) $C_4H_{10} \text{ գազ} \leftrightarrow C_4H_{10} \text{ աղյ.}$ 2) $C_4H_{10} \text{ աղյ.} + 13 O_2^- \rightarrow 4 CO_2 + 5 H_2O + 13 e^-$ 3) $C_4H_{10} \text{ աղյ.} + 13/2 O_2^- \rightarrow 4 CO_2 + 5 H_2O + 13/2 e^-$ 4) $C_4H_{10} \text{ աղյ.} + 13 O_2^{2-} \rightarrow 4 CO_2 + 5 H_2O + 26 e^-$
Պրոպան (C_3H_8)	1) $C_3H_8 \text{ գազ} \leftrightarrow C_3H_8 \text{ աղյ.}$ 2) $C_3H_8 \text{ աղյ.} + 10 O_2^- \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O + 10 e^-$ 3) $C_3H_8 \text{ աղյ.} + 5 O_2^- \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O + 5 e^-$ 4) $C_3H_8 \text{ աղյ.} + 10 O_2^{2-} \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O + 20 e^-$
Մեթան (CH_4)	1) $CH_4 \text{ գազ} \leftrightarrow CH_4 \text{ աղյ.}$ 2) $CH_4 \text{ աղյ.} + 4 O_2^- \rightarrow CO_2 + 2 H_2O + 4 e^-$
Ածխածնի մոնօքսիդ (CO)	1) $CO \text{ գազ} \leftrightarrow CO \text{ աղյ.}$ 2) $CO \text{ աղյ.} + O_2^- \rightarrow CO_2 + e^-$ 3) $2 CO \text{ աղյ.} + O_2^- \rightarrow 2 CO_2 + e^-$
Ալկոհոլ (CH_3CH_2OH)	1) $CH_3CH_2OH \text{ գազ} \leftrightarrow CH_3CH_2OH \text{ աղյ.}$ 2) $CH_3CH_2OH \text{ աղյ.} + O_2^{2-} \rightarrow CH_3CHO + H_2O + 2 e^-$ 3) $CH_3CH_2OH \text{ աղյ.} + 6 O_2^- \rightarrow 2 CO_2 + 3 H_2O + 6 e^-$
Ացետոն (CH_3COCH_3)	1) $CH_3COCH_3 \text{ գազ} \leftrightarrow CH_3COCH_3 \text{ աղյ.}$ 2) $CH_3COCH_3 \text{ աղյ.} + O_2^- \rightarrow CH_3COC + H_2 + OH^- + e^-$ 3) $CH_3COCH_3 \text{ աղյ.} + 2 O_2^- \rightarrow C + H_3 + CO_2 + CH_3O^- + 2 e^-$
Ամոնիակ (NH_3)	1) $NH_3 \text{ գազ} \leftrightarrow NH_3 \text{ աղյ.}$ 2) $2 NH_3 \text{ աղյ.} + 3 O_2^- \rightarrow N_2 + 3 H_2O + 3 e^-$ 3) $4 NH_3 \text{ աղյ.} + 3 O_2^{2-} \rightarrow 2 N_2 + 6 H_2O + 6 e^-$
Ծծմբի երկօքսիդ (SO_2)	1) $SO_2 \text{ գազ} \leftrightarrow SO_2 \text{ աղյ.}$ 2) $SO_2 \text{ աղյ.} + O_2^- \rightarrow SO_4 + e^-$
Օքսիդացնող գազեր	Քիմիական ռեակցիաներ
Ածխածնի երկօքսիդ (CO_2)	1) $CO_2 \text{ գազ} \leftrightarrow CO_2 \text{ աղյ.}$ 2) $2 CO_2 \text{ աղյ.} + 2 O_2^{2-} \rightarrow 2 CO_3^{2-} + O_2^-$
Ջրածնի պերօքսիդ (H_2O_2)	1) $H_2O_2 \text{ գազ} \leftrightarrow H_2O_2 \text{ աղյ.}$ 2) $2 H_2O_2 \text{ աղյ.} \rightarrow 2 H_2O + O_2$ 3) $O_2 + e^- \rightarrow O_2^-$
Ազոտի երկօքսիդ (NO_2)	1) $NO_2 \text{ գազ} \leftrightarrow NO_2 \text{ աղյ.}$ 2) $NO_2 \text{ աղյ.} + e^- \rightarrow NO_2^-$ 3) $NO_2 \text{ աղյ.} + O_2^{2-} + 2 e^- \rightarrow NO_2^- + 2 O_2^-$

Այս դեպքում օդում և թիրախային գազի առկայությամբ կիսահաղորդչի դիմադրությունների հարաբերությունն անվանում ենք սենսորի գազագայնություն, որին արդեն անդրադարձել ենք: Աղյուսակ 8-ում ներկայացված են կիսահաղորդչի մակերևույթին տեղի ունեցող մի շարք հայտնի վերականգնող և օքսիդացնող գազերի ռեակցիաները, որոնց հետևանքով փոխվում է զգայուն շերտի դիմադրությունը [1, 33-36]: Ինչպես տեսնում ենք, վերականգնող գազերի դեպքում ռեակցիաների հետևանքով ի վերջո առաջանում են ազատ էլեկտրոններ (կիսահաղորդչի դիմադրությունը նվազում է), իսկ օքսիդացնող գազերի դեպքում կիսահաղորդչի մակերևույթին ավելանում է թթվածնի տեղայնացված բացասական իոնների թիվը (կիսահաղորդչի դիմադրությունը մեծանում է):

Ընդհանրապես թիրախային գազի աղտորեցիան լինում է երկու տեսակ՝ ֆիզտորեցիա և քիմտորեցիա: Ցածր ջերմաստիճաններում ($< 100^{\circ}\text{C}$) կիսահաղորդչի մակերևույթին հասած թիրախային գազի մոլեկուլներն ակտիվ մակերևույթին կաչում են վանդերվալսայան թույլ կապերով՝ առանց էլեկտրոններ փոխանակելու (քիմիական ռեակցիաներ տեղի չեն ունենում): Սա անվանում են գազի ֆիզտորեցիա, որի դեպքում կիսահաղորդչի հաղորդականության փոփոխություն չի դիտվում: Բարձր ջերմաստիճաններում ($> 100^{\circ}\text{C}$), երբ այն բավականացնում է քիմիական ռեակցիաների ակտիվացիայի էներգիաներին հասնելու համար, ակտիվ մակերևույթին հասած մոլեկուլները ռեակցիայի մեջ են մտնում կիսահաղորդչի հետ՝ ցանցին տալով կամ ցանցից վերցնելով էլեկտրոններ: Այս երևույթն անվանում են գազի քիմտորեցիա, որի դեպքում կիսահաղորդչի դիմադրության փոփոխությունն անխուսափելի է: Ահա սա է ռեզիստիվ սենսորների՝ բարձր ջերմաստիճանում աշխատելու հիմնական պատճառը: Բարձր աշխատանքային ջերմաստիճանն ապահովում է նաև քիմիական ռեակցիաների բարձր արագությունը, այսինքն՝ սենսորի արագագործությունը, ինչպես նաև սեփական անցումների շնորհիվ նվազեցնում է մետաղօքսիդի դիմադրությունը՝ դարձնելով այն չափե-

§ 4.2. ԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ

Ինչպես արդեն նշել ենք, կիսահաղորդչային գազային սենսորներին զգայուն տարրը բաղկացած է բյուրեղիկներից՝ նանոչափի մեծությամբ հատիկներից (այն բազմաբյուրեղային է): Կիսահաղորդչային գազային սենսորի ամենատարածված աշխատանքային մոդելը միջհատիկային տիրույթներում պոտենցիալ արգելքի փոփոխման մոդելն է [37, 38]: Այս մոդելի շրջանակներում համարվում է, որ գազազգայուն տարրը բաղկացած է մետաղօքսիդային փոքրիկ (նանոչափերի) հատիկների ցանցից, որոնք անմիջականորեն հպված են միմյանց կամ միացված են իրար, այսպես կոչված վզիկներով: Այս մոդելը կարելի է պայմանականորեն բաժանել երկու մասի՝ ֆիզիկական մոդել (Նկ. 6. ա) և գոտիական մոդել (Նկ. 6. բ) [39]:



Նկ. 6. Կիսահաղորդչային գազային սենսորի զգայնության ֆիզիկական և գոտիական մոդելները

Հայտնի է, որ կիսահաղորդչային ռեզիստիվ սենսորների աշխատանքը բնութագրվում է երկու հիմնական գործառնություններով՝ ընդուն-

ման և փոխակերպման: Գազի ընդունման գործառույթը պատասխանատու է կիսահաղորդչի ակտիվ մակերևույթին քիրախային գազի մոլեկուլների կլամման և փոխազդեցության համար, մինչդեռ երկրորդ գործառույթը որոշում է այն գործընթացի արդյունավետությունը, որի հետևանքով քիմիական ռեակցիաների արդյունքը փոխակերպվում է էլեկտրական ազդանշանի: Այս գործառույթի արդյունավետությունը մեծապես կախված է գազազգայուն մատրիցի կառուցվածքից:

Ընդհանրապես, ըստ կառուցվածքային առանձնահատկությունների, առանձնացվում է գազազգայուն տարրերի 5 տեսակ՝ ամորֆ, ապակենման, նանոբյուրեղային, բազմաբյուրեղային և միաբյուրեղային: Սրանցից յուրաքանչյուրն ունի իր առավելություններն ու բերությունները, և, կախված սենսորի կիրառության ոլորտից, պատրաստման տեխնոլոգիական առանձնահատկություններից, ինչպես նաև ինքնարժեքից, կարելի է ընտրել այս կամ այն տեսակը: Ամորֆ նյութերն օժտված չեն քիմիական ու մեխանիկական բավարար կայունությամբ և ժամանակի ընթացքում հեշտությամբ փոխում են իրենց հատկությունները: Ապակենման նյութերը, չնայած բավարար կայունությանը, ունեն ցածր քիմիական ռեակտիվություն և սովորաբար բնութագրվում են շատ թույլ զգայնությամբ: Միաբյուրեղային նյութերը բավականին ամուր են, ունեն ժամանակային կայունություն և կանխատեսելի վարքագիծ, սակայն բավականին թանկ են և այս ոլորտում գործնականում չեն կիրառվում: Կիսահաղորդչային գազային սենսորներում առավելապես կիրառվում են նանոբյուրեղային և բազմաբյուրեղային կառուցվածքները՝ պայմանավորված դրանց ցածր ինքնարժեքով, էլեկտրաքիմիական պարամետրերի կայունությամբ, քիմիական ռեակտիվությամբ, էլաստիկությամբ, արդյունավետ մեծ մակերեսով և ստացման պարզ տեխնոլոգիայով: Սակայն այս երկու կառուցվածքներից, համեմայնդեպս վերջին տասնամյակներում, նախապատվությունը տրվում է նանոբյուրեղային նյութերին, քանի որ դրանք ավելի զգայուն և արագագործ համակարգեր են: Նանոբյուրեղային կառուցվածքները բաղկացած են փոքր բյուրեղիկներից՝ նանոհատիկներից, որոնց չափսերից, ձևից, բյուրեղային

կողմնորոշման ուղղություններից և դասավորվածությունից են կախված սենսորի բնութագրերը: Նշված բնութագրերը հիմնականում որոշվում են կիսահաղորդչային թաղանթի ստացման տեխնոլոգիական եղանակով և ռեժիմներով:

Աղյուսակ 9

Գազագալյուն թաղանթների սրացման եղանակները

Ֆիզիկական նստեցում	Հեղուկ փուլից քիմիական նստեցում	Ավանդական գազաֆա- զային էպիտաքսիա
Ջերմային գոլորշիացում	Վանմային քիմիական նստեցում	Մետալօրգանական գազաֆազային էպիտաքսիա
Լազերային իմպուլսային նստեցում	Սոլ-գել նստեցում	Ցածր ճնշմամբ գազաֆազային էպիտաքսիա
Մոլեկուլյար փնջային էպիտաքսիա	Ցնտրիֆուգային նստեցում	Մթնոլորտային ճնշմամբ գազաֆազային էպիտաքսիա
Փոշեցրում (DC, RF)	Ընկղման եղանակով նստեցում	Պլազմային գազաֆազային էպիտաքսիա
Էլեկտրոնաճառագայթային փոշեցրում	Նախշակադալարային նստեցում	
	Շիթային պիրոլիզ	

Գոյություն ունեն գազագալյուն թաղանթների ստացման տարատեսակ մեթոդներ, որոնք կարելի է դասակարգել 3 հիմնական խմբերի՝ ֆիզիկական նստեցում, հեղուկ փուլից քիմիական նստեցում և ավանդական գազաֆազային էպիտաքսիա: Ընդհանուր առմամբ ավանդական գազաֆազային էպիտաքսիան ևս համարվում է նստեցման քիմիական եղանակ (Աղյուսակ 9) [40, 41]: Քիմիական նստեցման ժամանակ նյութի ձևավորումն իրականացվում է քիմիական ռեակցիաների միջոցով: Հեղուկ կամ գազային վիճակում գտնվող ելանյութը, որում պարունակվում են անհրաժեշտ գազագալյուն նյութի մոլեկուլներ կամ ատոմներ, քիմիական ռեակցիաների հետևանքով տրոհվում է. ցանկալի նյութը նստում է տակդիրի վրա, իսկ ավելորդ նյութերը հեռացվում են համակարգից: Այս դեպքում, կախված տեխնոլոգիական ռեժիմներից և նյութի տեսակից, տակդիրի վրա կարող է

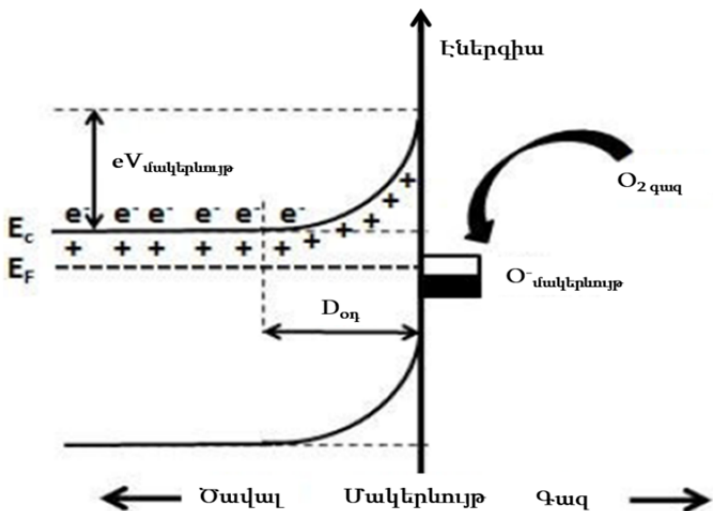
ձևավորվել ոչ թե հոծ թաղանթ, այլ նանոհատիկներից բաղկացած ծակոտկեն կառուցվածք: Ֆիզիկական նստեցման ժամանակ պրոցեսները չեն ուղեկցվում քիմիական ռեակցիաներով, այլ տեղի է ունենում նյութի ֆիզիկական տեղափոխություն: Լիցքավորված մասնիկները (ծանր իոններ) հարվածում են թիրախային նյութին, նրանից պոկում են նանոմասնիկներ, որոնք էլ վակուումային միջավայրում տեղափոխվում են՝ նստելով տակդիրի վրա: Այս դեպքում ևս ձևավորվող թաղանթը հիմնականում ունենում է հատիկային կառուցվածք: Փոխելով նստեցման պարամետրերը՝ կարելի է ստանալ ցանկալի հաստությամբ, հատիկների ցանկալի տրամագծով և կազմաբանությամբ կառուցվածքներ: Ահա այս կառուցվածքներից պատրաստված սենսորների համար կարելի է կիրառել այն ֆիզիկական մոդելը, որի դեպքում զգայուն տարրը կարելի է դիտարկել որպես նանոհատիկներից բաղկացած ցանց, որոնք հպված են միմյանց կամ կապված են փոքրիկ վզիկներով:

Ինչպես արդեն նշել ենք, հատիկների կամ վզիկների մոդելի կիրառումը կախված է զգայուն թաղանթների ստացման տեխնոլոգիական եղանակներից: Սովորաբար վզիկների ի հայտ գալն արդյունք է բարձրջերմաստիճանային թրծման ($T_{\text{թծ.}} > 700-800^{\circ}\text{C}$): Ենթադրվում է, որ վզիկների առաջացումը հետևանք է բարձր ջերմաստիճանում մեկ հատիկից մյուսը նյութի տեղափոխման: Որոշ դեպքերում բարձրջերմաստիճանային թրծումից հետո հատիկների չափսերը (d) համեմատական են վզիկների չափսերին (x) $0.8/0.1$ գործակցով (x/d) [28]: Այս հաստատումը կախված է սինթեզման պարամետրերից և կարող է տարբեր լինել: Հաստ թաղանթների և կերամիկական նյութերի դեպքում, որոնք սինթեզից հետո չեն ենթարկվում բարձրջերմաստիճանային թրծման, գազազգայուն մատրիցը ձևավորվում է առանձին հատիկներից: Այս դեպքում վզիկները բացակայում են կամ շատ կարճ են, ուստի կարող ենք կիրառել միայն հատիկային մոդելը: Համաձայն այս մոդելի՝ հատիկների միջև կան կրկնակի Շոտկիի արգելքներ, որոնց էներգետիկ բարձրությունը կախված է շրջակա միջավայրի բաղադրությունից (այստեղ օգտագործվող «Շոտկիի արգելք» տերմինը չպետք է նույնականացնել մետաղ-կիսահաղորդիչ

Շոտկիի անցման հետ): Հատիկային մոդելի շրջանակներում հիմնական պարամետրը, որով որոշվում է նաև ռեյոլոգիկական հատկությունը, հատիկների սահմանի տարածական լիցքն է կամ էներգիական գոտիների ծավալությունը:

§ 4.3. ԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ԳՈՏԻԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ

Գոտիական մոդելի կիրառումը հայտնի է արդեն երկար տարիներ և ամենատարածված եղանակներից է: Այս մոդելի շրջանակներում գազազգայուն տարրը ներկայացվում է մետաղօքսիդային հատիկներից բաղկացած պարզ շերտի տեսքով, և ազատ էլեկտրոնների տեղաշարժը մի հատիկից մյուսը իրականացվում է հիմնականում ջերմային էմիսիայի եղանակով (Նկ. 6): Հատիկների մակերևույթին մթնոլորտից ադսորբվում են թթվածնի ատոմներ և մոլեկուլներ, որոնք բարձր էլեկտրաբացասականության շնորհիվ կիսահաղորդից վերցնում են ազատ էլեկտրոններ՝ դառնալով տեղայնացված բացասական իոններ: Հատիկների մերձմակերևութային տիրույթներում ձևավորվում են էլեկտրոններից աղքատացված շերտեր, և տեղի է ունենում կիսահաղորդչի հաղորդականության և վալենտականության գոտիների ծռում: Այս դեպքում էլեկտրոնները մեկ հատիկի ծավալային տիրույթից մյուսին անցնելու համար պետք է հաղթահարեն առաջացած աղքատացված շերտի տիրույթները ($D_{\text{ող}}$) կամ պոտենցիալ արգելքները ($eV_{\text{մակերևույթ}}$) (Նկ. 7) [37, 42-44]:



Նկ. 7. Կիսահաղորդչի գոտիների ծռումը հատիկների մերձմակերևութային տիրույթում

Վերականգնող քիրախային գազը, հասնելով հատիկների մակերևույթին, ռեակցիայի մեջ է մտնում մակերևույթին ադսորբված թթվածնի տեղայնացված խոնների հետ, վերցնում դրանք՝ ցանցին վերադարձնելով նախապես վերցրած էլեկտրոնները: Դրա հետևանքով փոքրանում է հատիկի մերձմակերևութային տիրույթում աղքատացված շերտի հաստությունը կամ միջհատիկային տիրույթում ձևավորված պոտենցիալ արգելքի բարձրությունը (վերականգնող գազի դեպքում): Այս պարագայում հատիկից հատիկ էլեկտրոնների անցումը դառնում է ավելի դյուրին, այսինքն՝ բարձրանում է համակարգի հաղորդականությունը: Այսպիսով, կարելի է ասել, որ գոտիական մոդելի շրջանակներում հատիկների մերձմակերևութային տիրույթներում կիսահաղորդչի գոտիները ծռվում են, և առաջանում է կրկնակի Շոտկիի արգելք: Պոտենցիալ արգելքի բարձրությունը և աղքատացված շերտի հաստությունը կախված են մակերևութային լիցքից, որն էլ իր հերթին կախված է մակերևույթին ադսորբված թթվածնի խոնային վիճակից (O^- կամ O^{2-}) և քանակից: Հայտնի է, որ

կիսահաղորդիչներում աղբատացված շերտի հաստությունը որոշվում է Դեբայի էկրանավորման երկարությամբ, որն արտահայտվում է հետևյալ բանաձևով [45].

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon kT}{ne^2}}, \quad (5)$$

որտեղ k -ն Բոլցմանի հաստատունն է, T -ն՝ բացարձակ ջերմաստիճանը, ε -ը՝ կիսահաղորդչի դիէլեկտրական թափանցելիությունը, n -ը՝ ազատ լիցքակիրների կոնցենտրացիան, իսկ e -ն՝ էլեկտրոնի լիցքը:

Ինչպես արդեն նշել ենք, հատիկների չափսերի և ձևի ազդեցությունը սենսորի պարամետրերի վրա բավականին մեծ է: Պարզվում է, որ հատիկների չափսերը և վզիկների հաստությունները հիմնական պարամետրերն են, որոնք պատասխանատու են գազազգայնության համար: Սովորաբար հատիկների և վզիկների չափսերը (d և x) համեմատվում են Դեբայի էկրանավորման երկարության կամ մակերևութային տարածական լիցքի շերտի հաստության հետ [28].

$$L_S = L_D \sqrt{\frac{2eV_{fb}}{kT}}: \quad (6)$$

Հատիկների մեծ չափսերի ($d > 2L_S$) և վզիկների փոքր հաստության դեպքում ($x < L_S$) թաղանթի հաղորդականությունը սահմանափակվում է հատիկների սահմանին Շոտկիի արգելքներով: Այս դեպքում գազազգայնությունը գործնականում կախված չէ հատիկների չափսերից: Երբ $d \sim 2L_S$, հատիկների միջև յուրաքանչյուր հաղորդիչ վզիկ գրեթե ամբողջությամբ աղբատացված է լինում: Երբ գազազգայուն բազմաբյուրեղում երկար վզիկներն ավելի շատ են, քան միջհատիկային կոնտակտները (կարճ վզիկները), դրանք սկսում են կառավարել զգայուն նյութի հաղորդականությունը: Այս դեպքում չափային երևույթներում հիմնական դերը կատարում են վզիկները: Երբ $d < 2L_S$, յուրաքանչյուր հատիկ ամբողջությամբ աղբատացված է լինում, և հատիկների մերձմակերևութային սահմաններում Շոտկիի արգելքների բարձրությունը կտրուկ աճում է: Այս պայմաններում քիթախային գազը, քիմստրեֆելով մետաղօքսիդի մակերևութին, ռեակցիայի մեջ է մտնում նախապես ադսորբված թթվածնի տեղայնաց-

ված իոնների հետ՝ ցանցին վերադարձնելով էլեկտրոններ: Արդյունքում բացվում են միջհատիկային սահմանները՝ կտրուկ փոխելով մետաղօքսիդի դիմադրությունը: Երբ հատիկների չափսերը դառնում են համեմատելի $2L_D$ -ի հետ, աղքատացված շերտի հաստությունը մեծանում է՝ դառնալով հատիկի չափ: Այս դեպքում միշտ սպասվում է առավելագույն զգայնություն: Վերը նշված բոլոր դեպքերում համարում ենք, որ կիսահաղորդիչը գտնվում է թթվածնի միևնույն մասնակի ճնշման պայմաններում և միևնույն ջերմաստիճանում:

Հարկ է նշել, որ զգայնության կախվածությունը հատիկների չափսերից պայմանավորված է մետաղօքսիդի տիպով, գազի տեսակով և հայտնաբերման մեխանիզմով: Օրինակ՝ In_2O_3 -ի հիման վրա պատրաստված սենսորներում օքսիդացնող գազերի դեպքում հատիկների չափսերն ավելի փոքր դեր ունեն, քան վերականգնող գազերի դեպքում: Քանի որ գազազգայնության մեխանիզմը բավական բարդ է և կախված է բազմաթիվ գործոններից, կարող են ի հայտ գալ տարբեր վարքագծեր: Օրինակ՝ նստեցման որոշակի պայմանների դեպքում սենսորի արձագանքը վերականգնող գազերի նկատմամբ կարող է աճել կամ նվազել հատիկների չափսերի աճին զուգընթաց: In_2O_3 -ի հիման վրա պատրաստված սենսորի զգայնությունը վերականգնող գազերի նկատմամբ կարող է հասնել առավելագույնի, նույնիսկ երբ հատիկների չափսերը մեծ են 80-100 նմ-ից, մինչդեռ այս չափսերի դեպքում սենսորի զգայնությունն օքսիդացնող գազերի նկատմամբ նվազագույնն է: SnO_2 -ի դեպքում հատիկների չափսերի աճի ժամանակ սենսորի զգայնությունը նվազում է և՛ օքսիդային, և՛ վերականգնող գազերի նկատմամբ: Ենթադրվում է, որ In_2O_3 -ի դիմադրությունը վերականգնող գազերի միջավայրում մակերևութային ստեխիոմետրիայի խախտման բարձր աստիճանի պատճառով չի կառավարվում միջհատիկային արգելքներով [46]:

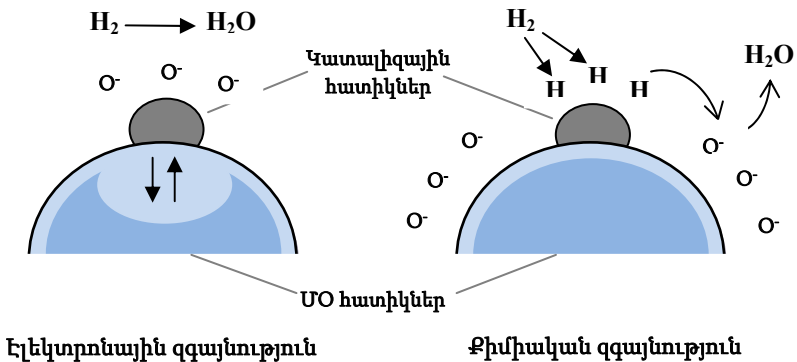
Զգայնության բարելավման լավագույն եղանակը հատիկների չափսերի փոքրացումն է, որը, սակայն, չի կարող անսահմանափակ լինել: Որոշակի կրիտիկական չափսերի դեպքում հատիկներում ազատ էլեկտրոնների թիվը կարող է դառնալ զրո, նույնիսկ երբ $V_s \approx 0$: Սա նշանակում է, որ հատիկների դիմադրությունը գրեթե կախված չի

լինի շրջակա միջավայրի օդի բաղադրության փոփոխություններից: Խոր լեզիրացված մետաղօքսիդներում, որտեղ ազատ լիցքակիրների կոնցենտրացիան 10^{21} սմ⁻³ է, հատիկների կրիտիկական չափսը 1 նմ է [28, 47]: Շատ փոքր հատիկների օգտագործումը կարող է նվազեցնել նաև սենսորի ժամանակային կայունությունը: Հատիկների չափսերի՝ չափից շատ փոքրացումն ուղեկցվում է նաև սենսորի կառուցվածքային անկայունությունների առաջացմամբ: Այս դեպքում փոխվում են նյութի և՛ մակերևութային և՛ կատալիզային հատկությունները [48]: Սովորաբար փոքր հատիկների դեպքում սենսորի կայունությունը նվազում է: Պատճառն այն է, որ փոքր հատիկները ժամանակի ընթացքում կարող են միավորվել՝ առաջացնելով էական կառուցվածքային փոփոխություններ գազազգայուն նյութում: Հատիկների միավորումը կամ, այսպես կոչված, չափսերի աճը կարող է սկսվել նաև ջերմային մշակման ժամանակ: Պարզվում է, որ ջերմային մշակման ժամանակ հատիկների չափսերի աճը կարող է սկսվել երկու պատճառներով: Այն կարող է տեղի ունենալ ծավալում գտնվող արատների, այսինքն՝ ստեխիոմետրիայի խախտման կամ հատիկների չափսերի սահմանափակ լինելու (թաղանթի հատիկայնության) պատճառով: Հատիկների չափսերի և օքսիդում թթվածնի քանակության մեծացումը բարելավում է հատիկների կայունությունը: Այն փաստը, որ հատիկների չափսերը մեծ ազդեցություն ունեն բարակ մետաղական և մետաղօքսիդային թաղանթների հալման ջերմաստիճանի վրա, ևս մեկ անգամ հաստատում է վերը թվարկված պնդումները: Հատիկների չափսերի փոքրացումը հանգեցնում է նաև խոնավության նկատմամբ սենսորի զգայնության մեծացման [49]:

§ 4.4. ԿԱՏԱԼԻԶԱՅԻՆ ՀԱՏԻԿՆԵՐԻ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ

Հայտնի է, որ մաքուր մետաղօքսիդներն օժտված են գազազգայնության բավականին թույլ հատկություններով: Հիմնական մետաղօքսիդ, բացի մետաղօքսիդային խառնուրդներից, ներմուծվում են (ֆիզիկական կամ հեղուկ փուլից քիմիական մատեցման եղանակներով, Աղյուսակ 9) նաև ազնիվ մետաղներից (Pt, Pd, Ag, Au) նախ-

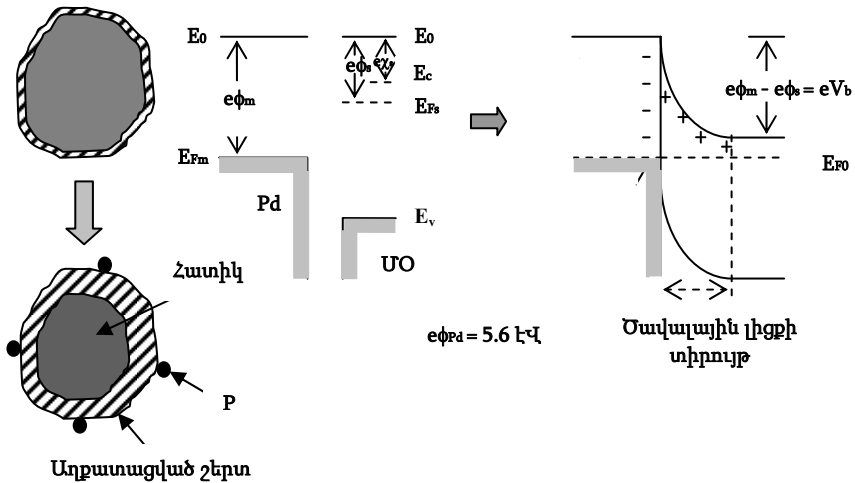
հատիկներ, որոնք կտրուկ բարելավում են սենսորի զգայնությունը, ընտրողունակությունը և արագագործությունը [50]: Այս տիպի մասնիկների ներմուծումն իրականացվում է կա՛մ ամբողջ նյութում՝ որպես համասեռ խառնուրդ, կա՛մ դրանք նստեցվում են միայն զգայուն շերտի ակտիվ մակերևույթին առանձին կոդակների տեսքով: Մետաղական այս հատիկները, որոնք անվանվում են կատալիզային մասնիկներ, ոչ միայն բարելավում են վերը նշված պարամետրերը, այլ նաև իջեցնում են սենսորի աշխատանքային ջերմաստիճանը, ինչը հանգեցնում է սպառման հզորության փոքրացման: Սենսորի գազազգայնության պարամետրերի վրա մեծապես ազդում են կատալիզային հատիկների նյութի տեսակը, չափսերը, բաշխվածությունը և նույնիսկ ձևը:



Նկ. 8. Մետաղօքսիդի (ՄՕ) մակերևույթին կատալիզային հատիկների առկայությամբ գազազգայնության բարելավման մեխանիզմները

Կարելի է պայմանականորեն առանձնացնել զգայուն տարրի մակերևույթին կատալիզային հատիկների երկու՝ զգայնության պարամետրերի բարելավման էլեկտրոնային և քիմիական գործառույթներ (electronic and chemical sensitization) (Նկ. 8) [51]:

Էլեկտրոնային գործառույթի դեպքում համակարգը դիտարկվում է որպես սովորական մետաղ-կիսահաղորդիչ անցում: Ակնհայտ է, որ գազագազայնությունն էականորեն կմեծանա այն դեպքում, երբ կիսահաղորդչի մակերևույթին մեծացնենք թթվածնի խոնների քանակը (մակերևույթին ադսորբված թթվածնի չեզոք ատոմներից ոչ բոլորն են փոխակերպվում խոնների): Այն կարելի է մեծացնել մետաղօքսիդի մակերևույթին տվյալ կիսահաղորդչի ելքի աշխատանքից մեծ ելքի աշխատանքով մետաղական կոդյակներ ստեղծելու միջոցով: Քանի որ ազնիվ մետաղները հիմնականում ունեն ավելի մեծ ելքի աշխատանք, քան թույլ լեգիրացված ծավալային կիսահաղորդիչները (սենյակային ջերմաստիճանից մինչև 400°C տիրություն), հետևաբար էլեկտրոնային գազայնության բարելավման տեսանկյունից դրանց օգտագործումն արդարացված է:



Նկ. 9. Մետաղ-կիսահաղորդիչ անցման գործիական կառուցվածքը

Նկար 9-ում ներկայացված են պալադիումի (այն լավագույն կատալիզային մետաղներից մեկն է) և կիսահաղորդչային բազմաբյուրեղային մետաղօքսիդի (դիտարկվել է թույլ լեգիրացված In_2O_3 -ը, որի ելքի աշխատանքը 5 էՎ է) գոտիական կառուցվածքները: Այս-

տեղ E_0 -ն վակուումի էներգիական մակարդակն է, E_c -ն՝ կիսահաղորդչի հաղորդականության գոտու հատակին համապատասխանող էներգիան, ϕ_m -ը և ϕ_s -ը՝ համապատասխանաբար մետաղի և կիսահաղորդչի ելքի աշխատանքները, E_{Fm} -ը և E_{Fs} -ը՝ համապատասխանաբար մետաղի և կիսահաղորդչի Ֆերմի մակարդակները, E_{F0} -ն՝ համակարգի Ֆերմի մակարդակը հավասարակշռության վիճակում, χ_s -ը՝ էլեկտրոնի նկատմամբ կիսահաղորդչի խնամակցության էներգիան, իսկ V_b -ն՝ մետաղ-կիսահաղորդիչ անցման պոտենցիալ արգելքի բարձրությունը: Համակարգը դիտարկվում է 250°C -ում, որն ընկած է սենսորի աշխատանքային ջերմաստիճանների միջակայքում (50°C - 350°C): Պալադիումի ելքի աշխատանքը 250°C -ում 5.6 էՎ-ի կարգի է: Այս դեպքում ելքի աշխատանքների տարբերությունը՝ $V_k = 0.6$ Վ և դրա հաշվին տեղի է ունենում էլեկտրոնների անցում կիսահաղորդչից դեպի մետաղ: Այս պարագայում կիսահաղորդչային հատիկը (բյուրեղիկը) ամբողջությամբ կամ մասամբ կլինի լիցքակիրներից աղքատացած: Այսպիսով, մետաղական հատիկները նպաստում են էլեկտրոնների ելքին կիսահաղորդչի ծավալից դեպի մետաղ, ինչը հանգեցնում է մի կողմից կիսահաղորդչում գործնականում ամբողջությամբ աղքատացված շերտի ձևավորմանը, իսկ մյուս կողմից՝ կիսահաղորդչային թաղանթի մակերևութին աղտորված թթվածնի չեզոք ատոմների ավելի արդյունավետ փոխակերպմանը իոնների: Դա էլ իր հերթին պետք է հանգեցնի քիմիական ռեակցիաների ավելի արդյունավետ ընթանալուն, վերականգնող գազերի դեպքում n տիպի կիսահաղորդչի հաղորդականության գոտի ներմուծվող էլեկտրոնների թվի մեծացմանը և հետևաբար կիսահաղորդչի դիմադրության ավելի մեծ փոփոխությանը, ինչը, վերջին հաշվով, նշանակում է սենսորի զգայնության մեծացում: Դիտարկված բոլոր դեպքերում կիսահաղորդչի մակերևութային վիճակների առկայությունը անտեսում ենք [52]:

Գազագզայնության բարելավման քիմիական գործառնությունը պայմանավորված է ազնիվ մետաղների կատալիզային առանձնահատկություններով: Բանն այն է, որ մետաղօքսիդի մակերևութին ալյալիսի փոքրիկ հատիկները (1 - 10 նմ) իրենց շուրջը ստեղծում են յուրա-

հատուկ կատալիզային ակտիվ տիրույթներ (spillover zone), որտեղ հասած քիրախային գազի մոլեկուլները հեշտությամբ տրոհվում են և այնուհետև ռեակցիայի մեջ մտնում մետաղօքսիդի մակերևութին ադսորբված թթվածնի տեղայնացված խոնների հետ (Նկ. 8): Դրա հետևանքով կիսահաղորդիչ-գազ քիմիական ռեակցիաներն ավելի հեշտ են ընթանում, դրանց ակտիվացիայի համար պահանջվում է ավելի քիչ էներգիա, ինչը հանգեցնում է աշխատանքային ջերմաստիճանի էական նվազման: Կատալիզային ակտիվ տիրույթում քիմիական ռեակցիաներն ընթանում են նաև ավելի արագ, ինչն էլ հանգեցնում է արագագործության էական բարելավման: Այսպիսով, կարելի է ասել, որ կատալիզային մասնիկների էլեկտրոնային գործառնությունը հիմնականում պատասխանատու է գազագալանության, իսկ քիմիականը՝ արագագործության և աշխատանքային ջերմաստիճանի համար: Հարկ է նշել, որ շատ դեպքերում, եթե կատալիզային մասնիկները հանդես են գալիս որպես խառնուրդ կիսահաղորդչի ամբողջ ծավալով՝ փոխելով դրանց քանակությունը և տեսակը, կարելի է նաև բարելավել սենսորի ընտրողունակությունը [53, 54]:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. **D. Kohl.** J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 34, 2001, pp. R125-R149.
2. **I. Simon, N. Barsan, M. Bauer and U. Weimar.** Sensors and Actuators B, Vol. 73, 2001, pp. 1-26:
3. **S. Capone, A. Forleo, L. Francioso, R. Rella, P. Siciliano, J. Spadavecchia, D. S. Presicce and A. M. Taurino.** Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 5, 2003, pp. 1335-1348.
4. **V. M. Aroutiounian, V. M. Arakelyan, E. A. Khachaturyan, G. E. Shahnazaryan, M. S. Aleksanyan, L. Forro, A. Margez, K. Hernadi, Z. Nemeth.** Sensors and Actuators B, Vol. 173, 2012, pp. 890-896.
5. **V. M. Aroutiounian, V. M. Arakelyan, M. S. Aleksanyan, G. E. Shahnazaryan, A. G. Sayunts and B. Joost.** Sensors & Transducers, Vol. 229, 2019, pp. 24-31.
6. **V. Brinzari, G. Korotcenkov and V. Golovanov.** Thin Solid Films, Vol. 391, 2001, pp. 167-175.
7. **V. Aroutiounian, V. Arakelyan, M. Aleksanyan, G. Shahnazaryan, P. Kacer, P. Picha, J. Kovarik, J. Pekarek, B. Joost.** Journal of Sensors and Sensor Systems, Vol. 7, 2018, pp. 281-288.
8. **P. L. Sung.** Sensors, Vol. 17, 2017, pp. 683-702.
9. **M. J. Toohey.** Sensors and Actuators B, Vol. 105, 2005, pp. 232-250.
10. **G. Korotcenkov.** Materials Science and Engineering B, Vol. 139, 2007, pp. 1-23.
11. **O. V. Krilov, V. F. Kisilev.** Adsorption and Catalysis on the Transition Metals and their Oxides. Chemistry, Moscow, 1981.
12. **M. Calatayud, A. Markovits, M. Menetrey, B. Minot.** Catal. Today, Vol. 85, 2003, pp. 125-143.
13. **M. S. Aleksanyan.** Armenian Journal of Physics, Vol. 12, 2019, pp. 62-77.
14. **D. Zappa, V. Galstyan, N. Kaur, M. M. Arachchige, O. Sisman, E. Comin.** Analitica Chimica Acta, Vol. 1039, 2018, pp. 1-23.

15. **X. Gao, T. Zhang.** Sensors and Actuators B, Vol. 277, 2018, pp. 604-633.
16. **J. M. Walker, S. A. Akbar, P. A. Morris.** Sensors and Actuators B, Vol. 286, 2019, pp. 624-640.
17. **K. Ihokura, I. Watson.** CRC Press, Boca Raton, 1994.
18. **A. Srivastava, K. Jain, Rashmi, A. K. Srivastava and S. T. Lakshmikummar.** Materials Chemistry and Physics, Vol. 97, 2006, pp. 85-90.
19. **Z. Xiao, L. B. Kong, S. Ruan, X. Li, S. Yu, X. Li, Y. Jiang, Z. Yao, S. Ye, C. Wang, T. Zhang, K. Zhou, S. Li.** Sensors and Actuators B, Vol. 274, 2018, pp. 235-267.
20. **S. W. Lee, W. Lee, Y. Hong, G. Lee, D. S. Yoon.** Sensors and Actuators B, Vol. 255, 2018, pp. 1788-1804.
21. **E. Llobet.** Sensors and Actuators B, Vol. 179, 2013, pp. 32-45.
22. **A. Ylinampa, V. Lantto and S. Leppavuori.** Sensors and Actuators B, Vol. 14, 1993, pp. 602-604.
23. **S. Capone, P. Siciliano, F. Quaranta, R. Rella, M. Epifani and L. Vasanelli.** Sensors and Actuators B, Vol. 77, 2001, pp. 503-511.
24. **P. Holmes, R. Loasby.** Handbook of Thick Film Technology; Electrochemical Pub.: Glasgow, UK, 1976.
25. **Y. Shimizu, M. Egashira.** MRS Bull., Vol. 24, 1999, p. 18.
26. **C. Xu, T. Jun, N. Umazoe.** Chem. Lett., Vol. 3, 1990, p. 441.
27. **J. Fraden.** Handbook of Modern Sensors, Springer International Publishing Switzerland, 2016, p. 765.
28. **G. Korotcenkov.** Materials Science and Engineering R, Vol. 61, 2008, pp. 1-39.
29. **Fis** (gas sensor company). Gas Sensor Catalogue and Technical Information (Fis, Inc.), 2000, <http://www.fisinc.co.jp>.
30. **G. Neri.** Chemosensors, Vol. 3, 2015, pp. 1-20.
31. **W. Gopel.** Surf. Sci., Vol. 62, 1977, p. 165.
32. **S. R. Morrison.** Sensors and Actuators, Vol. 12, 1987, p. 425.
33. **V. R. Shinde, T. P. Gujar and D. Lokhande.** Sensors and Actuators B, Vol. 120, 2007, p. 51.

34. **Z. Qin, Y. Liu, W. Chen, P. Ai, Y. Wu, S. Li, D. Yu.** Chemical Physics Letters, Vol. 646, 2016, pp. 12-17.
35. **Y. Wu, H. Zhang, Y. Liu, W. Chen, J. Ma, S. Li, Z. Qin.** Sensors, Vol. 15, 2015, p. 1423.
36. **J. K. Srivastava, P. Pandey, V. N. Mishra and R. Dwivedi.** Solid State Sciences, Vol. 11, 2009, pp. 1602-1605.
37. **N. Barsan, U. Weimar.** J. Electroceram, Vol. 7, 2001, pp. 143-167.
38. **M. J. Madou, S. R. Morrison.** Chemical Sensing with Solid State Devices, Academic Press, Inc./Harcourt Brace Jovanovich Publ., Boston, NY, 1987.
39. **G. Korotcenkov, B. K. Cho.** Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, Vol. 58, 2012, pp. 167-208.
40. **K. O. Ukoba et al.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, 2018, pp. 2900-2915:
41. **Կ. Մ. Ղամբարյան,** Կիսահաղորդչային էպիտաքսիալ թաղանթների աճեցման տեխնոլոգիական մեթոդները, Երևան, ԵՊՀ հրատարակչություն, 2008, 44 էջ:
42. **C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang and R. Gao.** Sensors, Vol. 10, 2010, pp. 2088-2106.
43. **Վ. Լ. Բոնչ-Բրուսիչ, Ս. Գ. Կալաշնիկով,** Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա, Երևան, 1988, 784 էջ:
44. **Ջ. Վ. Գասպարյան,** Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա և պինդարմնային էլեկտրոնիկայի հիմունքներ, Երևան, ԵՊՀ հրատարակչություն, 2011, 388 էջ:
45. **N. Barsan, M. Schweizer-Belberich, W. Gopel, Fresenius.** J. Anal. Chem., Vol. 365, 1999, pp. 287-304.
46. **C. Xu, J. Tamaki, N. Miura, N. Yamazoe.** Sensors and Actuators B, Vol. 3, 1991, pp. 147-155.
47. **K. D. Schierbaum, W. Weimar.** Sensors and Actuators B, Vol. 7, 1992, pp. 709-716.
48. **G. Korotcenkov, V. Brinzari, M. Ivanov, A. Cerneavski, J. Rodriguez, A. Cirera, A. Cornet, J. Morante.** Thin Solid Films, Vol. 479, 2005, pp. 38-51.

49. **L. S. Palatnik, M. I. Fuks, V. M. Kosevich.** Mechanism of Formation and Substructure of Condensed Films, Nauka, Moscow, 1972, pp. 319 (in Russian).
50. **G. G. Mandayo.** Sensor Letters, Vol. 5, 2007, pp. 341-360.
51. **N. Yamazoe, G. Sakai, K. Shimanoe.** Catal. Surv. Asia, Vol. 7, 2003, p. 63.
52. **M. S. Aleksanyan, V. M. Arakelyan, V. M. Aroutiounian, A. Z. Adamyan and G. E. Shahnazaryan.** Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), Vol. 45, 2010, pp. 291-296.
53. **G. Korotcenkov, V. Brinzari, Y. Boris, M. Ivanov, J. Schwank and J. Morante.** Thin Solid Films, Vol. 436, 2003, pp. 119-126.
54. **M. S. Aleksanyan, V. M. Arakelyan, V. M. Aroutiounian, G. E. Shahnazaryan.** Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), Vol. 46, 2011, pp. 86-92.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ԳԼՈՒԽ I

§ 1.1. ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ.....3

§ 1.2. ԳԱԶԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ ՏԵՍԱԿՆԵՐԸ.....5

ԳԼՈՒԽ II

§ 2.1. ՌԵԶԻՍՏԻՎ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԸ.....7

§ 2.2. ԳԱԶԱԶԳԱՅՈՒՆ ՆՅՈՒԹԵՐ8

§ 2.3. ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ԷԼԵԿՏՐՈՂՆԵՐ14

ԳԼՈՒԽ III

ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ԳԱԶԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ

ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԸ.....18

§ 3.1. ՍԵՆՍՈՐԻ ԱՐՁԱԳԱՆՔՄԱՆ ԿՈՐԸ18

§ 3.2. ԶԳԱՅՆՈՒԹՅՈՒՆ.....20

§ 3.3. ԸՆՏՐՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆ21

§ 3.4. ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆ24

§ 3.5. ԱՐՁԱԳԱՆՔՄԱՆ ԵՎ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ
ԺԱՄԱՆԱԿՆԵՐ.....26

ԳԼՈՒԽ IV

ՔԻՄՈՐԵԶԻՍՏԻՎ ՍԵՆՍՈՐԻ ԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ

ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԸ30

§ 4.1. ՔԻՄԻԱԿԱՆ ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐԻ ԴԵՐԸ.....30

§ 4.2. ԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՍՈԴԵԼԸ34

§ 4.3. ԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ԳՈՏԻԱԿԱՆ ՍՈԴԵԼԸ38

§ 4.4. ԿԱՏԱԼԻԶԱՅԻՆ ՀԱՏԻԿՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ42

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ47

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՄԻՔԱՅԵԼ ՍԵՐՅՈՒԱՅԻ ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ

**ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ
ԳԱՁԱՅԻՆ ՍԵՆՍՈՐՆԵՐԻ
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ**

ՈՒՍՈՒՄՆԱՄԵԹՈԴԱԿԱՆ ՉԵՌՆԱՐԿ

Համակարգչային ձևափորմը՝ Կ. Չալաբյանի
Հրատ. խմբագրումը՝ Մ. Կեսոյանի

Ստորագրված է տպագրության՝ 07.05.2020:
Չափսը՝ 60x84 ¹/₁₆: Տպ. մամուլը՝ 3.25:
Տպաքանակը՝ 150:

ԵՊՀ հրատարակչություն
Ք. Երևան, 0025, Ալեք Մանուկյան 1
www.publishing.am