

ՀՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱ  
ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

**ԷԼ ԲԱԿՅԱՆ ԷԼ ԲԱԿ ԵՂԻՉԵԻ**

**ԳԱԼԻՈՒՄԻ ԵՎ ԼԻԹՈՒՄԻ ԻԱՌՆՈՒՐԴՆԵՐՈՎ ԲԱՐԱԿ ZnO ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ  
ԵՎ ՆՐԱՆՑ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ՀԵՏԵՐՈԿԱՌՈՒ ՑՎԱՃՔՆԵՐԻ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԵՎ  
ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Աստե՛ն ախոս ու լ թյ ու լ ն

Ա.04.05 – Օպտիկա մասնագիտող լ թյ ամբ

Ֆիզիկա ամաթե մատիկական գիտող լ թյ ու լ ն երի թեկնածու ի  
գիտական աստիճանի հայցման համար

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թ. Ռ. Կ.

Հովսեփյան

ԱՇՏԱՐԱԿ – 2016

**ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ**

**ՆԵՐԱՃՈՒ ԹՅՈՒՆ.....**  
....4

**ԳԼՈՒԽ 1. ՑԻՆԿԻ ՕՔՍԻԴԻ (ZnO) ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒ ԹՅՈՒՆԸ  
ԹԱՓԱՆՑԻԿ ԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱՅԻ**

**ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒ ՄԼԵՐՈՒ Մ.....9**

- §1.1. ZnO թաղանթների հիմնական հատկությունները .....9
- §1.2. Թախանցիկ հաղորդիչ օքսիդ-թաղանթների ստացման ֆիզիկական եղանակները ..... 11
- §1.3. Թախանցիկ ZnO հաղորդիչ թաղանթների կառուցվածքները ..... 14
- §1.4. Թախանցիկ հաղորդիչ օքսիդ (TCO) թաղանթների էլեկտրահաղորդականությունը և ֆոտոհաղորդականությունը ..... 18
- §1.5. ZnO թաղանթների հիման վրա մշակված մեմբրանային սարք .....26

**ԳԼՈՒԽ 2. Li-ՈՎ ԵՎ Ga-ՈՎ ԼԵԳԻՐՎԱԾ ZnO ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ  
ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱՆ**

**ՀԱՏԿՈՒ ԹՅՈՒՆՆԵՐԸ.....31**

- §2.1. ZnO թաղանթների ստացման էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակի և ջերմամշակման նկարագրությունը .....31
- §2.2. Ալյցեպտորային (Li) և դոնորային (Ga) խառնուրդներով էգիրված ZnO թաղանթների ստացումը .....36
- §2.3. Թաղանթների բնութագրական հատկանիշների ուսումնասիրման եղանակները .....40
- §2.4. Ստացված ZnO թաղանթների կառուցվածքի ձևաբանությունը և հատկությունները ..... 46
- §2.5. Թաղանթների էլեկտրահաղորդականությունը և ֆոտոհաղորդականությունը .....5

**ԳԼՈՒԽ 3. ԼԱՅՆԱՇԵՐՏ ZnO ԿԻՍԱՅԱՂՈՐԴԻՉՆԵՐԻ ԿՐԱ ՀԻՄՆԿԱԾ  
ԳՐԱՆՈՒԼԱՑԿԱԾ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՂՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ  
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒ ԹՅՈՒՆԸ.....65**

§3.1. ZnO թաղանթների գրանուլացված  
կառուցվածքը.....65

§3.2. Թաղանթներու մ տեղային հոսանքի խտությունը չ ակտել ու համար  
մշակված նոր  
համակարգը.....69

§3.3. Ակցեպտորային (Li) և դոնորային (Ga) խառնուրդներով է գիրված  
ZnO գրանուլացված թաղանթների հաղորդականություն և  
ֆոտոհաղորդականություն  
ուսուլմնասիրություն նները.....  
....74

**ԳԼՈՒԽ 4. ԼԻԹՈՒՄՈՎ ԼԵԳԻՐՎԱԾ ZnO ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԶԻՄԱՆ ՎՐԱ  
ՄԵՄԻՍՏՈՐՆԵՐԻ ՆԱԿԳՈՒՄԸ ԵՎ  
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ.....82**

§4.1. Մեմրիստորային հիշողություն  
տարրերը.....82

§4.2. Li-ով է գիրված ZnO թաղանթների հիման վրա 1D1R տիպի  
հիշողություն տարրի  
նախագծումը.....83

§4.3. Li-ով է գիրված ZnO թաղանթների հիման վրա  
հետերոկառուցվածքային մեմրիստորների էլեկտրական  
հատկություն նների հետազոտություն նները.....85

**ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ.....90**

**ՇՆՈՐՅԱԿԱԼ ԱԿԱՆ ԽՈՍՔ.....92**

**ՀԱՊԱՎՈՒՄՆԵՐԻ ՑԱՆԿ.....93**

**ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ.....94**

## **ՆԵՐԱՃՈՒԹՅՈՒՆ**

### **Ատենախոսության արդիականությունը**

Ատենախոսությունը նվիրված է վերջին ժամանակներում մեծ հետաքրքրություն առաջացրած ցինկի օքսիդի (ZnO) թափանցիկ հաղորդիչ թաղանթների ուսումնասիրությանը, որոնք ունեն բազմաթիվ կիրառություններ էլեկտրոնիկայում [1-3]:

Թափանցիկ հաղորդիչ թաղանթները լայն կիրառություն ունեն ջերմամեկուսող տեխնոլոգիաներում, մասնավորապես՝ i-տիպի պատուհաններում: Նախատեսվում է նաև, որ դրանք կկիրառվեն թափանցիկ էլեկտրոնիկայի այնպիսի էլեմենտների արտադրության համար, ինչպիսիք են թափանցիկ էկրանները և էլեկտրոդները: Ներկայումս ստացված գրեթե բոլոր թաղանթներն ունեն գրանուլացված (մանրահատիկային) կառուցվածքներ, այսինքն՝ բաղկացած են նանոմետրական չափերով մասնիկներից: Այդպիսի կառուցվածքներով թաղանթները կարող են ծառայել նանոէլեկտրոնիկայի սարքավորումների, ինչպես նաև նոր տեսակի պինդմարմնային ֆոտոկատալիզատորների ստեղծման համար: Այդպիսի թափանցիկ թաղանթներից են ZnO թաղանթները, որոնք համարվում են թանկարժեք ինդիում-անագ թաղանթների ամենալավ փոխարինողները:

ZnO թաղանթների կիրառությունը հատկանշական է նաև հաշվողական տեխնիկայի պինդմարմնային վերագրանցվող հիշողության տարրեր (resistance random access memory - ReRAM) պատրաստելու համար: Այդպիսի հիշողության էլեմենտներն ունեն 5 նմ-ի կարգի չափեր գործառնական տիրույթում, որոնք զգալիորեն փոքր են, քան ժամանակակից սիլիցիումային տարրերը: Դրանց արագագործությունն ակնկալվում է, որ կհասնի 50 նվ-ի: Այդ էլեմենտները, բացի ինֆորմացիա պահելուց, նաև կարող են

իրականացնել ինֆորմացիայի մշակման գործողություն, որը հաշվողական տեխնիկայի գործունեության մեջ հանդիսանում է կարևոր գործոն:

Արդեն իրականացվել են տարբեր խառնուրդներով և եզրված ZnO թաղանթների էլեկտրահաղորդականության և ֆոտոհաղորդականության բազմաթիվ հետազոտություններ: Չնայած դրան, իրականացված հետազոտություններում բացակայում էին այն հարցերի պատասխանները, թե ինչպես են փոխվում թաղանթների ֆոտոէլեկտրական և օպտիկական հատկությունները՝ խառնուրդների տեսակի և կոնցենտրացիայի փոփոխություններից կախված: Մինչև հիմա պարզ է լույսի ազդեցությունը և այնպես էր տ ZnO թաղանթների և դրանցով պատրաստված հետերոկառուցվածքների հաղորդականության վրա: Ինչպես վերը նշեցինք, ստացված գրեթե բոլոր թաղանթներն ունեն գրանուլացված կառուցվածքներ, սակայն բացակայում են այդպիսի կառուցվածքների պերկոլյացիոն հաղորդականության փորձարարական հետազոտությունները և այդ հետազոտությունների համար նախատեսված համակարգ:

ZnO թաղանթներն իրենց կիրառությունն են գտել այսպես կոչված մեմրիստրոնների մշակման մեջ, որոնք իրենցից ներկայացնում են հիստերիզիսային ոչ-գծային վոլտ-ամպերային (V-I) բնութագիր ունեցող ռեզիստիվ սարքեր: Իրականացվել են ZnO թաղանթների հիման վրա մշակված մեմրիստրոնների բազմաթիվ հետազոտություններ: Մինչև հիմա մշակված մեմրիստրոնների բարձր հաղորդականությունը հանդիսանում է մեծածավալ էներգասպառման պատճառ, ինչը հանգեցնում է սարքերի տաքացմանը: Այդ իսկ պատճառով էլ այդպիսի մեմրիստրոնների առաջնային խնդիրներից մեկն է դարձել էներգասպառման մաքսիմալ նվազեցումը:

Ելնելով վերը նշված խնդիրների առկայությունից և անհրաժեշտ հետազոտությունների բացակայությունից՝ մենք որոշել ենք շեշտը դնել տարբեր խառնուրդներով և եզրված ZnO թաղանթների հաղորդականության և ֆոտոհաղորդականության հետազոտությունների վրա, որոնք թույլ կտան իրականացնել հաղորդականության կինետիկայի և պերկոլյացիոն

հաղորդականության նկարագրություն, ինչպես նաև նպատակ մեմրիստորային տարրերի էներգապառման նվազեցմանը:

### **Աշխատանքի նպատակը**

Ատենախոսության նպատակն է իրականացնել տարբեր խառնուրդներով և եզրված ZnO թաղանթների ֆոտոէլեկտրական օպտիկական հատկությունների փորձարարական հետազոտություններ: Նշված նպատակին հասնելու համար ատենախոսության մեջ դրվել են հետևյալ խնդիրները.

1. Հետազոտել դոնորային և ակցեպտորային խառնուրդներով և եզրված ZnO թաղանթների հաղորդականությունը և ֆոտոհաղորդականության կիսետիկան:
2. Մշակել բարակ թաղանթներում տեղային հոսանքի խտությունը չափելու նոր եղանակ և այն օգտագործելով իրականացնել թափանցիկ էլեկտրոնիկայի համար նախատեսված գրանուլացված կառուցվածքներով ZnO թաղանթների պերկոլյացիոն հաղորդականության և պերկոլյացիոն ֆոտոհաղորդականության հետազոտություններ:
3. Թափանցիկ էլեկտրոնիկայի հիշողության սարքի համար ZnO թաղանթների հիման վրամշակել և հետազոտել մեմրիստորային այնպիսի տարր (ReRAM), որը պահպանելով մեմրիստորների հիմնական հատկությունները, կունենա փոքրածավալ էներգապառում:

### **Գիտական նորույթ**

1. Առաջին անգամ ներկայացվել է ZnO թափանցիկ թաղանթների սառեցված ֆոտոհաղորդականության (frozen photoconductivity) ուսումնասիրությունը և ցույց է տրվել, որ ֆոտոհաղորդականության դանդաղ փոփոխության ընթացքում ռելաքսացիոն ժամանակները պայմանավորված են սառեցված ֆոտոհաղորդականությամբ:
2. Մշակվել է սկզբունքորեն նոր եղանակ բարակ թաղանթներում տեղային հոսանքի խտությունը չափելու համար: Այդ եղանակով չափվել է գրանուլացված կառուցվածքներով ZnO թաղանթների հաղորդականության և ֆոտոհաղորդականության տեղային

հոսանքները և հետազոտվել են դոնորային կամ ակցեպտորային խառնուրդների ազդեցությունները հաղորդականության և \$նոտհաղորդականության վրա:

3. Առաջին անգամ թափանցիկ էլեկտրոնիկայի համար ZnO թաղանթների հիման վրա ստացվել է նվազագույն ջերմային կորուստներով միաբևեռ և երկբևեռ 1D1R (1D-ճոտկի դիոդ, 1R-մեմրիստոր) տեսակի հետերոկառուցվածքային մեմրիստորային հիշողության տարր:

### **Գործնական արժեքը**

1. Իրականացրած սառեցված \$նոտհաղորդականության հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ ZnO թաղանթները կարող են ավելի լայն կիրառություն գտնել օպտիկական տիրույթում գործող թափանցիկ էլեկտրոնիկայի տարրեր ստեղծելու համար:
2. Մշակված նոր եղանակը թույլ է տալիս կիսահաղորդչային բարակ թաղանթներում չափել տեղային հոսանքի խտությունը:
3. ZnO:Li թաղանթները, օժտված լինելով փոքր հաղորդականությամբ, կարող են լայնորեն կիրառվել նվազագույն ջերմային կորուստներով թափանցիկ մեմրիստորային տարրեր պատրաստելու համար:

### **Պատասխաններ կայացվող հիմնական դրույթները**

1. Li-ով լեգիրված ZnO թաղանթներում \$նոտհաղորդականության կինետիկան պայմանավորված է սառեցված \$նոտհաղորդականությամբ:
2. Մշակված և ստեղծված նոր համակարգը նախատեսված է կիսահաղորդչային թաղանթներում տեղային հոսանքի խտության չափում իրականացնելու համար:
3. Մշակված նոր եղանակը իրականացնելով գրանուլացված թաղանթներում տեղային հոսանքների հետազոտություններ, թույլ է տալիս որոշել դրանցում պերկոլյացիոն հաղորդականության կլաստերների բնութագրական չափերը:

4. ZnO:Li թաղանթների օգնությամբ կարելի է ստանալ այնպիսի թափանցիկ մեմբրաններ, որոնք չունենալով պարամետրերի զգալիորեն շեղումներ՝ օժտված կլինեն փոքրածավալ էներգապաշտամբ:

#### **Աշխատանքի ներկայացումը**

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները բազմիցս քննարկվել են Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտի Բյուրեղօպտիկայի և աբորատորիայի սեմինարներում և ներկայացվել Laser Physics 2015 (6-9 հոկտեմբերի, Աշտարակ, Հայաստան), ICSMN-15 (11-13 սեպտեմբերի, Երևան, Հայաստան), Optics & Photonics 2013 (25-29 օգոստոսի, Սան Դիեգո, ԱՄՆ), Optics & Photonics 2014 (17-21 օգոստոսի, Սան Դիեգո, ԱՄՆ) և Optics & Photonics 2015 (9-13 օգոստոսի, Սան Դիեգո, ԱՄՆ) միջազգային գիտաժողովներում:

#### **Տպագրություններ**

Ատենախոսության թեմայով տպագրվել են 8 գիտական աշխատանք:

#### **Ատենախոսության կառուցվածքը**

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, 4 գլուխներից, եզրակացությունից և 126 հղում պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 105 էջ է ու պարունակում է 47 նկար և 2 աղյուսակ:



**ԳԼՈՒԽ 1. ՑԻՆԿԻ ՕՔՍԻԴԻ (ZnO) ԹԱՂԱՆՔՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ ԹԱՓԱՆՑԻԿ ԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱՅԻ ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐՈՒՄ**

**§1.1. ZnO թաղանթների հիմնական հատկությունները**

Ցինկի օքսիդն (ZnO) ունի լայն կիրառություններ նանոէլեկտրոնիկայում, սենսորային համակարգերում, թափանցիկ էլեկտրոնիկայում, օպտոէլեկտրոնիկայում և ակուստաէլեկտրոնիկայում [1-3]: Այն ունի բարձր հալման ջերմաստիճան, ջերմահաղորդականություն, ֆոտոզգայնություն, պեզո և պիրոէֆեկտներ, անիզոտրոպային բյուրեղային կառուցվածք, կիսահաղորդչային հատկություններ, արգելված գոտու մեծ լայնության դեպքում բարձր ինտեգրում սիլիցիումային տեխնիկայում, կենսաբանական համատեղելիություն, ինչպես նաև հնարավորություն ձևավորել ու նանոկառուցվածքների լայն հավաքածու [1-3]: Աղյուսակ 1.1-ում ներկայացված են ZnO-ի հիմնական հատկությունները [3]:

*Աղյուսակ 1.1. – ZnO-ի հիմնական հատկությունները*

Պարամետր	Նշանակություն
Արգելված գոտու լայնությունը, $E_g$	3,35 էՎ
Բյուրեղային կառուցվածք	Վեցանկյուն վյուրտցիտ $a=0,325$ նմ $c=0,591$ նմ
Մոլեկուլային զանգվածը	81,3794
Չալման ջերմաստիճանը	1975 °C
Էլեկտրոնների շարժունակությունը, $\mu(n)$	10-180 սմ <sup>2</sup> /(Վ·վ)

Խոռոչների շարժունակությունը, $\mu(p)$	5-30 սմ <sup>2</sup> /(վ·վ)
Բեկման ցուցիչը, $n$	2,2
Դիէլեկտրիկական թափանցելիությունը, $\epsilon$	8,5
Էքսիտոնի կապի էներգիան	60 մԷՎ
Ջերմահաղորդականությունը	25 վտ/մ <sup>2</sup> 20 °C դեպքում
Ջերմային ընդարձակման գործակիցը	4,3·10 <sup>-6</sup> /°C 20 °C դեպքում 7,7·10 <sup>-6</sup> /°C 600 °C դեպքում
Դեբայի ջերմաստիճանը, $\Theta_D$	405 Կ
Օհմական կոնտակտները	Al, Ti, Ta, Ti/Au, In, InGa
Արգել քային կոնտակտները	Au, Ag, Pd, Pt, W
Լեգիրվող խառնուրդները p-տեսակի n-տեսակի	Li, N, P, As, Sb Ga, Al

Ներկա ժամանակաշրջանում ZnO թաղանթների հատկությունները կախված ստացման եղանակից և ռեժիմից, ինչպես նաև տարբեր տեխնիկական գործոններից, մեծ հետաքրքրություն են առաջացնում թափանցիկ էլեկտրոնիկայի տարբեր ստեղծելու համար [12]:

ZnO թաղանթների տեսակարար դիմադրությունը նույնիսկ մեկ ստացման եղանակի դեպքում կարող է փոխվել բավականին լայն սահմաններում, որը պայմանավորված է ոչ ստեխիոմետրիկ միացություններով և պարունակող խառնուրդի փոփոխությամբ [13]: Հատկությունների ղեկավարմամբ ZnO թաղանթի ստացման դժվարությունները հաճախ պայմանավորված են ZnO-ի էլեկտրական հատկությունների մեխանիզմների ոչ բավարարիմացությամբ, ինչպես նաև պայմանավորված են պրոցեսներով, որոնք տեղի են ունենում թաղանթների ձևավորման և ստացման տեխնոլոգիական ռեժիմներով ազդեցությամբ ZnO թաղանթների հատկությունների վրա:

ZnO թաղանթները հիմնականում բնութագրվում են n տեսակի հաղորդականությամբ, չնայած հնարավոր է ստանալ նաև p տեսակի հաղորդականությամբ թաղանթներ [14]: Ցինկի ավելցուկը և

թթվածնային թափուր տեղերը բյուրեղական ցանցում պայմանավորված են սեփական արատների տեսակի առկայությամբ՝ ցինկի միջհանգուցային ատոմներով և թթվածնային թափուր տեղերով, որոնք հանդիսանում են դոնորային կենտրոններ, ընդունակ են կրկնակի իոնիզացիայի և նրանց կոնցենտրացիան որոշում է ZnO թաղանթի էլեկտրահաղորդականության մեծությունը [15]:

ZnO-ի լիցքակիրների փոխադրման մեխանիզմն ունի բարդ բնութագիր: Հիմնական լիցքակիրների ցրման պրոցեսների բնութագրման համար ընդունված է օգտագործել Բոլցմանի կինետիկական թեորեմը [16]: [16] աշխատանքում ներկայացված է լիցքակիրների ցրման մեխանիզմները էլեկտրոն-էլեկտրոն առաձգական փոխազդեցության տեսանկյունից: Այդ դեպքում էլեկտրոնի անցումները մի վիճակից մյուս վիճակին կարող է իրականացվել միայն ցրումներից առաջ և հետո էներգիայի հավասարության դեպքում: Սակայն, համաձայն էլեկտրոն-էլեկտրոն փոխազդմանը, փոխվում է ոչ միայն մասնիկի իմպուլսը, այլ նաև մասնիկի էներգիան [17, 18], որը անհրաժեշտ է հաշվի առնել լիցքակիրների փոխադրման մոդելի ժամանակ:

## **§1.2. Թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդ-թաղանթների ստացման ֆիզիկական եղանակները**

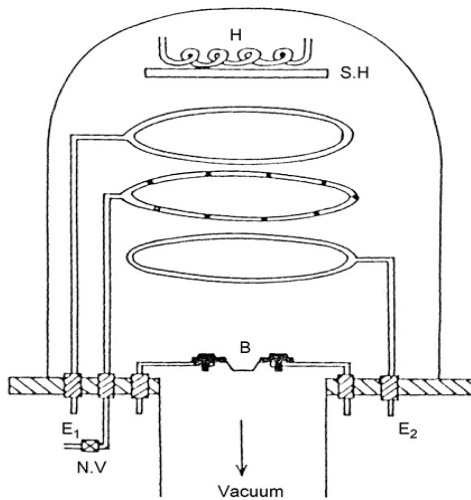
Թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդները կազմում են կիսահաղորդչային հատուկ դաս, որոնք, որպես կանոն, ունեն լայն արգելված գոտու լայնություն և հանդիսանում են ուղիղ գոտային կիսահաղորդիչներ:

Թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդներ (TCO) նանոթաղանթային ձևով հնարավոր է ստանալ ֆիզիկական և քիմիական եղանակներով, ինչպես նաև դրանց համատեղմամբ: Թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդներ ստանալու համար ամենապարզ ֆիզիկական եղանակներից մեկը բարակ մետաղական թաղանթների վակուումային ջերմային գոլորշիացման նստեցումն է ելքային մաքուր մետաղների տակդիրների վրա և հաջորդող օքսիդացման ճանապարհով թթվածին պարունակող միջավայրում ջերմամշակմամբ: Առաջին անգամ այդպիսի եղանակով

ստացվել է բարակ ZnO թաղանթները 1907 թվականին, որոնք ունենին տեսանելի տիրույթում թափանցելիություն և ընդունակ էին հաղորդելու էլեկտրական հոսանք: Ներկայացվող եղանակով կարելի է ստանալ տարբեր TCO թաղանթներ:

Այս եղանակի առանձնահատկությունը մետաղական թաղանթի օքսիդային ռեակցիայի սկզբում սեփական սկզբնային ջերմային ջերմաստիճանի գոյությունն է, որը կախված է մետաղի տեսակից: Հիմնական դեպքերում օքսիդացման պրոցեսի սկզբի ջերմաստիճանը գտնվում է բարձր կամ ապակե տակդիրների հալման ջերմաստիճաններում: Այդ պատճառով, ներկայացվող եղանակը կարող է շահավետ չլինել ջերմազգայուն տակդիրների վրա թաղանթների սինթեզի իրականացնելու համար:

Հայտնի է թթվածնային միջավայրում մաքուր մետաղի գոլորշիացման եղանակը, որը ստացել է ռեակտիվ գոլորշիացում անվանումը: Այդ եղանակի տարատեսակություններից մեկը ռեակտիվ գոլորշիացման ակտիվացումն է, որում օգտագործվում է էլրացուցիչ պլազմա՝ կազմված  $Ar + O_2$ , որը պատրաստված է վոլֆրային ճառագայթման և ցածր վոլտային անոդի միջոցով: Նկ. 1.1-ում սխեմատիկորեն ներկայացված է ռեակտիվ գոլորշիացման ակտիվացման համակարգի կառուցվածքը բարակ թաղանթներ ստանալու համար: [19]-րդ աշխատանքում հեղինակներն իրականացրել են ինդիում-օքսիդի բարակ թաղանթների էլեկտրական և օպտիկական հատկությունների ուսումնասիրություն, կախված թթվածնի ճնշումից, թաղանթի նստեցման ժամանակ: Թթվածնի ճնշումը փոխվել է  $3,75 \cdot 10^{-4}$ -ից  $3,75 \cdot 10^{-3}$  Տորր վակուումային խցիկում: Թաղանթի սինթեզն իրականացվել է տակդիրի ֆիքսված (սևեռված) ջերմաստիճանում, որը եղել է 573 Կ:



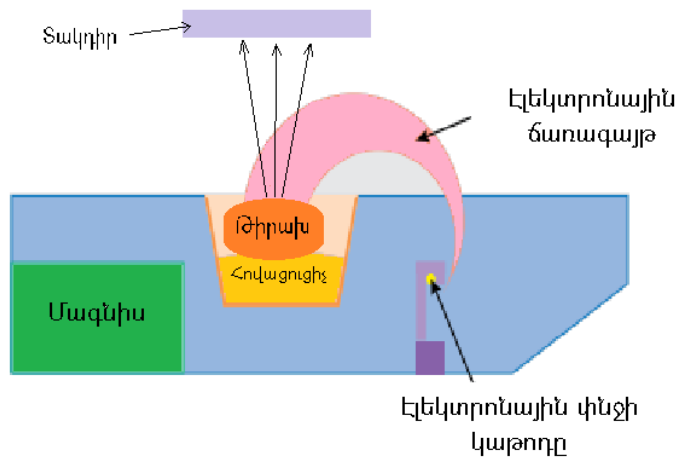
Նկ. 1.1. Ակտիվացման ռեակտիվ գոլորշիացման համակարգերի սխեման, օգտագործումը նկարագրված է աշխատանք [19]-ում:

$1,5 \cdot 10^{-3}$  Տորր ճնշման դեպքում ստացվել են ինդիումի օքսիդի թաղանթներ լավագույն հատկություններով, տեսակարար դիմադրությունը եղել է  $8,2 \cdot 10^{-4}$  Օհմ·սմ, թափանցելիությունը՝ 87%:

Տեխնոլոգիական սարքերում լայն կիրառություն ունեն էլեկտրոնաճառագայթային փնջերը, որոնք նախատեսված են ջերմության, եռակցման, հալման, չափերի մշակման, նստեցման, հիմնարար և կիրառական ուսումնասիրման, այդ թվում նաև տեխնոլոգիաների բնագավառում: Էլեկտրոնաճառագայթային փոխազդեցության էությունը կայանում է նրանում, որ էլեկտրոնային փնջերի (իմպուլսային կամ չընդհատվող) կինետիկ էներգիան մշակման տիրույթում վերածվում է ջերմայինի: Քանի որ փնջի հզորության և էներգիայի կոնցենտրացիոն տիրույթը մեծ է, նյութերում հնարավոր է ստանալ բոլոր տեսակի փոխազդեցությունները՝ ջեռուցումը մինչև տրված ջերմաստիճան, հալեցումը և գոլորշիացումը մեծ արագությամբ: Գործնականում ցանկացած մետաղի գոլորշիացման և վակուումում պրոցեսիրականացնելու համար անհրաժեշտ է բոլոր ջերմային փոխազդեցության տիրույթներում ջերմային էներգիայի խտության հավանականության շնորհիվ ապահովել մշակվող մետաղի մաքրությունը, ինչպես նաև սարքավորումների ավտոմատացումը:

Էլեկտրոնաճառագայթային գոլորշարարը (Նկ. 1.2) կազմված է երեք հիմնական մասերից՝ էլեկտրոնային փնջից, կլանող

համակարգից և տարբեր ունակություններով (7, 13, 15, 18, 25, 40 և 156 սմ<sup>3</sup>) ջրասառեցնող հովացուցչից: Դա ապահովում է անընդհատ աշխատանք առանց ավելացնելու ցնդող նյութը, որը բացի այդ հավաճ վիճակում չի շփվում հովացուցչի պլնձե պատերի հետ: Ընդհանուր դեպքում հնարավոր է օգտագործել ձևավորված հովացուցչի չափերով նյութ (առանց հովացուցչի գոլորշիացման) կամ օգտագործել համատեղ հատուկ հովացուցիչներ փոշիացված նյութից:



Նկ. 1.2. Էլեկտրոնաճառագայթային նստեցման սխեման

### §1.3. Թափանցիկ ZnO հաղորդիչ թաղանթների կառուցվածքները

Թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդի (TCO) թաղանթները կարող են ունենալ բազմաբյուրեղային և միաբյուրեղային կառուցվածքներ: Թափանցիկ հաղորդիչ թաղանթների միաբյուրեղային կառուցվածքը ստացվում է, որպես կանոն, միաբյուրեղ տակդիրների վրա բարակ թաղանթի էպիտաքսիալ աճի ժամանակ: Թափանցիկ հաղորդիչ թաղանթների էպիտաքսային աճի համար որպես տակդիր կարող են օգտագործվել Y-ով կայունացված ZrO<sub>2</sub>-ը, սապֆիր, InN, InAs և MgO-ով բազմաբյուրեղների [20, 21]: TCO բարակ թաղանթների էպիտաքսիալ աճը հետաքրքիր է ֆունդամենտալ և կիրառական հետազոտությունների համար [22, 23]: Էպիտաքսիալ բարակ TCO թաղանթները ուսումնասիրվում են հիմնական ֆիզիկական հատկությունները որոշելու համար, քանի որ այդպիսի թաղանթներում բացակայում է հարաբերական փոքր քանակով դեֆեկտներ: TCO թաղանթների էտալոնային կիրառական ուսումնասիրությունը կախված է նրանց օգտագործման հավանականության հետ՝ հետերոկառուցվածքային միաբջիջ

տարրերում [20], դաշտային տրանզիստորներում [21], լուսաճառագայթման դիոդներում և լազերներում [24]: Բարակ էպիտաքսային TCO թաղանթների պատրաստումը սկսվել են վերջերս: Գիտական գրականության մեջ հաղորդականություն հանդիպում է հիմնականում ցինկի օքսիդի բարակ թաղանթներում:

Բարակ թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդային թաղանթների բազմաբյուրեղային կառուցվածքը հիմնականում իրականացվում է թաղանթների սինթեզի ժամանակ: Դա կախված է ապակե կամ այլ տակդիրների օգտագործման հետ TCO ծածկույթ պատրաստելիս, ինչպես նաև ջերմային մշակման ժամանակ հետաճային ջերմամշակման ջերմաստիճանը բավական է, որպեսզի տեղի ունենա բարակ թաղանթների բյուրեղային նստեցում: Հետաճային ջերմամշակման իրականացումը լավացնում է բարակ թափանցիկ թաղանթների օպտիկական և էլեկտրական հատկությունները [25-28]:

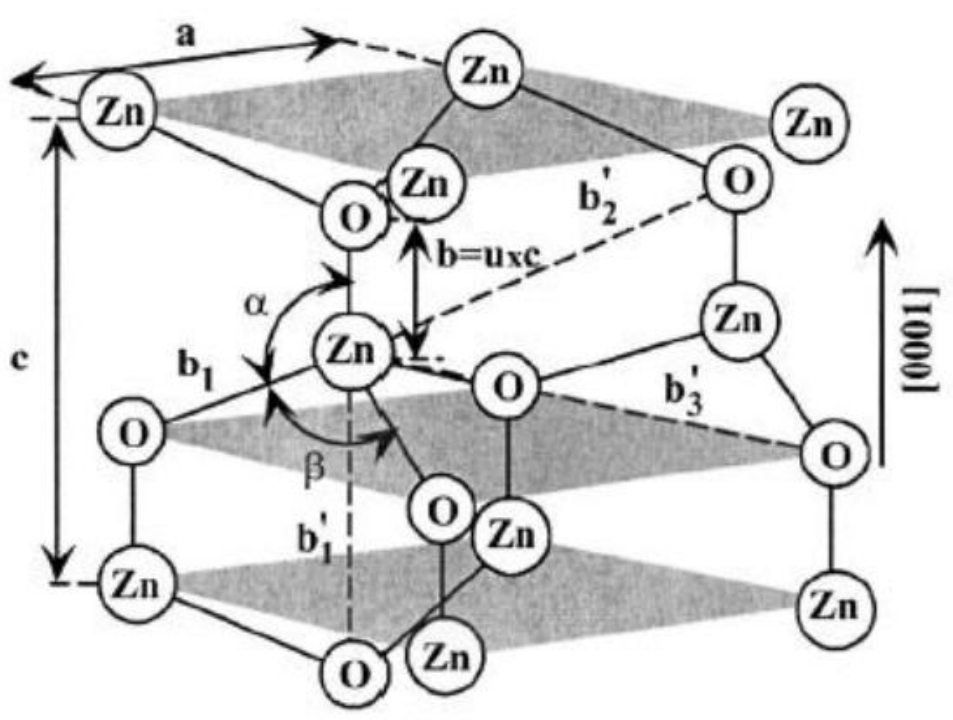
Բարակ TCO թաղանթների բազմաբյուրեղ կառուցվածքը բաղկացած է այնպիսի բյուրեղներից, որոնք տակդիրների վրա ունեն ինչ-որ պատահական ուղղությամբ կողմնորոշվածություն: TCO թաղանթների բյուրեղների երկրաչափական չափերը կարող են փոխվել 1-100 նմ: Բարակ թափանցիկ թաղանթների բյուրեղների երկրաչափական չափերը որոշելու համար օգտագործվում է մակերևույթի վերլուծության ուղիղ ավանդական եղանակը՝ էլեկտրոնային և զոնդային մանրազննման միջոցով [29]: Բյուրեղի երկրաչափական չափերը որոշելու ծերերի եղանակի մոտեցումը համեմատականորեն պարզ և բարդ լայն տարածված է: Եղանակը հիմնված է ռենտգենակառուցվածքային վերլուծության վրա: Բարակ թաղանթների մակերևույթից ռենտգենյան անդրադարձի ինտենսիվության լայնությունից կախված առավելագույն արժեքի մակարդակի կեսի վրա առավելագույն (0002) արժեքի կեսը գտնվում է բյուրեղի չափերի մեծության մոտ, որը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$D = \frac{0.89}{\Delta \cos \theta}, \quad (1.1)$$

որտեղ  $D$ -ն բյուրեղների չափն է,  $\lambda$ -ն ռենտգենյան ճառագայթման ալիքի երկարությունն է,  $\theta$ -ն դիֆրակցիայի անկյունն է,  $\Delta$ -ն անդրադարձման գագաթի լայնությունն է կիսաբարձրության վրա:

Անհրաժեշտ է նշել, որ Շերերի բանաձևը կարելի է օգտագործել բարակ թաղանթներում պատահական դիսպերսիոն բյուրեղների չափի ճշգրիտ գնահատականի համար:

Ցինկի օքսիդն ունի վյուրտցիտ տեսակի կառուցվածք, որի սխեմատիկ պատկերը ներկայացված է 1.3 նկարում [30]: Շրջակա միջավայրի պայմաններում վյուրտցիտի կառուցվածքը հանդիսանում է կայուն: Ցինկային խաբուսիկ կառուցվածքի տեսակը կարող է կայունացվել խորանարդային տակդիրի աճի շնորհիվ: Քարային աղի կառուցվածքի տեսակը կարող է ստացվել հարաբերականորեն բարձր ճնշման տակ [31]: Այսպիսով, ցինկի օքսիդի կառուցվածքը հանդիսանում է վյուրտցիտ տեսակի կառուցվածք:



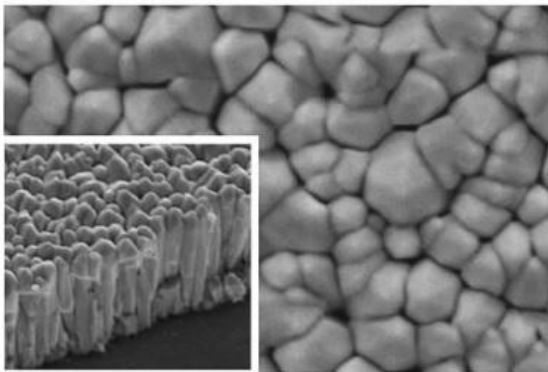
Նկ.1.3. Սխեմատիկորեն ներկայացված ZnO-ների կառուցվածքը: U-ն պարամետր է, որը որոշվում է  $\epsilon$  և  $c$  երկար կապերի հարաբերությամբ (իդեալական բյուրեղում  $0,375 \epsilon$ ),  $\alpha$  և  $\beta$  ( $109,47^\circ$ ) կապերի անկյուններն են [30, 31]:

ZnO-ն ավելի էլայն օգտագործվում է տարբեր օպտիկաէլեկտրական կիրառություններում, այդ պատճառով մեծ ուշադրություն է գրավել ցինկի օքսիդի վյուրտցիտ կառուցվածքը: Մի քանի կառուցվածքների տվյալների հիման վրա թափանցիկ հաղորդիչ ZnO-

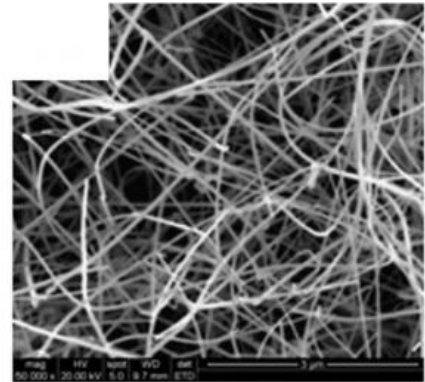


ների համար վերջին ժամանակներում սինթեզվում են գրանուլացված (նանոկառուցվածքային) բարակ թաղանթներ:

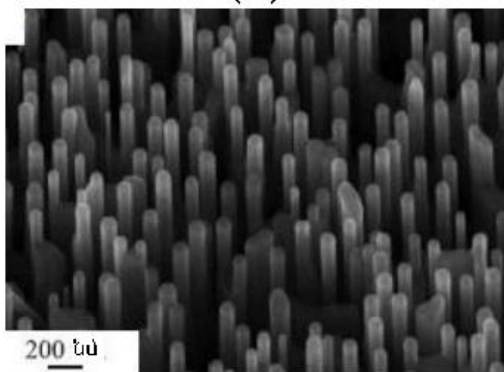
Ցինկի օքսիդից ստացվում են մեծ քանակությամբ տարբեր գրանուլացված կառուցվածքներ (սկ. 1.4)՝ նանոչափային միաբյուրեղ թաղանթներ [53, 54], նանոբյուրեղային թաղանթներ [55-59], նանոհաղորդիչներ, նանոձողեր, չորսվոտուկներ, նանոօղակներ, նանոխողովակներ [60-62]:



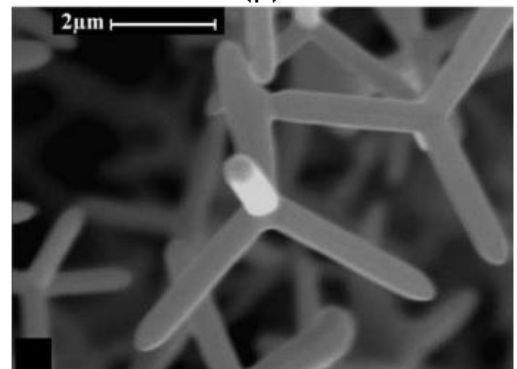
(ա)



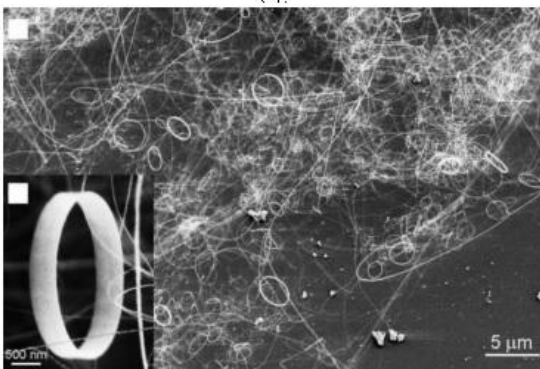
(բ)



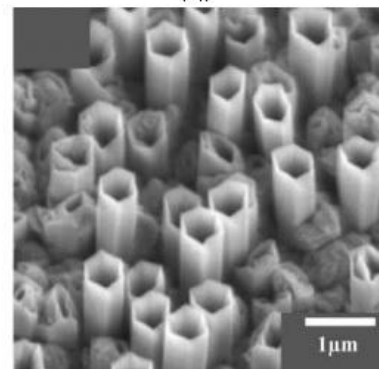
(գ)



(դ)



(ե)



(զ)

Սկ. 1.4. ZnO-ից նանոկառուցվածքային նյութեր՝ նանոբյուրեղային թաղանթ (ա), նանոմետաղալարեր (բ), նանոձողեր (գ), չորսվոտուկներ (դ), նանոօղակներ (ե), նանոձողեր (զ):

Ֆիզիկական հատկությունների պատճառով նանոկառուցվածքային այդպիսի բարակ TCO թաղանթները կարող են տարբերվել ավանդական թաղանթներից: Այնուամենայնիվ, գրանուլացված ZnO նյութերի ստացման եղանակների մեծ տարբերությունը և դրանց աճը հանդիսանում է բարդ և աշխատատար: Այդ թվում, նաև դա կապված է առանձին կառուցվածքների բարդության հետ, նրանց նանոմասնիկների զանգվածային բարձր ռեակցիայի հատկությունների հետ, նանոկառուցվածքների պարամետրերի վերծանման հետ, ի շնորհիվ աճող մակերևույթների օհմական կոնտակտների ձևավորման բարդության: Կախված այդ հանգամանքների հետ ZnO թաղանթները մեծ հիմնարար և կիրառական հետաքրքրություն են ներկայացնում բազմաթիվ նանոկառուցվածքների ճառագայթման և կիրառման համար:

#### **§1.4. Թախանցիկ հաղորդիչ օքսիդ (TCO) թաղանթների**

##### **Էլեկտրահաղորդականությունը և ֆոտոհաղորդականությունը**

TCO-ները, ինչպես նշվել էր, հանդիսանում են այլասերված կամ չայլասերված ուղիղ գոտիներով կիսահաղորդիչներ, որոնց արգելված գոտու լայնությունը  $\geq 3.3$  էՎ: TCO-ների տեսակարար դիմադրությունը կարող է ընկած լինել  $10^4$ - $10^5$  Օհմ-սմ լայն տիրույթում՝ կախված սինթեզի պայմաններից: Սակայն, կան մի շարք հետազոտական աշխատանքներ, որոնք նվիրված են հաղորդականության խոռոչային տեսակի TCO-ների ուսումնասիրությանը և սինթեզին: Սույն պարագրաֆում կբերվի Էլեկտրոնային տեսակի հաղորդականությամբ TCO-ների հատկությունների վերլուծությունը:

Մինչ այժմ դեռևս միանշանակ պարզ չէ, թե TCO-ներում ինչն է հանդիսանում Էլեկտրոնային հաղորդականության աղբյուրը, և դա հանդիսանում է այս վերլուծության հատկանշական հարցադրումը: TCO-ների հաղորդականության նկարագրման լայնորեն կիրառվող եղանակներից մեկը հանդիսանում է թթվածնային թափուր տեղերի և ցինկի ատոմների շեղման առկայությունը, որոնք ձևավորում են հաղորդականության գոտու հատակին մոտ գտնվող դոնորային մակարդակներ: [32] վերլուծական աշխատանքում կարելի է գտնել

ժամանակակից եղանակներ և մեխանիզմներ, որոնք բացատրում են թափանցիկ հաղորդիչ նյութերի էլեկտրական հաղորդականությունը:

TCO-ներում հաղորդականությունը ( $\sigma$ ,  $\text{Ohm}^{-1}\cdot\text{սմ}^{-1}$ ) կարելի է նկարագրել հետևյալ հավասարմամբ՝

$$\sigma = n\mu e, \tag{1.2}$$

որտեղ  $n$  ( $\text{սմ}^3$ )-ը լիցքակիրների կոնցենտրացիան է,  $\mu$  ( $\text{սմ}^2/\text{վ}\cdot\text{վ}$ )-ն լիցքակիրների շարժունակությունը և  $e$  ( $\text{Կլ}$ )-ն՝ էլեկտրոնի լիցքը: (1.2) հավասարումից երևում է, որ էլեկտրական հաղորդականության հիմնական պարամետրեր են հանդիսանում լիցքակիրների կոնցենտրացիան և շարժունակությունը: էլեկտրական հաղորդականությունը հակադարձ համեմատական է էլեկտրական տեսակարար դիմադրությանը ( $\rho$ ,  $\text{Ohm}\cdot\text{սմ}$ ):

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \tag{1.3}$$

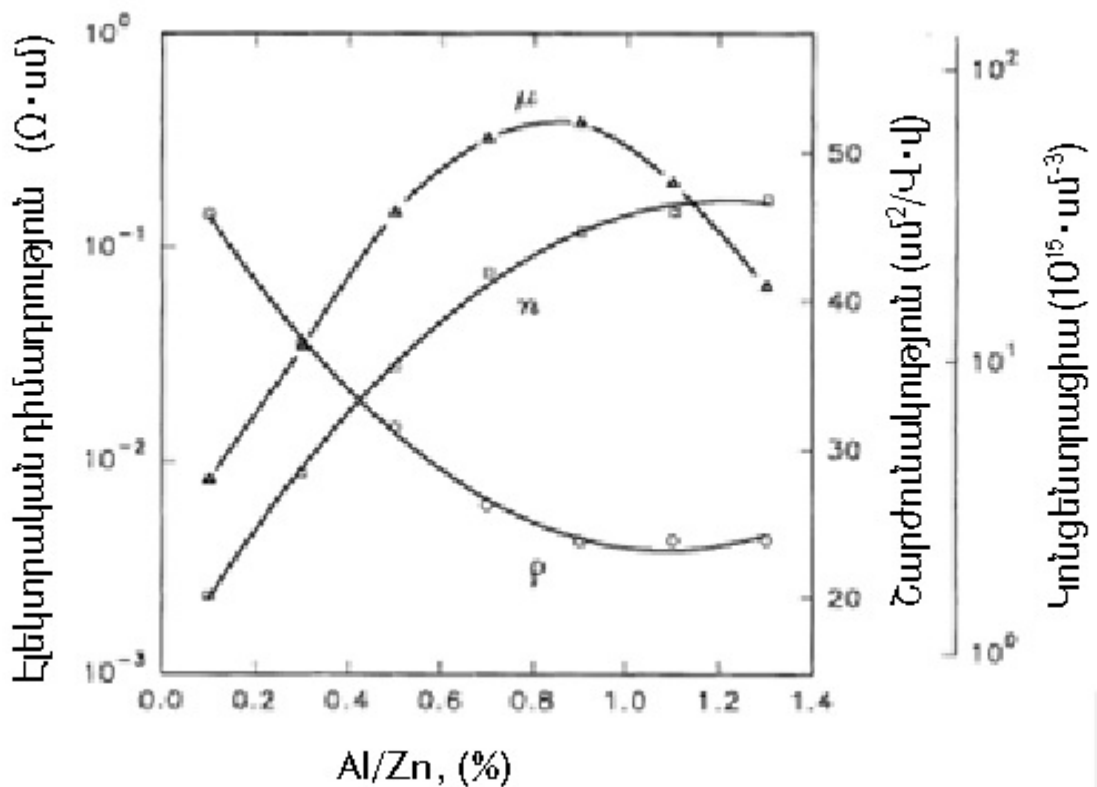
Հիմնականում TCO-ների էլեկտրական սարքերը ուղղակիորեն բնութագրվում են հետևյալ պարամետրերով. տեսակարար էլեկտրական դիմադրությամբ, լիցքակիրների կոնցենտրացիայով և շարժունակությամբ:

Ավանդաբար բարակ և թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդների էլեկտրական հատկությունները հետազոտվում են կախած հետևյալ պարամետրերի ազդեցությունից.

- 1) Լեգիրվող խառնուրդի տեսակից և կոնցենտրացիայից [33-36],
- 2) TCO սինթեզի ժամանակ տակդիր տեսակից և ջերմաստիճանից [33],
- 3) սինթեզից հետո TCO-ի մշակման եղանակներից [25, 37, 38-40],
- 4) TCO-ի ջերմաստիճանից [20, 41-43]:

TCO-ների էլեկտրական հաղորդականության մեծացման արդյունավետ միջոց է հանդիսանում խառնուրդային ատոմներով լեգիրումը: Դա թույլ է տալիս մեծացնել լիցքակիրների կոնցենտրացիան, ի շնորհիվ TCO-ի արգելված գոտում առկա խառնուրդի ոչ խորը մակարդակների: Սակայն, այդպիսի լեգիրումը կարող է բերել նաև լիցքակիրների շարժունակության աճին [44]: Լեգիրման ժամանակ ուղեցույց է հանդիսանում հետևյալ կանոնը:

Խառնուրդի ատոմը պետք է ունենա ավելի մեծ վալենտականություն, քան ցինկի ատոմը, որը ձևավորում է օքսիդային կապը: Այնուամենայնիվ, գալիումով լեգիրված ցինկի օքսիդի համար այնուամենայնիվ ատոմն ունի +3 վալենտականություն, իսկ ցինկի ատոմը՝ համապատասխանաբար +2: Այդ դեպքում, խառնուրդային ատոմների կոնցենտրացիան սահմանափակվում է նրա համար, որպեսզի կարելի լինի խուսափել  $Al_2O_3$  և  $Ga_2O_3$  երկրորդ փուլի ձևավորումից, որը կարող է անդրադառնալ TCO-ի վերջնական էլեկտրական հատկությունների վրա: Հիմնվելով տվյալ երաշխավորումների վրա, ներկայումս իրականացվում են լեգիրման խառնուրդի կոնցենտրացիայից և տեսակից կախված TCO-ների էլեկտրական հատկությունների սինթեզի և ուսումնասիրման բազմաթիվ աշխատանքներ [34]:

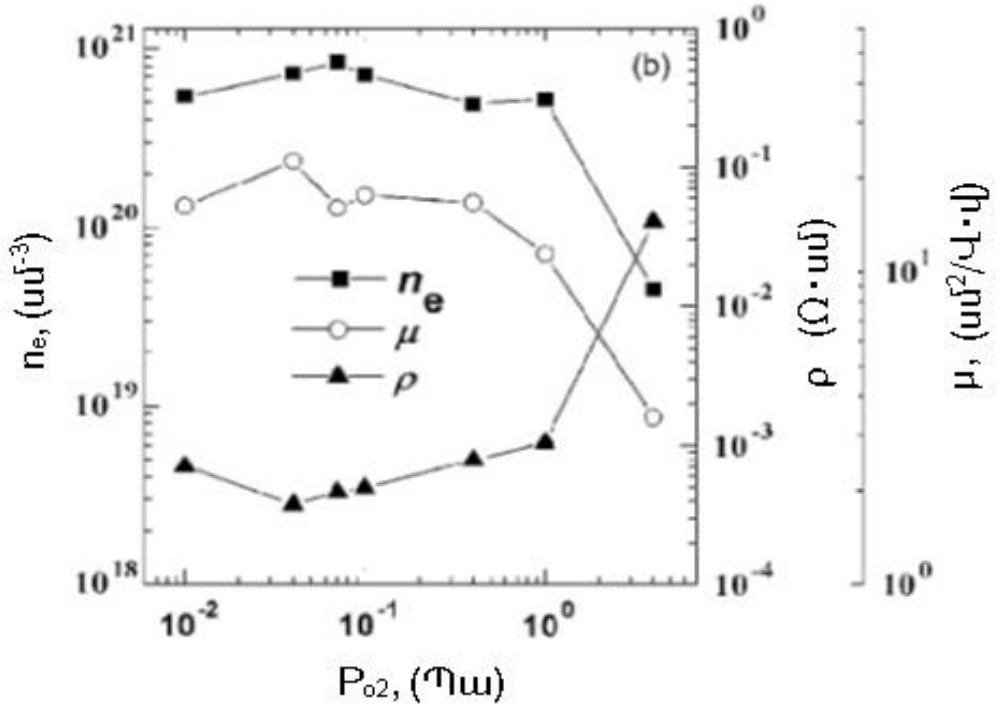


Նկ. 1.5. Լեգիրման խառնուրդի կոնցենտրացիայից և տեսակից կախված TCO-ների էլեկտրական հատկությունները. լեգիրված այնուամենայնիվ ցինկի օքսիդ [34], որտեղ 1 – տեսակարար դիմադրությունն է, 2 – լիցքակիրների շարժունակությունը, 3 – լիցքակիրների կոնցենտրացիան:

Նկ. 1.5-ում որպես օրինակ ներկայացված է էլեկտրական հատկությունների կախվածությունը լեգիրման խառնուրդի կոնցենտրացիայից և տեսակից:

TCO-ների էլեկտրական հատկությունները խիստ կախված են ստեխիոմետրիայից: TCO-ներում ստեխիոմետրիան կարելի է ղեկավարել թաղանթի սինթեզման վակուումային խցիկում թթվածնի ճնշման փոփոխությամբ: Սինթեզման ժամանակ թթվածնի ճնշումն անմիջականորեն ազդում է TCO-ի էլեկտրական հատկությունների վրա և հանդիսանում է կարևոր տեխնոլոգիական պարամետր: Այդ պատճառով նոր և ավանդական բարակ TCO թաղանթների սինթեզման փորձարարական-հետազոտական աշխատանքներում կարևորություն է տրվում վակուումային խցիկում թթվածնի ճնշումից կախված էլեկտրական հատկությունների հետազոտմանը: Յարկ է նշել, որ TCO-ի ստացման մագնետրոնային եղանակների կիրառման ժամանակ թթվածինը խառնվում է արգոնի հետոռոշակի չափաբաժիններով:

Նկ. 1.6-ում ներկայացված է տարբեր TCO թաղանթների սինթեզման ընթացքում, դրանց էլեկտրական հատկությունների կախվածությունը թթվածնի ճնշումից:

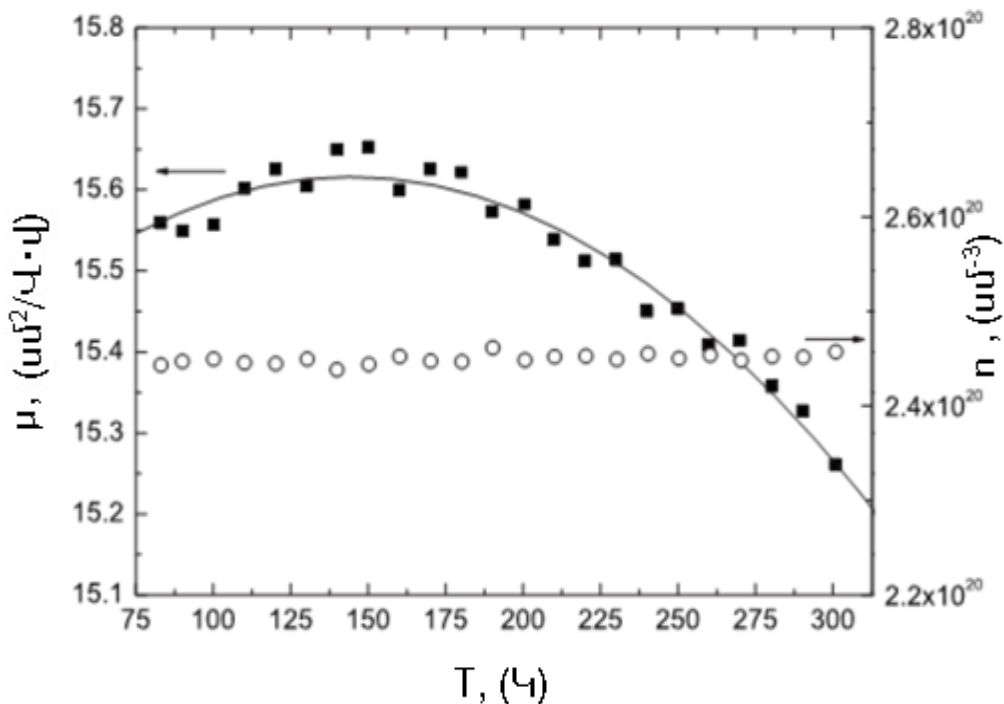


Նկ. 1.6. Այ՛յ ու միով լեգիրված ցինկի օքսիդ թաղանթների սինթեզման ընթացքում, դրանց էլեկտրական հատկությունների կախվածությունը թթվածնի ճնշումից [45]:

Բարակ TCO թաղանթների էլեկտրական հատկությունների ձևափոխման կամ բարելավման համար կիրառվում են մշակման զանազան եղանակներ: Լայն տարածում է գտել TCO բարակ թաղանթների ջերմամշակումը: Ջերմամշակումը դա մի պրոցես է, որի ընթացքում սինթեզվող սահմանված ժամանակահատվածում բարակ թաղանթները տաքացվում են վակուումում մինչև որոշակի ջերմաստիճան: Տաքացման արագությունը կարող է ազդեցություն ունենալ TCO թաղանթների էլեկտրական հատկությունների վրա [37]: Ջերմամշակման վերջնական ջերմաստիճանը կախված է կիրառվող հարթակի կայունությունից և այն անհրաժեշտ ջերմաստիճանից, որի դեպքում TCO-ի կառուցվածքը բարելավվում է: Դրանից բացի ջերմամշակումը իրականացվում է, երբ անհրաժեշտ է TCO բարակ թաղանթները ամորֆ կառուցվածքից բերել կիսաբյուրեղային կառուցվածքի:

TCO-ների էլեկտրական հատկությունները հետազոտվում են ջերմաստիճանների լայն տիրույթում: Որպես կանոն, ջերմաստիճանային ուսումնասիրությունները իրականացվում են երկու ջերմաստիճանային տիրույթներում՝ հելիումային ջերմաստիճանից մինչև սենյակային ջերմաստիճան և սենյակային ջերմաստիճանից դեպի բարձր ջերմաստիճաններ: Յետազոտման առաջին ջերմաստիճանային տիրույթը կախված է հիմնարար մեխանիզմներից, որոնք պատասխանատու են TCO էլեկտրական հատկությունների համար: Յետազոտման երկրորդ ջերմաստիճանային տիրույթը կապված է հիմնականում կիրառական խնդիրների հետ: TCO հաղորդականության էլեկտրոնների աղբյուր, ինչպես արդեն նշվել էր, հանդիսանում են թթվածնային թափուր տեղերը, որոնք միգրացե հաղորդականության գոտու միևնույնի մոտ գոտում ստեղծում են դոնորային մակարդակներ: Թթվածնային թափուր տեղերի կոմպլեքսները ստեղծվում են ստեխիոմետրիայի խանգարման արդյունքում, երբ որոշակի պայմաններում սինթեզվում է թափանցիկ հաղորդիչ բարակ թաղանթը: Յամպատասխանաբար, TCO սինթեզման տարբեր պայմաններում սենյակային ջերմաստիճաններում փոխվում են դրա էլեկտրական

հատկությունները և վերջնական արդյունքում կփոխվեն նաև դրանց ջերմաստիճանային կախվածությունները: Այդ պատճառով հետազոտողները անցկացնում են էլեկտրական հատկությունների ջերմաստիճանային չափումներ, կախված TCO բարակ թաղանթների սինթեզման պարամետրերից (այդ թվում նաև լեգիրող խառնուրդի կոնցենտրացիայից): Նկ. 1.7-ում ներկայացված է TCO էլեկտրական հատկությունների ջերմաստիճանային կախվածության պատկերավոր օրինակ [42]: TCO նյութերում էլեկտրական հաղորդականության արժեքները, կախված ջերմաստիճանից, կարող են որոշվել որոշակի ֆիզիկական մեխանիզմների վրա հիմնված տեսական մոդելների միջոցով: Տեսական մոդելները, որոնք ունակ են բացատրել TCO էլեկտրական հաղորդականության ջերմաստիճանային կախվածությունը, ընտրվում են ըստ որոշակի ջերմաստիճաններում չափված մեծությունների մոտարկող կախվածության լավագույն համապատասխանության:



Նկ. 1.7. Ցիսկի օքսիդի էլեկտրական հատկությունների փոփոխությունը՝ կախված ջերմաստիճանից [42]:

TCO-ների էլեկտրական հաղորդականության ջերմաստիճանային կախվածությունը, որն ունի դիմադրության բացասական ջերմաստիճանային գործակից, կարող է բացատրվել լիցքակիրների

ջերմաստիճանային ակտիվացման մեխանիզմով: Այս դեպքում էլեկտրական հաղորդականության ջերմաստիճանային կախվածությունը կարող է ներկայացվել Արենիուսի կանոնի միջոցով [43]

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right), \quad (1.4)$$

որտեղ  $E$ -ն,  $A$ -ն և  $k_B$ -ն համապատասխանաբար հանդիսանում են ակտիվացման էներգիան, էքսպրնենցիալ գործակիցը և Բոլցմանի հաստատունը:

Ցածր ջերմաստիճանների դեպքում TCO-ի համար հաճախ օգտագործվում է Մոտտի թռիչքային հաղորդականության մոդելը [49, 50]

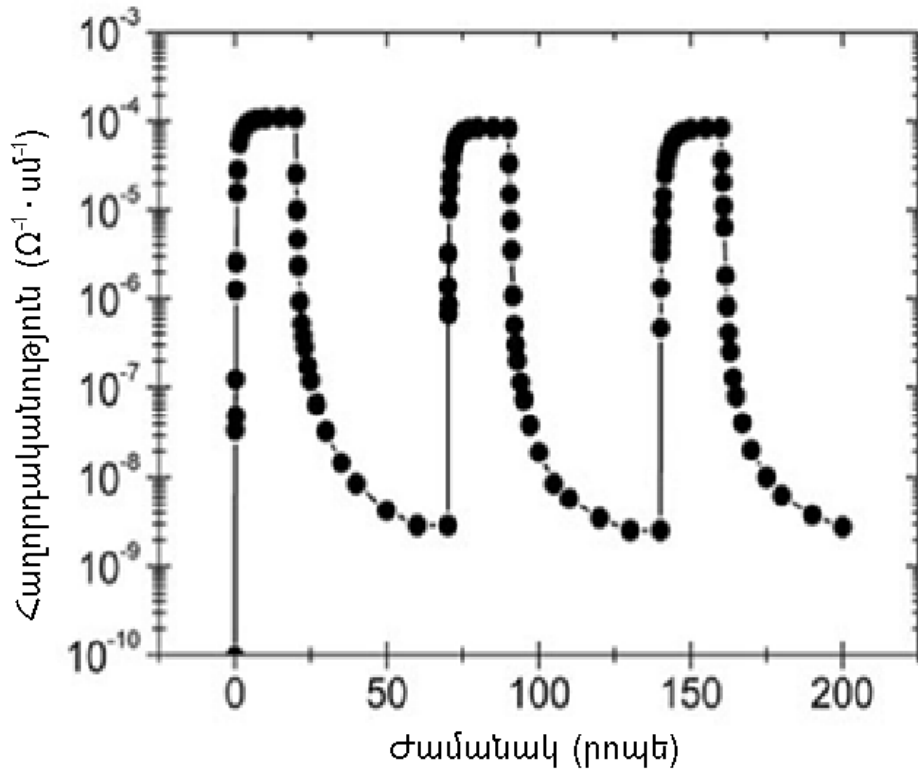
$$\sigma = \sigma_0 \exp\left[\left(-\frac{E}{k_B T}\right)^{\frac{1}{4}}\right], \quad (1.5)$$

որտեղ  $\sigma_0$ -ն հանդիսանում է էքսպրնենցիալ գործակիցը, իսկ  $T_0 = \frac{\gamma_p \alpha^3}{N_F}$ ,  $\alpha$ -ն տեղայնացման շառավիղն է,  $N_F$ -ն՝ Ֆերմի մակարդակում վիճակների խտությունը,  $\gamma_p$ -ն թվային գործակիցը: Խառնուրդային ատոմների կամ թթվածնային թափուր տեղերի միջոցով դոնորային խառնուրդով ուժեղ էլեգիրված TCO-ն հանդիսանում է այլասերված կիսահաղորդիչ և ունի հաղորդականության մետաղական կամ ջերմաստիճանային կախվածություն: Այս դեպքում էլեկտրոնների կոնցենտրացիան այլ է կախված ջերմաստիճանից կամ ընդհանրապես չի փոխվում, իսկ էլեկտրական հաղորդականությունը գլխավորապես պայմանավորված է էլեկտրոնների ջերմաստիճանային շարժունակության կախվածությամբ:

Գոյություն ունեն մշակման այլընտրանքային եղանակներ, որոնք խիստ ազդում են TCO էլեկտրական հատկությունների վրա: TCO արգելված գոտու էներգիայի մեծությանը համարիք ֆոտոնի էներգիայով ճառագայթումը հանդիսանում է ֆոտոհաղորդականության արդյունավետ եղանակ [40, 41]: Սակայն այդպիսի եղանակի դեպքում արդյունքը հանդիսանում է դարձելի որոշակի ռելաքսացիայի ժամանակով, որը կախված է TCO գազային միջավայրից և ջերմաստիճանից: TCO թաղանթների պահումը թթվածին պարունակող միջավայրում բերում է էլեկտրական



հաղորդականության նվազեցմանը: Ֆոտոճառագայթման և թթվածին պարունակող միջավայրում պահմամբ բարակ TCO թաղանթների էլեկտրական հատկությունների փոփոխմամբ պայմանավորված ազդեցությունները շատ օգտակար են թափանցիկ էլեկտրոնիկայի սարքավորումներում [46, 47]: Նկ. 1.8-ում ներկայացված են ցինկի օքսիդի համար էլեկտրական հաղորդականության կախվածությունը՝ կախված ֆոտոճառագայթումից և թթվածնապարունակող միջավայրերում պահումից:



Նկ. 1.8. Զինկի օքսիդի համար էլեկտրական հաղորդականության դինամիկ փոփոխությունը՝ կախված ֆոտոճառագայթումից և թթվածնապարունակող միջավայրերում պահումից [48]:

Չաջորդ կարևոր փաստ է հանդիսանում այն, որ ZnO կառուցվածքներում կարելի է նկատել սառեցված ֆոտոհաղորդականություն: Ազոտային և հելիումային ջերմաստիճաններում բոլոր կառուցվածքներում նկատվել է սառեցված ֆոտոհաղորդականություն: Գրականության մեջ քննարկվում են այդ երևույթի մի քանի մոդուլներ: Օրինակ, դելտա-շերտերով կառուցվածքներում այդ երևույթը նկատվում է, որպես կանոն, 100K-ից [51] ցածր ջերմաստիճաններում: Այն կապում են GaAs-ում DX-կենտրոնների դելտա-շերտերի հաղորդականության

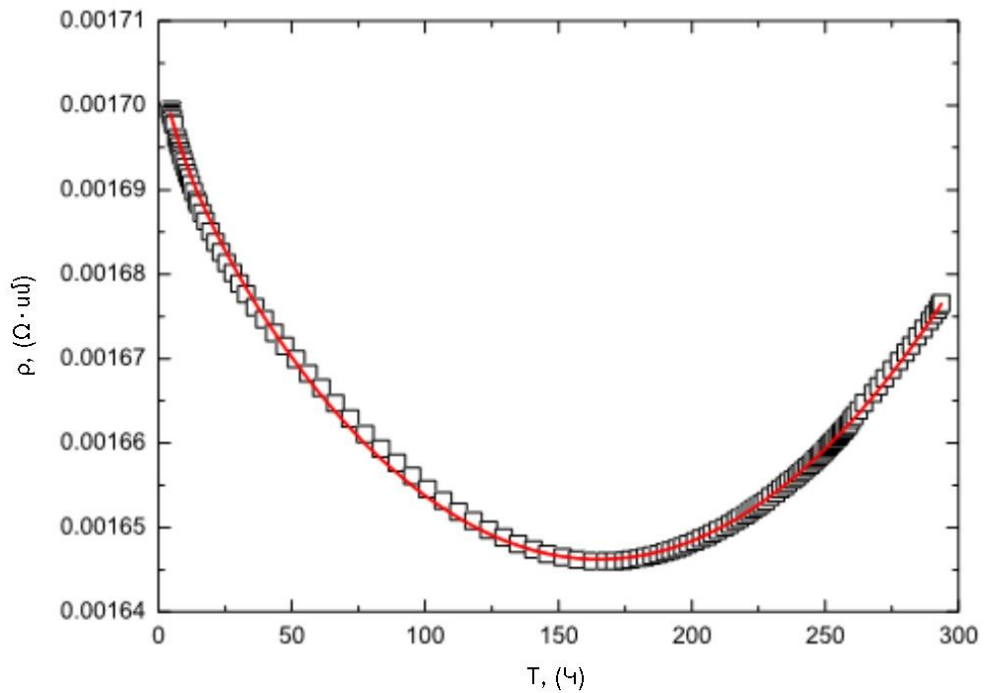
տիրույթով ռեզոնանսային այնիպիսի իոնացման հետ, որում \$ճոտոիոնացված էլեկտրոն-խոռոչային գույգերը բաժանվում են դելտա-շերտի ներդրված էլեկտրական դաշտում: Ընդ որում՝ այդ բաժանումն իրականում է այնպես, որ էլեկտրոնները մնում են արտենցիալային փոսում, իսկ խոռոչները գնում են ծավալ: Այս մոդելում, որտեղ մակերևույթը և կիսամեկուսիչ հարթակը հաշվի չեն առնվում, ի շնորհիվ էլեկտրոնների և խոռոչների տարածական բաժանման, ակնկալվում է ունենալ ոչ հիմնական լիցքակիրների ռելաքսացիայի լոգարիթմական երկար ժամանակ: Առաջարկվում է նաև սառեցված \$ճոտոհաղորդականության մեխանիզմ, որում կիսահաղորդչի մակերևույթային տիրույթի դելտա-շերտին գուգահեռ խոռոչային հաղորդիչ կանալի լուսավորման արդյունքում ենթադրվում է գոյացության առաջացում [51]: Բոլոր այս փաստերը վկայում են ներկայումս դելտա-շերտերի բնութագրման համակարգային մոտեցման բացակայության մասին և տարբեր հետազոտական խմբերի կողմից ստացված դելտա-շերտերի չափումների արդյունքների համարման դեպքում որոշակի անհամապատասխանության մասին: Եղել են GaAs-ում մեկական և երկուական դելտա-շերտերի կոնցենտրացիաների և շարժունակության համակարգային չափումներ 4.2 K-ից մինչև սենյակային ջերմաստիճանների տիրույթում: Երկակի շերտերում, ինչպես և նախորդիվ, դիտվում է շարժունակության շերտերի հեռավորությունի կախվածության մաքսիմում ազոտային և սենյակային ջերմաստիճանների դեպքում Սակայն հեղուկ հելիումի ջերմաստիճանում շարժունակությունը փորձարարական ճշգրտությամբ կախված չի եղել շերտերի միջև եղած հեռավորությունից: Այս փաստը հանդիսանում է արտենցիալային փոսի ձևի և հարևան քվանտային փոսերի շրջափակման պայմանների՝ ջերմաստիճանից ուժեղ կախվածության հետևանք: Լողացող կախարիչով կառուցվածքի ուղղակի փորձի միջոցով կարելի է նկատել, որ սառեցված \$ճոտոհաղորդականությունը, համենայն դեպս մասամբ, որոշվում է նմուշի լուսավորումից հետո մակերևույթային վիճակներում լուսագրգռիչ խոռոչների հետ հավասարակշռության մեջ գտնվող էլեկտրոնների վերադասավորման

արդյունքում: Փորձարարական վերլուծության հիման վրա այս աշխատանքում ներկայացված է այն եզրակացությունը, որ տարբեր դելտա-շերտերի համադրումը ավելի ճիշտ է իրականացնել ցածր ջերմաստիճաններում սառեցված ֆոտոհաղորդականության ռեժիմում, երբ ակնհայտ նվազում է մակերևութային պոտենցիալների ազդեցությունը քվանտային փոսիձևի վրա:

### **§1.5. ZnO թաղանթների հիման վրամշակված մեմրիստրային տարր**

Վերջերս հայտնի է դարձել, որ որոշ բարակ TCO թաղանթներ կարող են ունենալ հետաքրքիր էլեկտրաֆիզիկական հատկություններ, այնպիսիք, ինչպիսիք են մետաղ-կիսահաղորդիչ (M-S) կամ մետաղ-մեկուսիչ (M-I) կառուցվածքները [52]: Չարկ է նշել, որ դրանք հանդիսանում են նույնական, բայց, երբեմն, տարբեր գիտական հոդվածներում անվանվում են տարբեր կերպ: M-S-ն կամ M-I-ը թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդներում և այլ կիսահաղորդիչներում հանդիսանում են գիտական հետաքրքրության առարկա, քանի որ դրսևորվում են այդպիսի համակարգերի տրանսպորտային հատկությունների քվանտային յուրահատկություններում: Այսպիսի անցումները կարող են իրականանալ լայն ջերմաստիճանային տիրույթում և նկատվում են էգիրացված բարակ TCO թաղանթներում: Սակայն, վերջին հետազոտությունները ցույց են տվել, որ այդպիսի անցումները կարող են տեղի ունենալ այնպիսի մաքուր TCO թաղանթներում, ինչպիսիք են ինդիումի օքսիդը կամ ցինկի օքսիդը ցածր ջերմաստիճաններում: Որպեսզի հնարավոր լինի դիտարկել M-S-ն կամ M-I մաքուր օքսիդային կիսահաղորդիչներում, անհրաժեշտ է սինթեզի պայմանների սահմանում: M-S-ն կարող է բացատրվել չկարգավորված պինդ մարմնում հաղորդականության համար առաջարկվող մոդելի օգնությամբ [50]:

Նկար 1.9-ում ներկայացված է մետաղ-կիսահաղորդիչ անցումը, որը հայտնաբերվել է ցածր ջերմաստիճաններում բարակ չէգիրված ZnO թաղանթի համար:



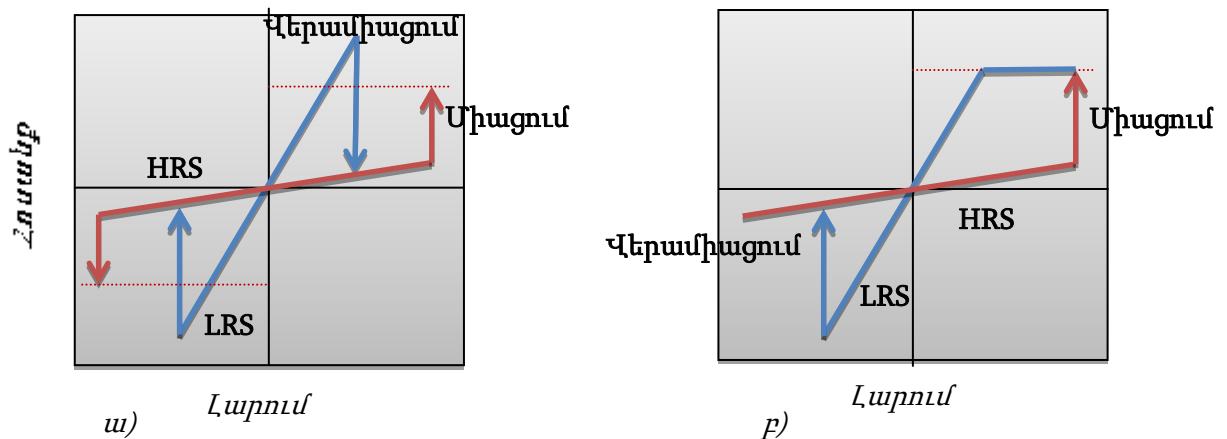
Նկ. 1.9. Տեսակարար էլ եկտրական դիմադրության ջերմաստիճանային կախվածությունը, որում նկատվել է մետաղ-կիսահաղորդիչ անցումը: 150 K ջերմաստիճանով անցման ցիկլի օքսիդ [42]:

Հիմնարար տարրական «մեմրիստորը» (հիշողության տարրը) առաջին անգամ առաջարկվել է 1971թ [63]: Այնուամենայնիվ, հիպոթետիկ սարքը հիմնականում ներկայացվել է որպես մաթեմատիկական անարդյունավետություն՝ չստանալով պատշաճ աջակցություն: 30 տարի անց, HP-ի գիտնականներին հաջողվեց ստեղծել իրական ախտորոշման մեմրիստորի օրինակ [64], որը գրավեց մեծ ուշադրություն՝ խոստանալով ապագայում մեմրիստորային հեղափոխություն: Որպես ապագայի մեմրիստորի կարևոր կիրառություն, ռեզիստորային պատահական հասանելիության հիշողությունը (ReRAM)՝ հիմնված մետաղական օքսիդների անցման վրա, սկսեց լայնորեն հետազոտվել որպես հաջորդ սերնդի կայուն հիշողություն [65, 66]:

Հիշողության երևույթները կարող են իրականացվել երկու տարբեր կայուն վիճակների անցումային վարքի միջոցով, որն առաջանում է ցածր իմպուլսային լարման շնորհիվ: Ներկայացվել են ReRAM սարքերի համար բազմաթիվ թեկնածու նյութեր, ինչպիսիք են երկակի անցմամբ մետաղ-օքսիդային նյութերը՝  $TiO_2$

[67], NiO [68], Cu<sub>2</sub>O [69], ինչպես նաև օքսիդային բարակ թաղանթները՝ չեգիրված SrTiO<sub>3</sub> [70] և չեգիրված մանգանիտներ [71]:

Օքսիդներում անցումային մետաղները (HfO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NiO) արտահայտվում են հակադարձ ռեզիստիվ փոխանցատման երևույթով, որի հիմքում ընկած է որոշակի ամպլիտուդով լարման դեպքում դիէլեկտրիկի հաղորդականության փոփոխումը մինչև որոշակի մեծություներ (միաբևեռ անցում), որոշ դեպքերում էլ որոշակի ամպլիտուդով, բայց լարման բևեռականության փոփոխումը (երկբևեռ անցում) (նկ. 1.10):



Նկ. 1.10. Միաբևեռ ռեզիստիվ (ա) և երկբևեռ ռեզիստիվ (բ) մետաղ-մեկուսիչ-մետաղ հիշողության տարրերի V-I-երը:

Վերջերս, ZnO բարակ թաղանթներն ահռելի հետաքրքրություն են գրավել որպես խոստումնալից կայուն անցումային նյութեր, ինչպիսիք են չեգիրված ZnO-ն [72–74], S- և Co-չեգիրված ZnO-ն [75], և Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O [76, 77]: Մասնավորապես, վերջերս, հայտարարվել էր թափանցիկ ReRAM-ի ստեղծման մասին, որոնք հիմնված են ITO էլեկտրոդների միջև տեղավորված չեգիրված ZnO-ի վրա, որոնք ունեն միջինը 83% հաղորդականություն տեսանելի տիրույթում,

հետևաբար ապահովում են տեսանելիության ReRAM նյութի և սարքավորման միջև: Այնուամենայնիվ, ITO նյութերը շատ թանկարժեք են և ունեն ցածր ջերմակայունություն: ITO-ները կատարյալ էլեկտրոդներ չեն ZnO թափանցիկ ReRAM-ների համար: ITO-ի խոստումնալից այլընտրանք է ZnO:Al, որը ենթադրվում է, որ ստացվել է բնական միջոցներից դրա ծայրահեղ արտադրման հեշտության, էժանության, ոչ թունավորության, բարձր ջերմակայունության և քիմիակայունության պատճառով [78–81]: Մասնավորապես, հիմնվելով ZnO հոմոգեն կառուցվածքների վրա, սարքը, հավանաբար, կունենա պոտենցիալ հիշողության բարելավման հարցում, շնորհիվ վանդակավոր դասավորությամբ պայմանավորված առավելությամբ: Թափանցիկ էլեկտրոնիկայի համար, թափանցիկ էկրանը կարող է ինտեգրվել թափանցիկ ReRAM սարքի հետ միասին և արտադրվել համակարգի դաս` ապակու վրա: Թափանցիկ ReRAM-ը չի նախատեսված կոնվենցիոն Si-ի վրա հիմնված հիշողության տեխնոլոգիայի փոխարինման համար, բայց դրա պոտենցիալը նորարար էլեկտրոնային կիրառություններում մոտ ապագայում է: Հետևաբար, բարձր տեսանելիությունով հիշողությամբ թափանցիկ ներդրված համակարգը կարող է դառնալ ապագա էլեկտրոնային սարքավորումների պարտիզման [82]:

Երկբևեռ և միաբևեռ կայուն փոխանջատվող (HRS և LRS) ռեժիմների համատեղ գոյությունը դիտարկվել է վանդակավորվել է գիրված ZnO բազմաբյուրեղային բարակ թաղանթի վրա, որն արտադրվել է Չոլ-գելի եղանակով: Այս երկու փոխանջատվող ռեժիմները կարող են ակտիվացվել առանձին-առանձին կախված տարբեր գործող հոսանքներից ( $I_{cc}$ ) առաջին և արումային արագ պրոցեսում. արտադրված սարքը ցույց է տալիս վերարտադրվող HRS վարք ցածր գործող հոսանքի դեպքում  $I_{cc}=0.1$  մԱ, երբ բարձր  $I_{cc}=0.01$  A հոսանքի դեպքում, LRS վարքը դիտվում է էլեկտրաձևավորումից հետո: HRS և LRS փոխակերպումը դարձելի է: Անցումային կանալի ձևավորման էլեկտրաքիմիական թթվակարգավորիչ պոտենցիալային ռեակցիաներով և ջերմային ազդեցություններով եղանակը առաջարկվել է բացատրելու համար, համապատասխանաբար, HRS և LRS վարքերը:

## **ԳԼՈՒԽ 2. Li-ՈՎ ԵՎ Ga-ՈՎ ԼԵԳԻՐՎԱԾ ZnO ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ**

### **§2.1. ZnO թաղանթների ստացման էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակի և ջերմամշակման նկարագրումը**

Բարակ օքսիդացված թաղանթների վակուումային նստեցումը կարելի է իրականացնել տարբեր եղանակներով՝ կաթոդային նստեցում, ռադիոհաճախային, ջերմային, էլեկտրոնաճառագայթային և այլն [83, 84, 85]: ZnO թաղանթներ ստանալու համար լայն կիրառություն է գտել արգոնային ճնշմամբ կաթոդային նստեցման եղանակը կամ դրա արդիականացված ռադիոհաճախային նստեցման եղանակը: Սակայն, մինչև վերջին ժամանակները ZnO թաղանթներ ստանալու համար էլեկտրոնաճառագայթային նստեցման տեխնոլոգիան չի կիրառվել: Այս աշխատանքում ZnO բարակ թաղանթներ ստանալու համար մենք օգտագործել ենք էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակը:

Ցինկի օքսիդը ցնդում է 2000<sup>o</sup>C ջերմաստիճանի տակ [86], այդ իսկ պատճառով ուղիղ օհմական ջեռուցումը հանգեցնում է ZnO թիրախների քայքայման և տակդիրի վրա ստացվում է մետաղական ցինկի թաղանթներ: Այդ կանխարգելու համար նստեցումը պետք է

կատարվի 0.001-0.01 թթվածնային ճնշման տակ, սակայն դաբաձականին դժվար պրոցես է: Եթե հաշվի առնենք, որ ցնդման էներգիան 0.5 էՎ-ի կարգի է, ապա 0.5 էՎ-ից շատ ավելի մեծ էներգիայով էլ եկտրոններով թիրախների ռմբակոծումը, առանց ZnO-ի քայքայման, կարող է հանգեցնել մոլեկուլների ցնդման, հետևաբար՝ թաղանթների նստեցման: Այդ դեպքում թիրախների տաքացումը կանխարգելու համար, մենք ինտենսիվորեն սառեցնում ենք թիրախները:

Մեկ այլ կարևոր տեխնիկական պարամետր է հանդիսանում տակդիրների ջերմաստիճանը: Կարգավորելով տակդիրների ջերմաստիճանը՝ կարելի է ղեկավարել ZnO թաղանթների աճի արագությունը: Ինչպես ցույց են տվել տարբեր փորձերը, նստեցման ժամանակ սառը տակդիրների վրա Zn նստում է մետաղի տեսքով:

150-500°C ջերմաստիճանով տակդիրների դեպքում տեղի է ունենում ZnO-ի նստեցում, սակայն, այս դեպքում աճի արագությունը նվազում է, նստեցման ժամանակը մեծանում է և թաղանթի որակը հնարավոր է լինի ավելի վատ: Այդ պատճառով անհրաժեշտ է կատարել տակդիրի ջերմաստիճանի ճիշտ ընտրություն: Բարձր որակի թաղանթները ստացվել են նստեցման այն դեպքում, երբ տակդիրները եղել են անշարժ:

Էլեկտրոնաճառագայթային նստեցումը իրականացվել է BY-1 արդյունաբերական սարքավորման օգնությամբ՝ կիրառելով 6-12 ԿԷՎ էներգիայով էլեկտրոնային ճառագայթ: Էլեկտրոնների փունջը կենտրոնացվել է 12 մմ տրամագծով և 6.5 մմ հաստությամբ թիրախներում: Տակդիրը, որում իրականացվել է նստեցումը, գտնվել է թիրախից 120 մմ հեռավորության վրա: Թիրախի մակերևույթը, որից իրականացվել է նստեցումը և տակդիրի մակերևույթը միմյանց նկատմամբ կազմել են 20° անկյուն: Տակդիրի ջերմաստիճանը կարգավորվել է 20÷230°C±1° միջակայքում: Թաղանթի ջերմաստիճանի ղեկավարումը և տաքացման կարգավորումը իրականացվել է РИФ-101 համակարգի միջոցով: Թիրախի սառեցումը իրականացվել է ջրային սառեցման համակարգով, որը թույլ է տալիս էլեկտրոնային փնջի ընկման տիրույթում իրականացնել թիրախի տեղային տաքացում և նյութի փոշիացում: Խցիկում նստեցումը տեղի է ունեցել 10<sup>-5</sup> մմ



մնացորդային ճնշման տակ: Տակդիրների մաքրումը տեղի է ունեցել արգոնային մթնոլորտում՝ պակաս և պարպման եղանակով:

Ցինկի օքսիդը լայն կիրառություն ունի ռադիոէլեկտրոնիկայում և օպտիկայում, որպես ինքնաակտիվացվող լյումինաֆոր: Լյումինաֆորի արձակած լույսի գույնը կապույտ-կանաչ տիրույթում է: Ճառագայթումը բնութագրվում է երկու մաքսիմումով՝  $\lambda=0.385$  մկմ և  $\lambda=0.505$  մկմ: Նստեցման ժամանակ էլեկտրոնային փնջի հոսանքը հասնում է այն արժեքին, որի դեպքում թիրախի կանաչ գույնով լուսարձակումը էլեկտրոնային փնջի ընկնման տիրույթում փոխվում է կապույտ գույնի լուսարձակման: Այդպիսի ռեժիմով նստեցման եղանակով ստացվել են որակապես ավելի լավ թաղանթներ: Արդյունքում ստացվել են թափանցիկ և (0002)  $3\div 5^\circ$  կիսալայնույթային ռենտգենյան գազաթով կողմնորոշված թաղանթներ: Մետաղական ցինկը ռենտգենյան հետազոտման (XRD) և օպտիկական միկրոսկոպի օգնությամբ չի հայտնաբերվում: Միաբյուրեղ թաղանթների նստեցման աճի կամ կետային աճի արագությունը կազմել է 1մկմ/ժամ, և փոխվել է տակդիրի ջերմաստիճանի կամ էլեկտրոնային փնջի էմիսիոն հոսանքի փոփոխման միջոցով:

Ցինկի օքսիդի թիրախները պատրաստվել են փոշենման միացության սեղման միջոցով և նրա հետագա ձուլմամբ: Օգտագործվել է գերմանական “Merck” և ռուսական “Lisma” ընկերությունների ZnO-ի փոշիներ: Փոշին սեղմվել է 20 մմ տրամագծով ճնշակաղապարով և  $10^5$  կգ ուժ ունեցող հատուկ սեղմիչով: Օպտիմալ է համարվել 200 կգ/սմ<sup>2</sup> ճնշումը: Թիրախներն ունեցել են գլանաձև տեսք՝ 12մմ տրամագծով և 6մմ բարձրությամբ: Ստացված կոճակը ջերմամշակվել է 4 ժամ 1300°C ջերմաստիճանով օդում: Ջերմաստիճանի բարձրացումը և իջեցումը իրականացվել է բավականաչափ դանդաղ՝ 12 ժամվա ընթացքում: Դրանից հետո ZnO կոճակային թիրախը ջերմամշակվել է 30 րոպե՝ 1400-1600°C ջերմաստիճանով վակուումում: Միաժամանակ հսկվել է արսորբացված գազի գումարային քանակը: Պրոցեսի ավարտից հետո ստուգվել է թիրախի խտությունը (թիրախը համարվել է պիտանի, եթե խտությունը կազմել է  $g=5.7$  գ/սմ<sup>3</sup> միաբյուրեղի խտության 96-100%-ը:

Օգտագործելով ոչ բավարար խտությամբ թիրախներ, որոնցում առկա են կուտակված թթվածնի միկրոպայթյունների հետևանքով առաջացած խոռոչներ, կտրուկ փչանում է թաղանթների որակը: Նստեցման համար ստացված թիրախները ունեցել են մանր գրանուլացված (մանրահատիկային) բազմաբյուրեղային կառուցվածք:

Որպես տակդիր օգտագործվել է հարթ-գուգահեռ սապֆիրե թիթեղներ ( $Al_2O_3$ ), որոնք օգտագործվում են միկրոէլեկտրոնիկայում: Տակդիրները պատրաստվել են AO3T “Crystal” գործարանում: Տակդիրները հղկվել են նախև առաջ ալմաստե փոշիով և հետո բորի կարբիդե փոշիով: Դրանից հետո թաղանթներն անցել են քիմիական հղկում՝ ալմաստե փոշու մնացորդներից մաքրելու համար: Տակդիրներն ունեցել են (0002) կողմնորոշում: Այդպիսի տակդիրները օգտագործվել են տակդիրի հարթությանն ուղղահայաց C առանցքով ZnO թաղանթներ ստանալու համար:

Թաղանթների տակդիրները մինչև նստեցումը պետք է խնամքով լվացվեն  $NH_4OH$ -ի մեջ, հետո  $HCl$  լուծույթի մեջ, որից հետո չորացվեն:

Ցինկի օքսիդը բնութագրվում է ստեխիոմետրական շեղմամբ, որի դեպքում ցինկի ավելցուկ կա կամ որևէ չին է՝ թթվածնի պակաս: Ինչպես ցույց են տվել բազմաթիվ փորձերը, բյուրեղական ցանցում ցինկի ավելցուկը պայմանավորված է միջհանգույցային ատոմներով կամ թթվածնային թափուր տեղերով: Ստեխիոմետրիայի աստիճանը կարող է փոխվել, ինչպես թաղանթների ստացման պայմանների փոփոխմամբ, այնպես էլ, չորացումից հետո բարձր ջերմաստիճանում մշակելով: Դրա համար պատրաստվել է ջերմամշակման հատուկ վառարան՝ թթվածնի կամ օդի հոսքով: Ջերմամշակման ժամանակ ջերմաստիճանը ընտրվել է՝ ելնելով սեփական թերությունների դիֆուզիայի տվյալներից:

Պիեզոէլեկտրական ZnO բյուրեղները (6 մմ համաչափությամբ) պատկանում են լայնաշերտ կիսահաղորդիչների դասին և այդ պատճառով դրանք պետք է ունենան սեփական հաղորդականություն: Սակայն, ստացման պայմաններից կախված, բյուրեղային թաղանթների հաղորդականությունը փոխվում է  $10^{+3} \div 10^{-5}$  (Օհմ·սմ)<sup>-1</sup>

տիրույթում, որը պրակտիկորեն ամբողջովին ծածկում է նեղշերտ և լայնաշերտ կիսահաղորդիչների հաղորդականության տիրույթը: Այդ փաստը ներկայացնում է մեծ հետաքրքրություն, և մինչև այժմ չկան դրա բավականաչափ ուսումնասիրություններ: Անոմալ բարձր հաղորդականությունը բացատրվում է կետային թերությունների առկայությամբ: Հիմնականում այդ ճոտկի թերությունները գտնվում են թթվածնային ենթացանցում: Լիցքակիրների կոնցենտրացիան կապված ստեխիոմետրիայի հետ ճիշտ նույնքան է, որքան թթվածնային ենթացանցում թափուր տեղերը, ինչը հիմնավորվել է բազմաթիվ հետազոտություններում [87]: Ընդհանուր նկատառումներից ելնելով կարելի է առաջարկել, որ ենթացանցի թթվածնային թափուր տեղերը և միջհանգույցային Zn-ի ատոմները պետք է ստեղծեն դոնորային մակարդակներ, որոնցով տեղի է ունենում լիցքակիրների տեղաշարժը: Սակայն, այս մակարդակները չեն գտնվում ZnO թաղանթների կլանման սպեկտրում: Այդ թաղանթների էլեկտրական հատկությունները հետաքրքրություն են ներկայացնում ինչպես բարձր հաղորդականությամբ թափանցիկ նյութ պատրաստելու համար (որը աշխատում է ԳԲՀ տիրույթում), այնպես էլ այդ նյութում տեղի ունեցող ֆիզիկական պրոցեսների տեսանկյունից:

Քանի որ թաղանթների ստացման ռեժիմները և դրա հետագա ջերմամշակումը ազդում է թաղանթի ստեխիոմետրական կառուցվածքի վրա, ապա տեխնիկական պարամետրերի փոփոխությունը թույլ է տալիս ղեկավարել տեսակարար դիմադրությունը լայն տիրույթում: Գոյություն ունեն լրացուցիչ գործոններ, որոնք առաջացնում են թաղանթների տեսակարար դիմադրության փոփոխություն: Դրանցում ներառված են չափային երևույթները և թաղանթների մակերևույթներում տարբեր գազերի կլանումը: Սակայն, ավելի մեծ հետաքրքրություն և տեխնիկական կարևորություն ունի հաղորդականության ղեկավարումը տարբեր մետաղների լեգիրման միջոցով: ZnO թաղանթները մետաղներով լեգիրելու տեխնոլոգիան թույլ է տալիս միևնույն տակդիրում ստանալ տարբեր մեծության և տեսակի հաղորդականության ZnO թաղանթներ:

Վակուումում էլեկտրոնաճառագայթային նստեցման եղանակով ստացված ZnO թաղանթները բնութագրվում են էական ոչ ստեխիոմետրիկական կազմով և սեփական արատների մեծ կոնցենտրացիայով, որոնցով որոշվում են լիցքի տեղափոխման արոցեսները: Ինչպես բազմաթիվ մետաղական օքսիդների դեպքում, այնպես էլ էլեկտրոնաճառագայթային եղանակով թիրախների գոլորշիացման ժամանակ տեղի է ունենում ZnO-ի մասնիկների կազմալուծում: Արդյունքում, երևում է ցինկի ավելցուկ կամ որևէ թթվածնի անբավարարություն: Այդպիսի թաղանթներն ունեն  $2 \cdot 5 \cdot 10^2$  (Օհմ·սմ)<sup>-1</sup> հաղորդականություն: Բարձր հաղորդականությունը կապված է ցինկի ատոմների միջցանցային առկայության կամ թթվածնային թափուր տեղերի հետ, որոնք կատարում են դոնորային կենտրոնների դեր: Այդպիսի կենտրոնները արգելված գոտում ունեն տեղայնացված մակարդակներ և հաղորդականությունը իրականացվում է թռիչքային հաղորդականության մեխանիզմով: Վակուումային նստեցման եղանակով ստացված այդպիսի ZnO թաղանթների  $10^2 \div 10^3$  (Օհմ·սմ)<sup>-1</sup> բարձր հաղորդականությունը բացառում է այդ թաղանթների օգտագործումը, որպես էլեկտրաօպտիկական նյութ: Այս թաղանթները կարող են օգտագործվել որպես թափանցիկ էլեկտրոդներ՝ էլեկտրաօպտիկական մետաղներում լարում կիրառելու համար:

Որպեսզի բարձր դիմադրությամբ թաղանթներից պատրաստենք ցածր դիմադրությամբ թաղանթներ և հարմար լինի դրանք օգտագործել որպես էլեկտրաօպտիկական նյութեր, կիրառվում են տեսակարար դիմադրությունը մեծացնելու միջառք եղանակներ, հատկապես տարբեր միջակայքերում ջերմամշակումը և տարբեր մետաղներով լեգիրումը: Աշխատանքում իրականացվել է օդում ջերմամշակում KO-14 վառարանում, 1 ժամ տևողությամբ և 500-600°C ջերմաստիճանում: Ջերմամշակման տևողությունը որոշվում է թթվածնային դիֆուզիայի հավասարակշռության վերականգման ժամանակով: ZnO թաղանթների ջերմամշակումը օդում ներառում է իր մեջ երկու արոցես, որոնք ազդում են հաղորդականության վրա. առաջինը՝ դիֆուզիան (թթվածնի և ազոտի), երկրորդը՝ սեփական

ջերմամշակումը (ֆոնոնային ցանցերի կարգավորումը) [88, 89, 90]: Այդ պատճառով հաղորդականության ռեզիստիվության բացի լրացուցիչ հսկվել է անկյան կիսալայնության տատանումը՝ XRD-ի դեպքում: Եթե մինչև 500°C-ում ջերմամշակումը չի բերում այդ մեծության փոփոխությանը, ապա 800°C-ում ջերմամշակման դեպքում այդ անկյունը նվազում է մինչև 1.8 անկյունային աստիճանով: Կարելի է ենթադրել, որ մինչև 500°C ջերմաստիճանում հիմնական դիֆուզիան տեղի է ունենում գազային ճնշման տակ, իսկ 600°C-ից բարձր ջերմաստիճանում սկսվում է ֆոնոնային վանդակավոր ցանցի մեխանիզմը:

Այս եղանակը, օգտագործելով տարբեր ջերմամշակման ռեժիմներում, կարելի է ղեկավարել ZnO բարակ թաղանթների հաղորդականությանը լայն տիրույթում: Թթվածնային միջավայրում ջերմամշակումը բերում է հաղորդականության նվազեցման, իսկ վակուումում տեղի ունեցող ջերմամշակումը բերում է հաղորդականության աճի: Անհրաժեշտ է նշել, որ հաղորդականության ղեկավարման ջերմամշակման եղանակն ունի էական անբավարարողունակ՝ անհնար է կառուցել այդպիսի պարամետրի տոպոլոգիական նկարը, որպես հաղորդականության, որը շատ կարևոր է ինտեգրալային օպտիկայի և ֆոտոնիկայի համար:

## **§2.2. Ակցեպտորային (Li) և դոնորային (Ga) խառնուրդներով լեգիրված ZnO թաղանթների ստացումը**

Գոյություն ունի թաղանթների լեգիրման երկու եղանակ: Առաջին եղանակում լեգիրված խառնուրդը ներմուծվում է թիրախում [91], որից տեղի է ունենում նստեցում: Երկրորդ եղանակի դեպքում մաքուր ZnO թաղանթի մակերևույթին վակուումային նստեցման եղանակով նստեցվում է բարակ լեգիրվող մետաղը ~ 10–100 նմ հաստությամբ: Չետագայում տեղի է ունենում դիֆուզիան ջերմամշակում 1400-1500°C ջերմաստիճանում, և այդ պատճառով բարակ թաղանթները հնարավոր է միակողմանի լեգիրել ամբողջ հաստությամբ:

Արդյունքում, կախված լեգիրվող խառնուրդի ընտրության ռեզիստիվության կոնցենտրացիայից, թաղանթների հաղորդականությանը

պարզվում է 3-4 կարգով մեծ է (կամ փոքր է), քան չլեգիրված թաղանթներում: Իոնային մետաղների լեգիրման, ինչպես նաև տարբեր միջավայրերում ջերմամշակման միջոցով կարելի է ղեկավարել հաղորդականությունը  $10^{-3}$  մինչև  $10^6$  (Օհմ·սմ)<sup>-1</sup> լայն տիրույթում:

Ուղեկցվող ջերմամշակմամբ թերմոդիֆուզիայի հետևանքով մակերևույթի որակի վատացումը կարող է եականորեն իջեցնել այս գործընթացի տեխնոլոգիական արժեքը՝ ինտեգրալային օպտիկայում կիրառելու համար: Եթե ինտեգրալային օպտիկայի տարրերի կառուցման համար անհրաժեշտ է ստանալ սենդվիչ տեսակի հաղորդիչ/մեկուսիչ/հաղորդիչ արդիականացված ZnO թաղանթներ, ապա ավելի հարմար տեխնոլոգիական գործընթաց կլինի իոնային մետաղների լեգիրումը: Այս աշխատանքում որպես լեգիրվող խառնուրդներ ընտրվել են Li-ի և Ga-ի իոնները: Յայտնի է [92], որ Li-ի իոնները փոքր քանակի դեպքում ճնշում են հաղորդականությանը: Խառնուրդի կոնցենտրացիայի ավելացումը բերում է հաղորդականության տեսակի փոփոխության՝ էլեկտրոնային ից խոռոչային [93]: Ga-ի [94] խառնուրդի համար կա օպտիմալ կոնցենտրացիա, որը մեծացնում է ZnO թաղանթների հաղորդականությունը: Մենք նպատակահարմար ենք համարել էլեկտրոնաճառագայթային եղանակով պատրաստել ZnO լեգիրված թաղանթներ՝ ներմուծելով խառնուրդը թիրախի մեջ:

Բոլոր թիրախները պատրաստվել են պինդփուլային սինթեզի եղանակով՝ ավելացնելով ZnO-ում համապատասխան լիգանդներ: Ելքային բաղադրիչները մաքրվել են ագաթային լուծույթով՝ ոչ պակաս, քան 5 ժամ: Յամասեռացումը իրականացվել է ջրազրկված սպիրտում: Չորացված արտադրանքը (90°C, 1 ժամ օդում) սեղմվել է սեղմող ձևակաղապարում դժվարահալ ծանր մետաղների 500 կգ/սմ<sup>2</sup> ճնշման տակ և ջերմամշակվել է KO-14 վառարանում (ջերմային միջակայքը եղել է 800-1400°C), որպեսզի ապահովվի պինդփուլի սինթեզ: Ներկայացված եղանակը ապահովում է ամբողջական սինթեզ և խառնուրդի համասեռ բաշխում:

Գալիումը (Ga) լեգիրելու համար ներմուծվել է 0.8%-անոց և 2%-անոց գալիումի օքսիդներ (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): Թիրախների ստացումը

ուսումնասիրվել է XRD եղանակով: Համաձայն այս ուսումնասիրությանը ունենի երևացել են բոլոր գագաթները, որոնք բնորոշ են ZnO-ի կերամիկային ( $a=1.223$ ,  $b=0.304$ ,  $c=0.508\text{nm}$ ,  $2\theta=33.78^\circ$ ,  $36.02^\circ$ ): Բացակայում են դիֆրակցիոն գագաթերը՝ պայմանավորված  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  միացությանը: Սակայն, ռենտգենյան ուսումնասիրման ժամանակ այդ թիրախների համար երևում են  $d=2.545\text{\AA}$  և  $2.499\text{\AA}$  միջհարթային հեռավորությանը չնույնականացվող գագաթներ: Հնարավոր է, այդ գագաթները պայմանավորված են գալիումի հեմիոքսիդով ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) կամ  $\text{Ga}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}$  պինդփուլային խառնուրդով: Հետագայում նույն տեխնոլոգիայով թիրախները սեղմվել են և ջերմամշակվել են  $800^\circ\text{C}$ -ով վառարանում: Ռենտգենյան դիֆրակտոգրամմաներում նկատվել են ZnO-ի միացության բոլոր գագաթները և չեն նկատվել  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  միացության գագաթները: Ստացված թիրախները եղել են համափուլ:

Li-ը լեգիրելու համար ZnO-ում ավելացրել են լիթիումի օքսիդ ( $\text{Li}_2\text{O}$ ), հետո սովորական տեխնոլոգիայով թիրախը սեղմվել և ջերմամշակվել է վառարանում: Պատրաստվել են տարբեր կոնցենտրացիաներով կոճակներ, որոնք պարունակում են Li-ի 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 5.0 և 10.0 %-անոց խառնուրդներ: Համեմատած նոմինալ մաքուր նմուշների հետ ( $\sim 0.02 \text{\AA}$ , որը կազմում է 0.4%)՝ ստացվել են ցանցի պարամետրերի ոչ մեծ նվազեցմամբ համափուլ թիրախներ: Li-ի ներմուծումը փոխում է գագաթների ինտենսիվության հարաբերակցությունը: Li-ի կոնցենտրացիայի մեծացումը բերում է գագաթի ինտենսիվության միատեսակ իջեցման, համարյա անհետացման, 10% կոնցենտրացիայի դեպքում:

Վակուումային տեխնիկայում մեր կողմից ընդունված էլեկտրոնաճառագայթային գոլորշիացման եղանակով նստեցման փուլում իրականացվել է լեգիրված ZnO թաղանթների ստացումը: Դրա համար սինթեզվել են տրված կոնցենտրացիայով լեգիրվող խառնուրդներով թիրախներ: Ենթադրվում է, որ թաղանթում խառնուրդի կոնցենտրացիան պարտադիր չէ, որ համընկնի թիրախում խառնուրդի կոնցենտրացիայի հետ: Հեշտությամբ ցնդող Li-ի խառնուրդի համար, օրինակ՝ բացառված չէ, որ Li-ի պարունակությունը թաղանթում կշատանա: Այդ նույն պատճառով

այդ պարունակությունը կարող է քչանալ ջերմամշակման պրոցեսի ժամանակ: Թաղանթներում խառնուրդների հավասարաչափ բաշխվածության ապահովման հիմնական պահանջը հանդիսանում է թիրախի համատեռությունը և համափոփությունը:

ZnO թաղանթի դիմադրությունը ղեկավարելու համար սինթեզվել են Li-ի (հաղորդականությունը նվազեցնելու համար) և Ga-ի (հաղորդականությունը մեծացնելու համար) խառնուրդներով լեգիրված թաղանթները: Օգտագործվել են 0.1, 0.5, 0.6, 0.8, 1, 5 և 10%-անոց Li-ի և 0.7 ու 2%-անոց Ga-ի պարունակությամբ ZnO-ի թիրախներ:

Նստեցումը, ինչպես նախկինում, իրականացվել է էլեկտրոնաճառագայթային եղանակով՝ BY-1A համակարգի միջոցով: Նստեցման տեխնոլոգիական պայմանները նույնն են եղել, ինչ-որ մաքուր ZnO թաղանթի աճի ժամանակ: Թաղանթի աճի արագությունը որոշող հիմնական պարամետրերը մեր փորձերում հետևյալն են.

- սապֆիրե տակդիրի ջերմաստիճանը (ինչքան բարձր է տակդիրի ջերմաստիճանը, այնքան ցածր է թաղանթի աճի արագությունը),
- էլեկտրոնային փնջի էմիսիայի հոսանքը (ինչքան բարձր է էմիսիայի հոսանքը այլ հավասար պայմաններում, այնքան ուժեղ է թիրախի տեղային տաքացումը և, հետևաբար, բարձր է աճի արագությունը):

Փորձերը ցույց են տվել, որ օպտիկայում կիրառելի որակով թաղանթներ ստանալու համար օպտիմալ աճի արագությունը 0.8-1A<sup>0</sup>/վ է:

BY-1A համակարգում հիմնական տեխնոլոգիական պարամետրերը պահպանելու համար, այսինքն՝ տակդիրի ջերմաստիճանը, էմիսիայի հոսանքը և այլն, թաղանթի աճի արագությունը լեգիրված թիրախներից ստացվել է մոտավորապես 2 անգամ մեծ, քան նոմինալ մաքուր ZnO թաղանթի նստեցման ժամանակ: Սա, ըստ երևույթին բացատրվում է նրանով, որ լեգիրվող մետաղները կատարում են կարգավորիչ դեր և այդպիսի թիրախները քիչ են հակված քայքայվելու էլեկտրոնային ճառագայթի ռմբակոծման ժամանակ: Կոնդենսացման բավականին մեծ արագությունը բերում է խճանկարային վեցանկյուն կառուցվածքով բազմաբյուրեղային



թաղանթների ձևավորման, իսկ ցածր արագությունը բերում է բազմաթիվ կետային թերություններով թաղանթների ձևավորման: Որպեսզի խուսափենք դրանից, պետք է պահպանել աճի արագությունը տրված սահմաններում: Դրան պետք է հասնել ղեկավարելով հիմնականում վերը նշված երկու տեխնոլոգիական պարամետրերը՝ տակդիրի ջերմաստիճանը և թիրախի տաքացման ջերմաստիճանը, այսինքն՝ էլեկտրոնային փնջի էմիսիոն հոսանքը: Համաձայն մեր ուսումնասիրության ավելի նպատակային է համարվում թիրախի տաքացման ջերմաստիճանի իջեցումը (տակդիրի 250°C ջերմաստիճանի պահպանման դեպքում), որը բերում է լավ կառուցվածքով համատեղ թաղանթների ստացման (համաձայն XRD չափման): Ըստ երևույթին, սակաված է նստեցման պրոցեսում թիրախի քայքայման նվազեցման հետ: Ղեկավարելով այս տեխնոլոգիական պարամետրը, լեզված թաղանթների աճի արագությունը պահպանվում է այն նույն սահմաններում, ինչ ամբողջովին մաքուր ZnO թաղանթի նստեցման ժամանակ (0.8-1 A%/վ):

### **§2.3. Թաղանթների բնութագրական հատկանիշների ուսումնասիրման եղանակները**

Թաղանթների հաստությունը որոշվում է երկու եղանակով՝ կշռային և օպտիկական: Կշռային եղանակը բավականին պարզ է և արագ: Բավականաչափ ճշգրիտ չափվել է տակդիրի կշիռը մինչև թաղանթի նստեցումը և թաղանթի նստեցումից հետո, որը թույլ է տվել որոշել թաղանթի կշիռը: Թաղանթի հաստությունը որոշվել է ելնելով նրա կշիռից՝ հաշվի առնելով ZnO-ի խտությունը:

Օպտիկական եղանակի դեպքում ZnO թաղանթի հաստության չափումը իրականացվել է ինտերֆերենցիոն եղանակով սպեկտրների անդրադարձմամբ: Սպեկտրի գրանցումը իրականացվել է CՓ-8 սպեկտրոմետրի միջոցով՝ օգտագործելով հայելային անդրադարձման հարմարանք:

Օգտագործելով ինտերֆերենցիոն շերտերը, որոնք առաջանում են ընկնող լույսի ալիքի վերձանման ժամանակ թաղանթի վերևի և ներքևի մակերևույթներին, որոշվում է թաղանթի *d* հաստությունը հետևյալ բանաձևով՝

$$d = \frac{m\lambda_m}{4n(\lambda_m)}, \quad (2.1)$$

որտեղ  $m = 1, 2, \dots$  ինտերֆերենցիայի կարգն է,  $\lambda_m$ -ն ինտերֆերենցիոն մաքսիմումի համապատասխան ալիքի երկարությունն է,  $n(\lambda_m)$ -ն բեկման ցուցիչն է՝  $\lambda_m$  ալիքի երկարությունը:

ZnO թաղանթների բեկման ցուցչի հաշվման համար օգտագործվել է հետևյալ դիսպերսիոն հավասարումը [95]՝

$$[n(\lambda)]^2 = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C^2} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E^2}, \quad (2.2)$$

որտեղ  $A$ -ն,  $B$ -ն,  $C$ -ն,  $D$ -ն և  $E$ -ն համապատասխան գործակիցներով պարամետրերն են ( $A = 2.0065$ ,  $B = 1.5748 \cdot 10^6$ ,  $C = 10^8$ ,  $D = 1.5868$ ,  $E = 2606.3$ ), իսկ  $\lambda$ -ն անգստրեմներով է: Այս եղանակը բավականաչափ պարզ է իրականացման տեսանկյունից և միաժամանակ թույլ է տալիս չափել համասեռ թաղանթների հաստությունը, իրականացնել թաղանթի շերտավորության ստուգում, ինչպես նաև ազդանշանի ամպլիտուդով եզրակացություն իրականացնել համասեռության մասին:

Հաշվի առնելով, որ ZnO թաղանթները նախատեսված են էլեկտրաստատիկական կիրառման համար, շատ կարևոր պարամետր է դառնում ստացված թաղանթների հաղորդականությունը: Ցածր հաղորդականությունը կարող է հանգեցնել չհիմնավորված կորուստների և որպես արդյունք էլեկտրաստատիկական նյութի տաքացման:

Տեսակարար դիմադրության չափումը հետազոտվող ZnO թաղանթներում սապֆիրի վրա իրականացվել է չորսզոդային եղանակով, որը չի պահանջում պատրաստել օհմական կոնտակտներ նմուշի վրա: Չոնդերը գտնվում են քառակուսու գագաթներում, որը ապահովում է պատահական սխալների նվազեցում: Տեսակարար դիմադրությունը որոշում ենք չափումներ իրականացնով հոսանքի բացթողման ժամանակ հաջորդական յուրաքանչյուր հարևան զոնդերի գոյգով՝ փոխելով կիրառվող լարման բևեռականությունը և RCL E7-8 չափիչ սարքի օգնությամբ ութ չափումների միջոցով՝ հաշվելով տեսակարար դիմադրության միջին մեծությունը:

Տեղադրելով զոնդերը քառակուսու գագաթներում կարելի է ստանալ անսահման շերտի մակերևութային դիմադրությունը հետևյալ բանաձևով՝

$$\rho_s = (2\pi/\ln 2) \cdot U/I, \quad (2.3)$$

որտեղ  $U$ -ն քառակուսու մի կողմում զոնդերի պոտենցիալների փոփոխող լարումն է,  $I$ -ն բացթողնված երկու հակադիր զոնդերի միջև հոսանքն է: Համասեռ շերտի համար տեսակարար դիմադրությունը կլինի՝

$$\rho = \rho_s d, \quad (2.4)$$

որտեղ  $d$ -ն շերտի հաստությունն է:

Հաղորդականությունը նույնպես չափվել է մետաղ-կիսահաղորդիչ-մետաղ կառուցվածքի միջոցով՝ օգտագործելով նստեցված ալյումինե մետաղական էլեկտրոդներ: Չափումները իրականացվել են հոսանքի աղբյուր ծառայող E6-13A տերատետրի օգնությամբ: Դիմադրությունը չափելու սարքում կիրառվող եղանակը, դա օպերացիոն ուժեղարարի օգնությամբ փոփոխվող դիմադրությունը նմուշի դիմադրությանը հավասարեցնելն է:

Չափվող  $R_x$  դիմադրությունը որոշվում է  $U_0/R_x = U_x/R_0$  հարաբերությամբ, որտեղ  $U_0$ -ն փոփոխական լարման աղբյուրն է (100 Վ կամ 10 Վ),  $R_0$ -ն նմուշային դիմադրությունն է,  $U_x$ -ը պոտենցիալային զոնդերի լարումն է, որը չափվում է B7-12A վոլտմետրի միջոցով:

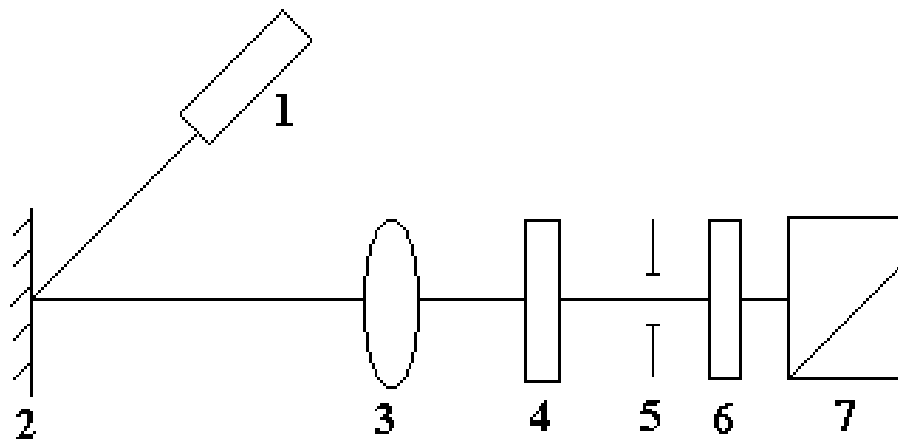
Թաղանթների ձևաբանությունը ուսումնասիրվել է “VEGA” (USA) ցանցային վերծանող էլեկտրոնային միկրոսկոպի օգնությամբ: Մեր ուսումնասիրություններում էլեկտրոնային միկրոսկոպը օգտագործվել է 2-20 ԿԷՎ արագացնող պոտենցիալով: Ինչպես հայտնի է, վերծանող միկրոսկոպով պատկերի ձևավորումը իրականացվում է դրա լավագույն հատկությամբ՝ օգտագործելով երկրորդային էլեկտրոններ: Միաբյուրեղային թաղանթներում երբեմն-երբեմն երևացել են նշանակություն չունեցող քանակությամբ, մինչև մի քանի միկրոնի հասնող մեծ չափերով մասնիկներ, որոնք իրենցից ներկայացնում են թիրախի բեկորներ: Մակերևույթներին նաև երևացել են միկրոխոռոչներ: Ձևաբանության հետազոտությունը

թույլ է տալիս հեշտացնել նստեցման պարամետրերի ընտրությունը:

ZnO թաղանթի որակը օպտիկական եղանակով ստուգելու համար օգտագործվել է “Versamet-2” (“Union”, Japan) ընկերության միկրոսկոպը: Այս միկրոսկոպը թույլ է տալիս մեծացնել պատկերը 60 անգամից մինչև 1200 անգամ: Միկրոսկոպն աշխատում է ինչպես անդրադարձման սովորական ռեֆլեկտիվ, այնպես էլ բևեռացած անդրադարձման ռեֆլեկտիվ օգտագործելով կոմպենսացնող արիզմա: Մի քանի նմուշի համար ստացված լուսանկարները ներկայացված են 2.7 և 2.8 նկարներում:

Ցրումները կարելի է չափել չկիրառելով բարդ տեխնիկա՝ ալիքատարի միջով ճառագայթելով և ստանալով ճառագայթումը: Մյուս կողմից, ցրումը թաղանթների հիմնական բնութագրերից է և խիստ կախած է տեխնոլոգիական ռեֆլեկտիվներից: Այդ պատճառով ստացված թաղանթների ցրման մեծության մասին ճշգրիտ ինֆորմացիան շատ կարևոր է:

Ցրումները չափելու համար կիրառվել է “Zeiss” ընկերության “Spekol” սպեկտրակալորիմետրը՝ վերածնափոխված չափման սխեմայով: Չափումների օպտիկական սխեման ներկայացված է նկ. 2.1-ում:



Նկ. 2.1. Ցրումների չափման օպտիկական սխեման:

ՄԴ-302 հելիոլմ-նեոնային լազերից ճառագայթը (1), որի ալիքի երկարությունը  $\lambda=632.8$  նմ է, ինտենսիվությունը՝ 8 մՎտ, տրամագիծը՝ 3 մմ,  $45^\circ$  տակ լուսավորում է հետագոտվող թաղանթը կամ էտալոնային թիթեղը (2): Լուսավորված տիրույթի նկարը լինզայի (3)

օգնությամբ պրոեկտվել է Ֆոտոընդունիչի (6) հարթության վրա ընդունման այն մակերեսով, որի դեպքում ամենալայնն է արտահայտված: Չեզոք ֆիլտրները (4) ընտրված են Ֆոտոընդունիչի վրա ինտենսիվությունը կարգավորելու համար այնպես, որ ընդունիչը դուրս չգա գծային տիրույթից: Դիաֆրագման (5), որը անմիջապես փակցված է ընդունիչին, ընտրված է կողմնակի լուսավորությունը նվազեցնելու համար: Ֆոտոընդունիչի ազդանշանը գրանցվել է վոլտմետրով (7):

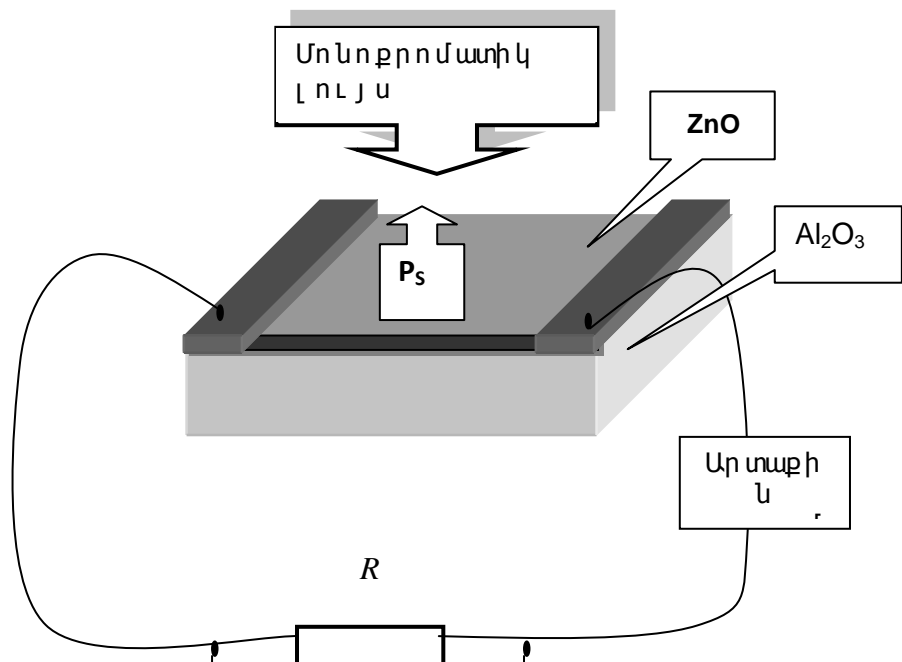
Որպես էտալոն օգտագործվել է սուլֆատե բարիումից 100%-անոց ցրումով թիթեղ կամ ապակուց թույլ-ցրումով թիթեղ: Վերջինս ձևափոխելով նմանեցվել է 100%-անոց թիթեղին՝ ներմուծելով անձնագրված չեզոք ֆիլտրեր հասցվել է նույն ցուցչին: Ամեն չափումից առաջ ստուգվել է սաաֆիրե տակդիրի ցրումները, ֆոնի ինտենսիվությունը և էտալոնային ապակուց ցուցիչը: Դա թույլ է տալիս նվազեցնել սխալը՝ պայմանավորված լազերային դրեյֆային ինտենսիվությամբ, ընդունիչի զգայունությունը և ֆոնային ճառագայթումը՝ չկիրառելով բարդ երկճառագայթային սխեմա կամ լազերային մոդուլացիա: Յետագուստով նմուշների ցրման մեծությունները բերվում են տոկոսներով՝ ցրման իզոտրոպային մոտարկմամբ սուլֆատե բարիումի 100%-անոց ցրումով թիթեղի համար:

Թաղանթներում հաղորդականության չափումներ իրականացնելու համար, որպես էլեկտրոդներ օգտագործվել է մետաղական ալյումինե շերտեր՝ նստեցված վակուումային նստեցման եղանակով:

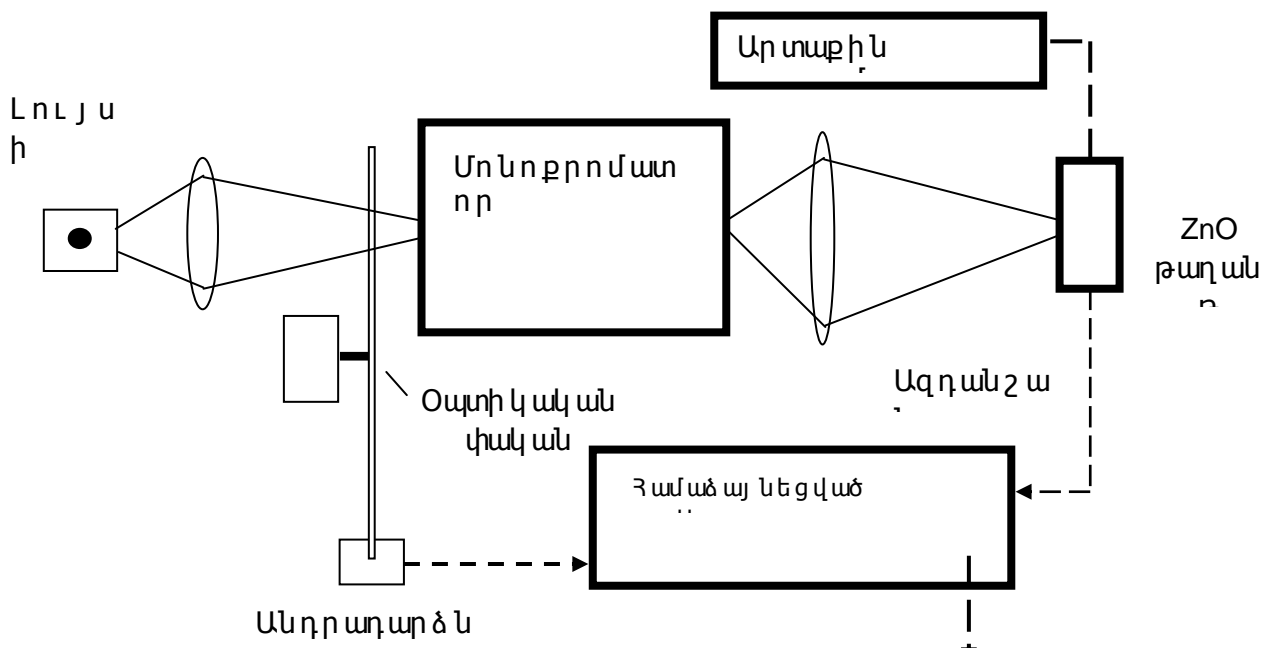
Ճառագայթման սպեկտրալ կախվածությունը իրականացվել է նկ. 2.2-ում և նկ. 2.3-ում ցուցադրված փորձարարական սխեմաներով: Ֆոտոհոսանքը չափելու համար օգտագործվել է 20 Վ հաստատուն լարման արտաքին աղբյուր: KFM (9 Վ) հալոգենային ճառագայթման լամպերը MDP-4 դիֆրակցիոն մոնոքրոմատորի միջոցով հավասարաչափ լուսավորել են ZnO թաղանթների ուղղահայաց մակերևույթները: Նմուշի վրա ընկնող լույսի ինտենսիվության էներգետիկական չափումները իրականացվել է պիրոէլեկտրիկական ընդունիչի միջոցով: Ֆոտոհոսքի գրանցումը իրականացվել է  $10^5 \Omega$

դիմադրություն ամբ և 15 պՖ ունակություն ամբ մուտքային իմպենդանսով սինքրոն-փուլային ուժեղարարով՝ կարգավորված մոդուլացնող լույսի հաճախություն ամբ (20 Յց): Ուժեղարարը կարգավորված է եղել Ֆոտոհաղորդականության անկման փուլի վրա:

ՈւՄ և տեսանելի տիրույթում թաղանթի բացթողման սպեկտրը գրանցվել է Specord M-40 սպեկտրոֆոտոմետրով: Թաղանթի հաստության չափման համար օգտագործվել է սպեկտրի անդրադարձումը՝ տակդիրի հայելային անդրադարձմամբ ձայնագրելով CՓ-8 սպեկտրոմետրով:



Նկ. 2.2. Ֆոտոհաղորդակի ձայնագրության չափումների համար կիրառված սխեման:

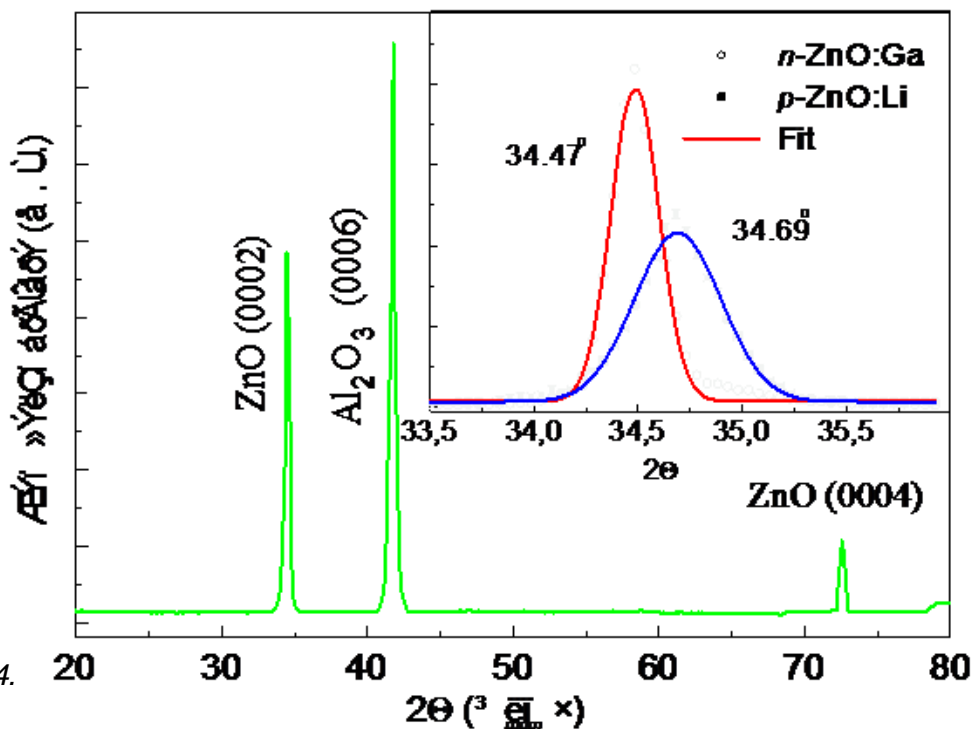


Նկ. 2.3. ZnO թաղանթների ֆոտոհաղորդակնությունը և սպեկտրալ կախվածությունը և չափման փորձարարական սխեման:

**§2.4. Ստացված ZnO թաղանթների կառուցվածքի ձևաբանությունը հարկությունների ուսումնասիրությունը**

Ցանցի պարամետրերի որոշման համար օգտագործվել է ռենտգենյան ճառագայթների դիֆրակցիոն եղանակը: Մեր փորձերում օգտագործվել է 31 կԷՎ արագացնող լարումով և 8 մԱ հոսանքով ( $\lambda=0.1542$  նմ  $\text{CuK}\alpha$ ) ДРОН-3 դիֆրակտամետրը: Վերծանումը տեղի է ունեցել  $2\theta$ -ով  $30\div 50^\circ$  տիրույթում  $0.01^\circ$  քայլով:

Թաղանթի դիֆրակտագրամայում երևում է ZnO-ի միայն տակդիրի հարթությանն ուղղահայաց (0002) գագաթը (նկ. 2.4) [9]: Այդ նույն ժամանակ երևում են ցանցի պարամետրի մի քանի աննշան նվազեցում Ga-ի կամ Li-ի ներմուծումից հետո: Ga-ի խառնուրդի համար ցանցի պարամետրի նվազումը ամենափոքրն է, իսկ Li-ը ցուցաբերում է ավելի մեծ ազդեցություն ցանցի պարամետրի վրա: Ռենտգենակառուցվածքային հետազոտությունները ցույց են տվել, որ ZnO:Ga ( $C = 0.5198$  նմ) և ZnO:Li ( $C = 0.5167$  նմ) թաղանթների ցանցերի “C” պարամետրերն ունեն աննշան տարբերություն:



Նկ. 2.4.

*Թաղանթի ռենտգենազրամման, պատկերում և ցուցադրված է ZnO:Li և ZnO:Ga  
թաղանթների (0002) գագաթները և այնպես ապատկերը:*

Վակուումային նստեցման ժամանակ ուսումնասիրվել է նաև տակդիրի ազդեցությունը թաղանթի կողմնորոշման վրա: Անհրաժեշտ է հիշել, որ սապֆիրի և ցինկի օքսիդի թաղանթի միջև էպիտաքսիան թթվածնային ցանցում հնարավոր է  $(0001)_{\text{ZnO}} \parallel (0001)_{\text{սապ}}$  հարթության վրա:

Սառը տակդիրի վրա նստեցման ժամանակ տեղի է ունենում ZnO-ի մոլեկուլների ավելի արդյունավետ կոնդենսացում, այդ ժամանակ տակդիրի վրայի ատոմները տիրապետում են շատ փոքր շարժունակության, այդ պատճառով սապֆիրում փոխվում է թթվածնային ցանցի կարգավորվածությունը: Ջերմաստիճանի բարձրացման հետ մեկտեղ տակդիրներն ունենում են երկու հիմնական առավելություններ: Առաջինը՝ մետաղական ցինկում ատոմների քանակի նվազումն է, որոնք կարող են ծառայել սկզբնական բյուրեղացման կենտրոններ: Երկրորդը՝ ատոմների շարժունակության մեծացումն է: Այս փաստը բերում է նրան, որ ստանում ենք ամուր կողմնորոշվածությամբ ZnO թաղանթներ սապֆիրե (0001) տակդիրների համար: Այստեղ պետք է նշել, որ ZnO թաղանթները ունեն ևս մեկ հատկություն. նրանք աճի ժամանակ ունեն արտահայտված կողմնորոշում: Մասնավորապես ամորֆային տակդիրներում դրա շնորհիվ հնարավոր է ստանալ առանց էպիտաքսիայի ZnO կողմնորոշված թաղանթներ:

Այսպիսով, կարելի է ասել, որ վակուումային նստեցման ժամանակ հնարավոր է առանց էպիտաքսիայի կիրառման ստանալ միաբյուրեղային թաղանթներ: Վակուումային նստեցման ժամանակ արտոնյալ կողմնորոշումը պայմանավորված է հարթակի հարթությանը ուղղահայաց C առանցքի հետ՝ բյուրեղի ունեցած (չափային ազդեցությունների շնորհիվ) թերմոդինամիկական շահավետ վիճակով:

ZnO թաղանթ ստանալու համար առաջին փորձերը ցույց են տվել, որ շատ դեպքերում թաղանթները ստացվում են ուժեղ ցրումով: Այդ առումով դրվել է ցրման գնահատման օբյեկտիվ եղանակ: Իզոտրոպային ցրման մոտարկմամբ սուլֆատե բարիումի 100%-անոց



ցրումով թիթեղի համար ցրման չափումների արդյունքները ներկայացված է աղյուսակ 2.1-ի համապատասխան սյունակներում:

Ցրման պատճառներից մեկը և, հետևաբար կորուստներն օպտիկայում կարող են լինել միջհատիկային սահմանին: Գրանուլացվածությունը հետազոտվել է էլեկտրոնային վերծանող միկրոսկոպով (50-5000 ուժեղացմամբ) և օպտիկական միկրոսկոպով (10-1200 ուժեղացմամբ): Կախված կիրառվող տեխնոլոգիայից (և տեխնոլոգիական պարամետրերից) ZnO թաղանթները հաճախ ստացվում են գրանուլացված և լույսի ուժեղ ցրումներով:

Եթե թաղանթների նստեցման համար օգտագործում են վակուումում չջերմամշակված և ավելի անհարթ թիրախներ, քան միաբյուրեղայիններն են, ապա մասնակի միկրոպայթյունների արդյունքում թաղանթի աճի արագությունը հաստատուն չի ստացվում: Դա բերում է լույսի ուժեղ ցրումով գրանուլացված թաղանթների աճի: Այդպիսի որակով թաղանթները չի կարելի օգտագործել, որպես ալիքատարեր:

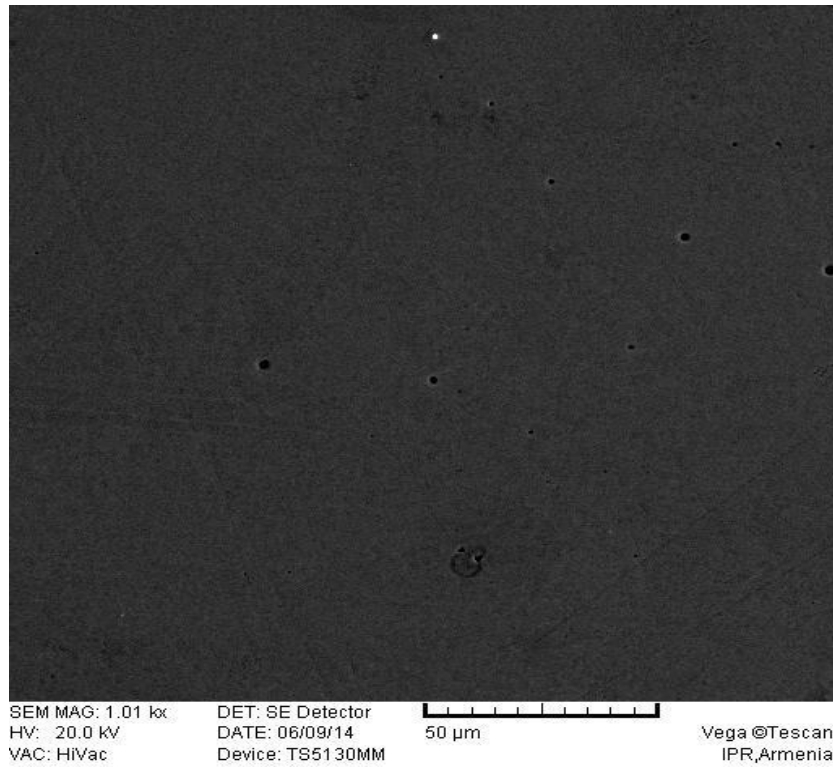
Գրանուլացմանը վերաբերող գնահատականներ ստացվել են նաև ռենտգենային չափումներից: Ռենտգենյան ռեյլեֆների գծերի լայնությունը թույլ է տալիս գնահատել գրանուլների մեծությունը, իսկ նմուշի տատանմամբ ստացված գծերի լայնությունը՝ գրանուլների անկյունային տարրակողմնորոշվածությունը: Այդ արդյունքները ներկայացված են աղյուսակ 2.1-ում: Ելնելով այդ տվյալներից կարելի է ենթադրել, որ վակուումային նստեցումը ապահովում է գրանուլի փոքր տարրակողմնորոշում: Նմուշի տատանման նվազագույն գծի լայնությամբ ( $2.8^\circ$ ) թաղանթները ստացվել են վակուումային նստեցման եղանակով: Ընդ որում, աճի սկիզբ տեղի է ունեցել բարձր ջերմաստիճանում ( $10-15^\circ\text{C}$ -ում), իսկ հետո ջերմաստիճանը իջել է և թաղանթը աճել է  $200^\circ\text{C}$  ջերմաստիճանում հասնելով մինչև 1000 նմ հաստությամբ:

Աղյուսակ 2.1-ում ներկայացված է էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակով ստացված որոշ ZnO թաղանթների ռենտգենյան ճառագայթային դիֆրակցիոն (XRD) եղանակով հետազոտության արդյունքները, իսկ նկ. 2.5 և նկ. 2.6

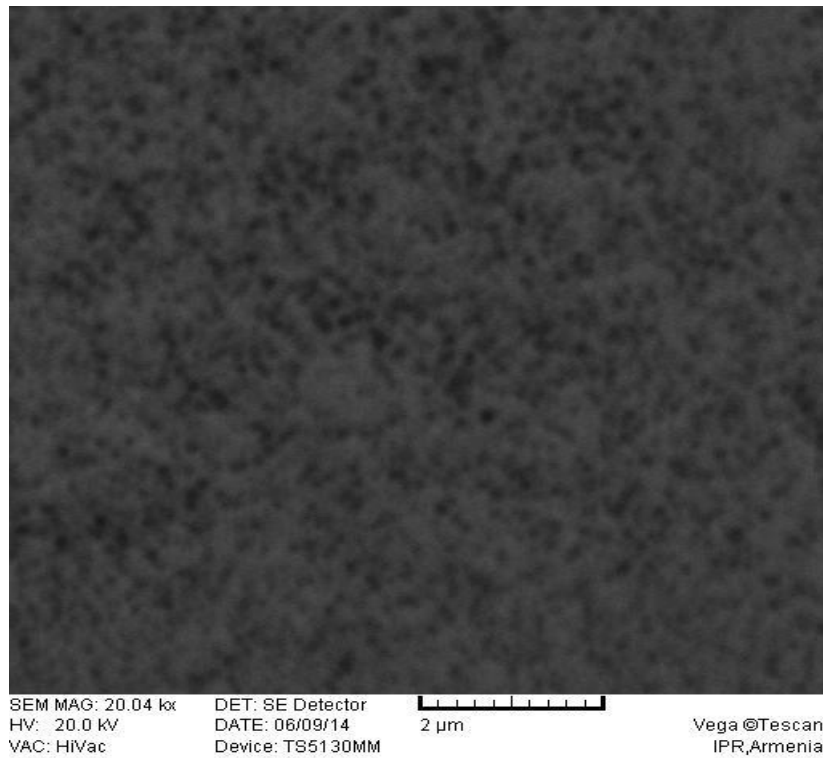
Նկարներում ցուցադրված են էլեկտրոնային վերծանող միկրոսկոպի և օպտիկական միկրոսկոպի օգնությամբ ստացված (նկ. 2.7 և նկ. 2.8) լուսանկարները:

Աղյուսակ 2.1. ZnO թաղանթների ռենտգենյան հետազոտման արդյունքները:

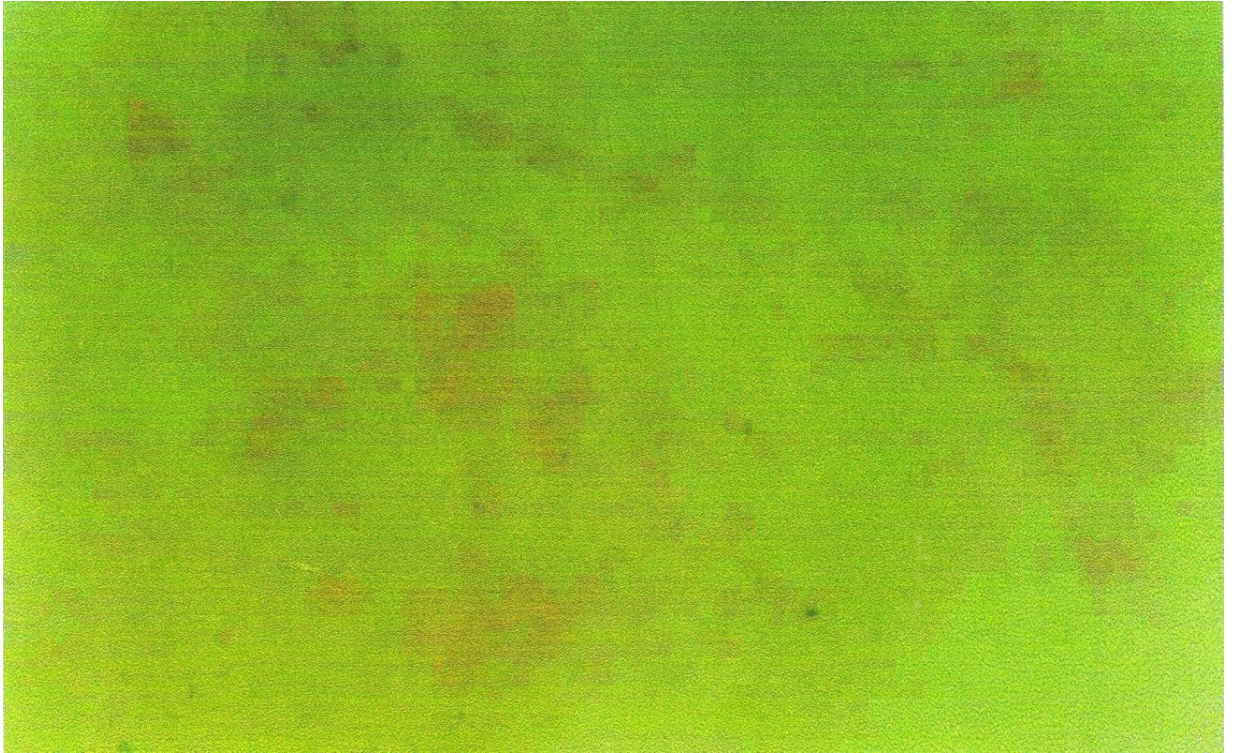
N	Խառնուրդ, %-ով	Թաղանթների չերմամշակումը	Ռենտգեն (0002) ամպլ./անկյուն	Կողմնորոշումը
1	-	չերմամշ.	6900	0002
2	-	չչերմամշ.	-	-
3	Ga, 0.7	չչերմամշ.	488	0002
4	Ga, 2	չչերմամշ.	2100 (0.02)	0002
5	Li, 10	չչերմամշ.	3880 (0.02)	0002
6	Li, 1	չչերմամշ.	1430 (0.1)	0002
7	Li, 0.5	չչերմամշ.	1820 (0.15)	0002
8	Li, 5	չչերմամշ.	2430	0002



*Նկ. 2.5. Vega Eլ էկրոնայ ին վերծանող միկրոսկոպով ստացված ZnO:Ga (2%-ով, աղյ ու սակ 2.1, N4) ջերմամշակված թաղանթի լ ու սանկարը:*



*Նկ.2.6. Vega Eլ էկտրոնայ ին վերծանող միկրոսկոպով ստացված ZnO:Ga (2%-ով, աղյ ու սակ 2.2, N3) ջերմամշակված թաղանթի լ ու սանկարը:*



Նկ. 2.7. Օպտիկական միկրոսկոպով (1200x) ստացված ZnO (աղյուսակ 2.1, N2) թաղանթի լուսանկարը:



Նկ. 2.8. Օպտիկական միկրոսկոպով (100x) ստացված ZnO (աղյուսակ 2.1, N2) թաղանթի լուսանկարը:

## **§2.5. Թաղանթների էլեկտրահաղորդականության և**

### **Ֆոտոհաղորդականության հատկությունները**

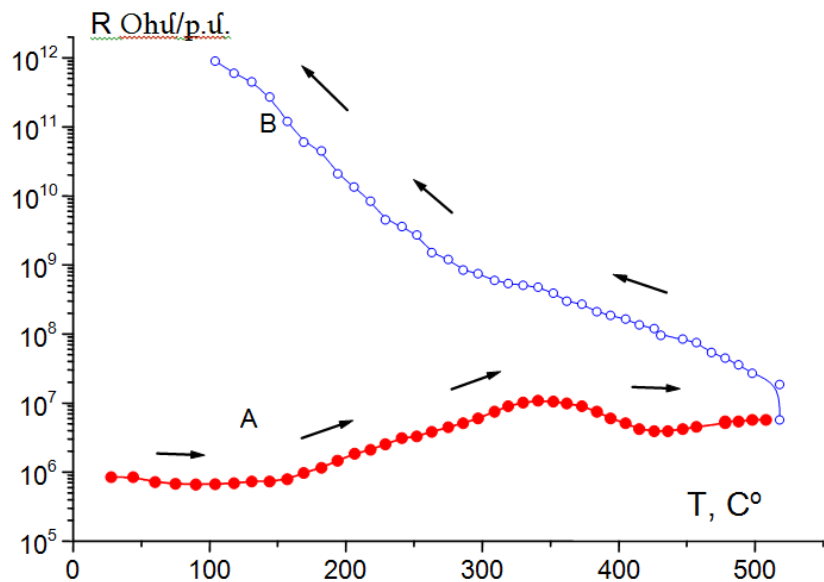
Իրականացվել է թափանցիկ ZnO թաղանթների էլեկտրական և ֆոտոէլեկտրական հատկությունների հետազոտություններ [4]: Ցույց է տրվել, որ լեգիրելով խառնուրդներ կարելի է ղեկավարել հաղորդականությունը: Լեգիրված դոնորային կամ ակցեպտորային խառնուրդներով թաղանթների հաղորդականության հարաբերության արժեքները հասնում են մինչև  $10^9$ : Ցույց է տրվել, որ լեգիրված Li-ի խառնուրդով թաղանթների համար մթության ժամանակ ապահովվում է հաղորդականության էական նվազեցում առանց հաղորդականության տեսակի փոփոխության, և կարելի է հասնել ֆոտոհաղորդականության և հաղորդականության հարաբերության զգալի աճի: Այս արդյունքները կարող են օգտագործվել ուղիորամանուշակագույն (ՌԲՄ) տիրույթի պինդամրմնային ֆոտոդետեկտորների պատրաստման համար:

Ցինկի օքսիդի թաղանթը համարվում է ամենալավ փոխարինողը թանկարժեք սիլիցիում-անագ թաղանթներին: Ցինկի օքսիդները լեգիրելով գալիումով (Ga) կամ լիթիումով (Li) ստացվում են համապատասխանաբար դոնորային կամ ակցեպտորային խառնուրդներ [96]: Բարձր հաղորդականությամբ ZnO-ների հիման վրա էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակով կարելի է ստանալ TCO-ներ [97]: Չնայած դրան չկան բավականաչափ հետազոտություններ, թե ինչպես են փոխվում թաղանթների էլեկտրական և օպտիկական հատկությունները՝ խառնուրդների տեսակի և կոնցենտրացիայի փոփոխությունից կախված:

Այս պարագրաֆում ներկայացված են լեգիրված ZnO թաղանթների հետազոտության արդյունքները. կատարվել են ստացված թաղանթների օպտիկական և էլեկտրական հատկությունների հետազոտություններ:

Լիթիումով լեգիրված ZnO թաղանթները ստացվել են սապֆիրե տակդիրների վրա էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակով [98, 99]: Նստեցման համար թիրախներ են սինթեզվել հետևյալ կոնցենտրացիաներով խառնուրդներից՝ Li(0.5, 0.6, 0.8 և 5 %-ով) և Ga(0.7 և 2 %-ով): Li-ով խառնուրդները թաղանթներում առաջացրել են ակցեպտորային կենտրոններ և համապատասխանաբար

իջեցրել հաղորդականությունը, իսկ Ga-ով խառնուրդները առաջացրել են դոնորային կենտրոններ և համապատասխանաբար բարձրացրել հաղորդականությունը: Էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակը հանգեցնում է թթվածնով աղքատ թաղանթների ստացմանը, այդ պատճառով թաղանթները թթվածնով հագեցնելու համար աճեցնելուց հետո ենթարկվում են ջերմամշակման: Դա նպաստում է թափուր թթվածնային տեղերի նվազեցմանը, հետևաբար՝ դոնորային կենտրոնների նվազեցմանը: Արդյունքում ստացվել են ցինկի օքսիդի թաղանթներ, որոնք ունեն, և դոնորային, և ակցեպտորային կենտրոններ: Այդ նույն ժամանակ թաղանթի հաղորդականությունը նվազել է մինչև  $0.5 \times 10^{-3}$  (Օմ·սմ)<sup>-1</sup> (նկ. 2.9):



*Նկ. 2.9. Թթվածնային ջերմամշակման ընթացքում ZnO:Li թաղանթների դիմադրության կախվածությունը ջերմաստիճանից: Ակորը հաղորդականության փոփոխությունն է՝ պայմանավորված երկու մրցակցային մեխանիզմով՝ թթվածնի դիֆուզիայով (հաղորդականության նվազում) և իջքակիրների կոնցենտրացիայի փոփոխությամբ (հաղորդականության աճ) [9]:*

Եվ դոնորային, և ակցեպտորային կենտրոններ պարունակող կոմպենսացված կիսահաղորդիչները, որպես արդյունք ձեռք են բերել  $\mu_{\text{HNL}} = 80 \text{ սմ}^2 \cdot \text{վ}^{-1} \cdot \text{վ}^{-1}$  Հոլ-ի շարժունակություն և  $\mu_{\text{HT}} = 15 \text{ սմ}^2 \cdot \text{վ}^{-1} \cdot \text{վ}^{-1}$  արդյունավետ դաշտի շարժունակություն [9]:

Չետազոտությունները ցույց են տվել [98,99], որ օպտիկական կիրառման մեջ պիտանելի թաղանթներ ստանալու համար

արդյունավետ աճի արագությունը  $0.8-1^{\circ}\text{A}/\text{վ}$  է՝  $3.3$  էՎ էներգիայով ընկնող փնջի դեպքում: Թաղանթի ջերմաստիճանը նստեցման ժամանակ եղել է  $250\pm 5^{\circ}\text{C}$  տիրույթում: Սապֆիրե տակդիրների բյուրեղային առանցքներն ունեն (0001) ուղղվածություն, որը հանգեցնում է նրան, որ ստացված ZnO թաղանթները նույնպես ունեն (0001) ուղղվածությամբ բյուրեղագիտական առանցքներ, որոնք ուղղահայաց են տակդիրի հարթությանը:

Օգտագործելով RCL E7-8 չափիչ սարքը՝ իրականացվել են 1000Յգ հաճախականության դեպքում ստանդարտ չորսզոնդային եղանակով թաղանթների հաղորդականության չափումներ: Չափվել են հաստատուն հոսանքի դիմադրությունները՝ B7-21A հոսանքի աղբյուր և վոլտմետր հանդիսացող սարքի միջոցով: Մեծ դիմադրություն ունեցող թաղանթների համար չափումները իրականացվել են երկզոնդանի եղանակով՝ օգտագործելով E6-13A տերաօմետրը: Իրականացվել են նաև Al/ZnO:Li/Al և Al/ZnO:Ga/Al հարթ կառուցվածքների հաղորդականության և  $\Phi$ ոտոհաղորդականության չափումներ: Օպտիկական սպեկտրի բացթողման չափումները կատարվել են M-40 սպեկտրաֆոտոմետրի միջոցով:

ZnO:Li և ZnO:Ga թաղանթների հաղորդականությունները չափվել են հաստատուն և փոփոխական հոսանքների դեպքերում: Չաղորդականությունը ղեկավարվել է հաստատուն հոսանքի դեպքում, որպեսզի ZnO:Ga թաղանթները հնարավոր լինի կիրառել սարքերում, որպես որակյալ հաղորդիչ էլեկտրոդներ: Չաղորդականության տվյալները կարևոր են նաև թաղանթների կառուցվածքային թերությունների հետազոտման համար:

Այդուսակ 2.2-ում ցուցադրված են Li-ով և Ga-ով լեգիրված ZnO թաղանթների հաղորդականության տվյալները: Տեսնում ենք, որ ամենամեծ հաղորդականությունն ունի Ga(2%)-ով լեգիրված թաղանթը, ընդ որում, գործնականում կիրառելու համար, շատ կարևոր է այն, որ Ga-ով լեգիրված թաղանթները պահպանում են մեծ հաղորդականությունը նաև ջերմամշակման ենթարկվելուց հետո [100]: Էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակով ստացված թաղանթներն ունեն թթվածնի պակաս: Կոմպլեքսը, որը կազմված է ցինկի տեղաշարժված ատոմներով

թթվածնային թափուր տեղերից, հանդիսանում է դոնորային կենտրոն:  $Ga^{2+}$  իոնները նույնպես հանդիսանում են դոնորային կենտրոններ, այդ պատճառով ZnO:Ga թաղանթներում դիտվում է երկու տեսակի դոնորային կենտրոններով միայն էլեկտրոնային հաղորդականություն: Li-ով լեգիրված թաղանթներում միաժամանակ առկա են 2 տեսակի կենտրոններ. ակցեպտորային կենտրոն՝ պայմանավորված Li-ի իոններով և դոնորային կենտրոն՝ պայմանավորված թթվածնի թափուր տեղերով և ցինկի ատոմների տեղաշարժմամբ:

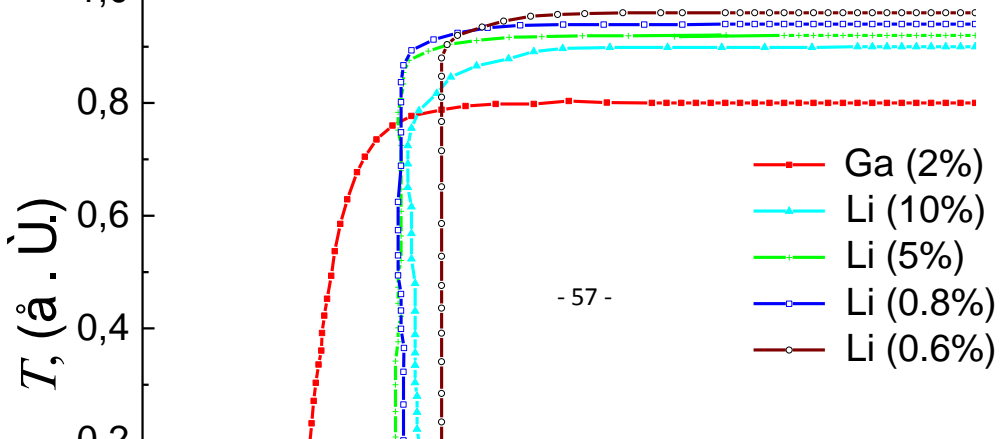
Աղյուսակ 2.2. ZnO թաղանթների բնութագրերը:

N	Խառնուրդ, %-ով	Թաղանթների չեղմամշակումը				Հաստությունը, նմ	Հաղորդականությունը (Ohմ.սմ) <sup>-1</sup> , հաճախություններում	
		չեղմամշակում	T <sup>0</sup> C	րոպե	միջավայր		0 Հg	1000 Հg
1	Ga, 2	չեղմամշակում	-	-	-	345	$2.9 \times 10^3$	$0.8 \times 10^3$
2	Ga, 0.7	չեղմամշակում	-	-	-	77	$0.9 \times 10^3$	$0.4 \times 10^2$
3	Ga, 2	չեղմամշակում	350	60	օդ	350	$0.77 \times 10^3$	$0.6 \times 10^3$
4	Li, 5	չեղմամշակում	350	60	օդ	170	5.8	$2 \times 10^{-1}$
5	Li, 5	չեղմամշակում	-	-	-	150	1.5	
6	Li, 0.5	չեղմամշակում	350	300	օդ	210	$6.8 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
7	Li, 0.6	չեղմամշակում	-	-	-	630	$1.5 \times 10^{-3}$	
8	Li, 0.6	չեղմամշակում	350	60	օդ	630	$0.8 \times 10^{-6}$	
9	Li, 0.8	չեղմամշակում	350	60	օդ	550	$0.5 \times 10^{-6}$	



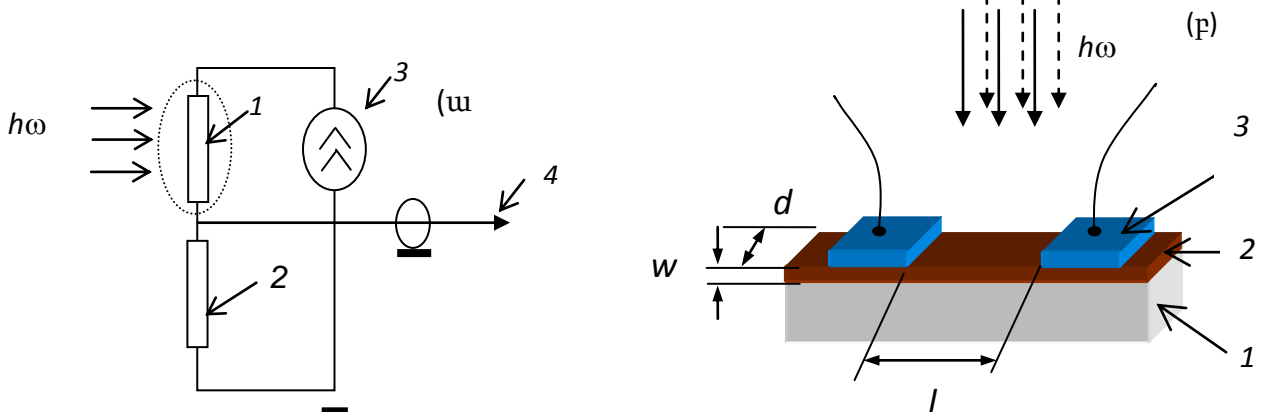
Նվազագույն հաղորդականությամբ թաղանթները կոմպենսացված կիսահաղորդիչներ են: Որոշակի շեմից սկսած Li-ի կոնցենտրացիայի մեծացումը հանգեցնում է հաղորդականության աճի, որը պայմանավորված է հաղորդականության տեսակի փոփոխությամբ՝ էլեկտրոնայինից խոռոչային: Նվազագույն հաղորդականությամբ լավագույն դիէլեկտրիկական հատկությունները նկատվում են Li-ի 0.5-0.8 % խառնուրդներով և օդում ջերմամշակված ZnO թաղանթներում: Ga-ի և Li-ի խառնուրդներով թաղանթների հաղորդիչ և ոչ հաղորդիչ շերտերը օգտագործելով սենդվիչ կամ հարթ կառուցվածք պատրաստելու համար՝ հնարավոր է հասնել հաղորդականության  $\sigma_{\text{ZnO:Ga}}/\sigma_{\text{ZnO:Li}} \approx 10^9$  այսպիսի հարաբերությանը, որը կարևոր է թափանցիկ էլեկտրոնիկայի տարրեր ստեղծելու համար:

Բացթողման և ֆոտոհաղորդականության տիրույթների չափումները ձևավորում են հիմնական կլանման երկարալիքային եզրը՝ որոշելու համար մեծ և փոքր տեսակարար դիմադրությամբ ZnO թաղանթների թափանցիկության տիրույթը և օպտիկական ճառագայթման ազդեցությունը թաղանթների հաղորդականության վրա և օպտիկական անցումների բնութագրերի վրա: Նկ. 2.10-ում ներկայացված են Li-ով և Ga-ով լեգիրված ZnO թաղանթների բացթողման գործակցի կախումը  $\lambda$  ընկնող ալիքի երկարությունից: Ինչպես երևում է, բոլոր թաղանթները թափանցիկ են տեսանելի տիրույթում և ունեն մեծ թողունակություն: Բացթողման տիրույթների համեմատությունից կարելի է ասել, որ որպես լեգիրվող խառնուրդ ներմուծելով Ga(2%-անոց)՝ տեղաշարժվում է կարճալիքային կլանման եզրը UV տիրույթում: Այդ տեղաշարժումը առաջացնում է Բուրշտեյն-Մոսսայի ազդեցություն, այսինքն՝ կիսահաղորդիչում լույսի կլանումը UV տիրույթում բացակայում է, ինչը պայմանավորված է հաղորդականության գոտում էլեկտրոնների կոնցենտրացիայի մեծացմամբ:



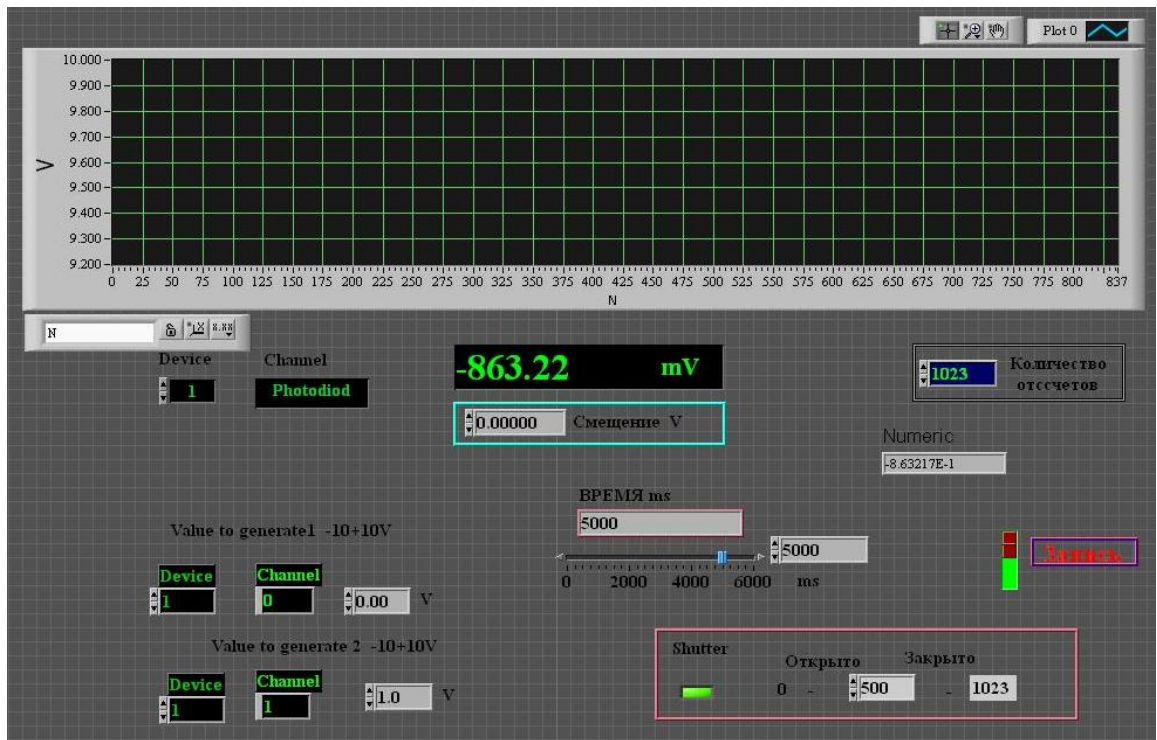
Նկ. 2.10. Li-ով և Ga-ով լեգիրված ZnO թաղանթների բացթողման գործակցի (T) կախումը ընկնող ալիքի երկարության (λ):

Նկ. 2.11.(ա)-ում պատկերված է ֆոտոհաղորդականության հոսանքի կինետիկայի չափման էլեկտրական սխեման, իսկ նկ. 2.11.(բ)-ում ներկայացված է ֆոտոհաղորդականության չափման կառուցվածքային սխեման: Չափման նմուշը իրենից ներկայացնում է սապֆիրե տակդիրի վրա Al/ZnO:Li/Al կամ Al/ZnO:Ga/Al հարթ կառուցվածքը: Լուսավորված թաղանթի ծավալը  $V = ldw$  է, որտեղ  $l = 20$  մմ՝ օհմական էլեկտրոդների միջև հեռավորությունն է, որը համընկնում է էլեկտրական դաշտի ուղղության հետ, ZnO թաղանթի լուսավորված մասի լայնությունն  $d \approx 20$  մմ է և թաղանթի հաստությունը  $w \approx 0.1 - 1$  մմ է:

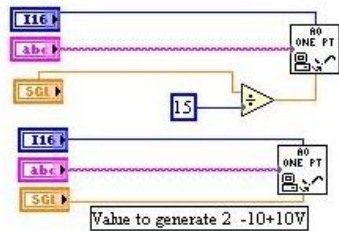
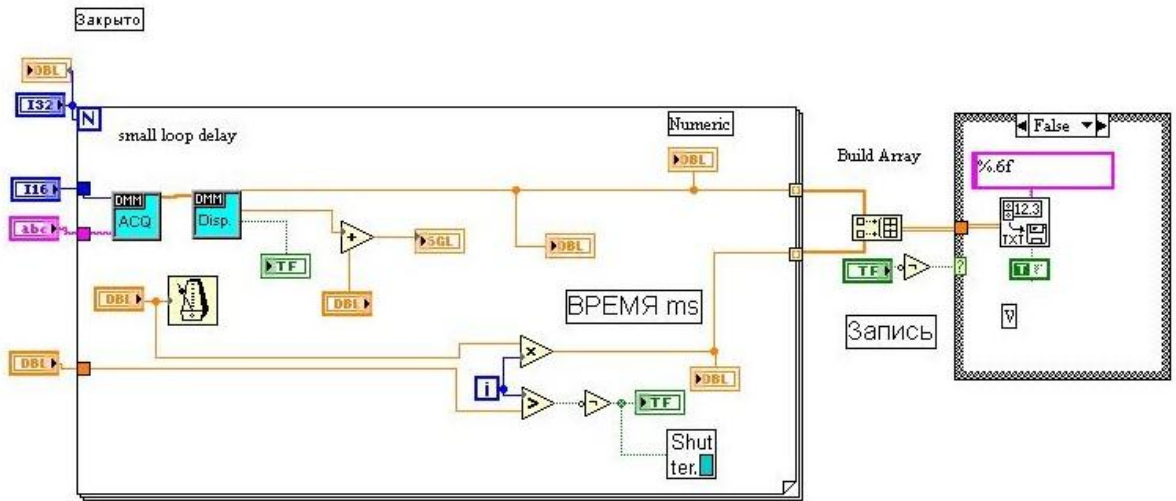


Նկ. 2.11. Ֆոտոհաղորդականության հոսանքի կինետիկայի չափման էլեկտրական սխեման (ա). 1 – հետերոկառուցվածքը, 2 – էտալոնային ռեզիստորը, 3 – հոսանքի գեներատորը, 4 – էլքային տվյալների գրանցումը: ZnO թաղանթների հիման վրա լուսավորված ֆոտոռեզիստորի սխեման (բ). 1 – սապֆիրե տակդիր, 2 – ZnO թաղանթ, 3 – օհմական էլեկտրոդներ (Al):

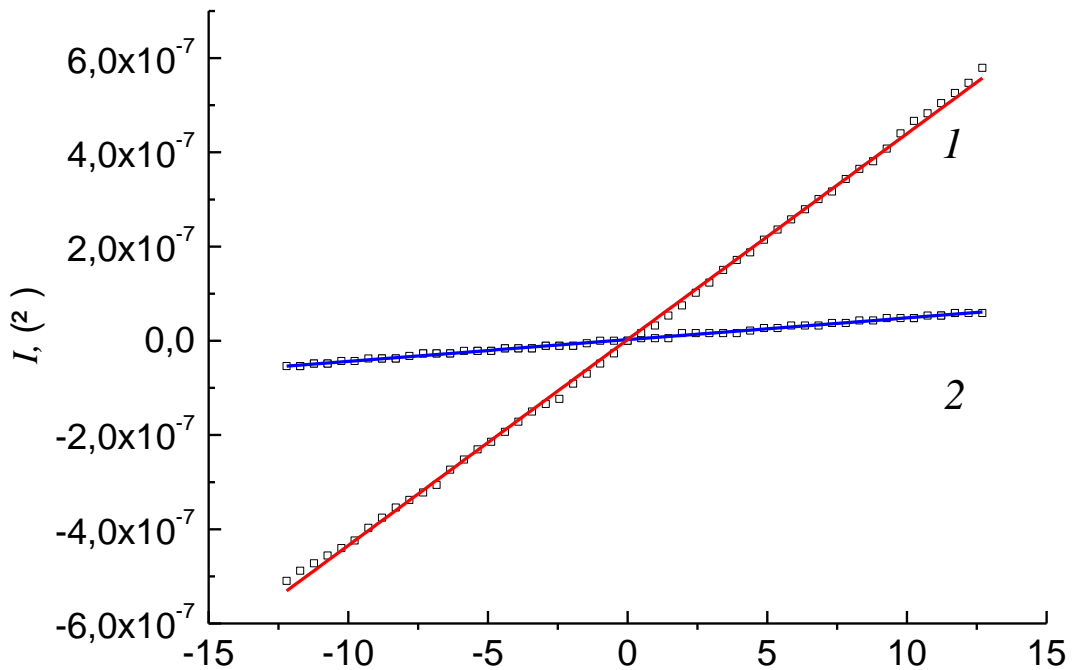
Յոսանքն անցնելով հետերոկառուցվածքի (1) միջով՝ չափվում է լարման անկումը Էտալոնային դիմադրության (2) վրա, որը սխեմայում հաջորդաբար միացված է ֆոտոռեզիստորային հետերոկառուցվածքին (նկ. 2.11.(ա)): Նմուշի վրա կիրառած շեղման լարումը  $U_0 \approx 50$  Վ է: Էտալոնային ռեզիստորի վրա չափումները իրականացվել են National Instruments-ի (NI) Էլեկտրոնային թիթեղի միջոցով: NI-ի թիթեղի և համակարգչի հիմնական արոցեսորին տվյալների փոխանցման կառավարումը իրականացվել է LabVIEW 7.0 ծրագրի օգնությամբ: Վիրտուալ սարքի ղեկավարման վահանակն ու բլոկ սխեման բերված են նկ. 2.12 և 2.13-ում: Լոյսի աղբյուրը ծառայել է 6000 Կ գույնային ջերմաստիճանով 8 Վտ շիկացած լամպ և ՄՓ-1 ֆիլտր, որի սպեկտրալ տիրույթը եղել է 360–410 նմ:



Նկ. 2.12. Վիրտուալ սարքի ղեկավարման վահանակը՝ հաղորդականության ու նրա ֆոտոհաղորդականության ու նրա չափելու համար:



Նկ. 2.13. National Instruments»-ի AT-MIO-16E10 թիթեղի միջոցով իրականացրած չափումների վիրտուալ սարքի բլոկ սխեման



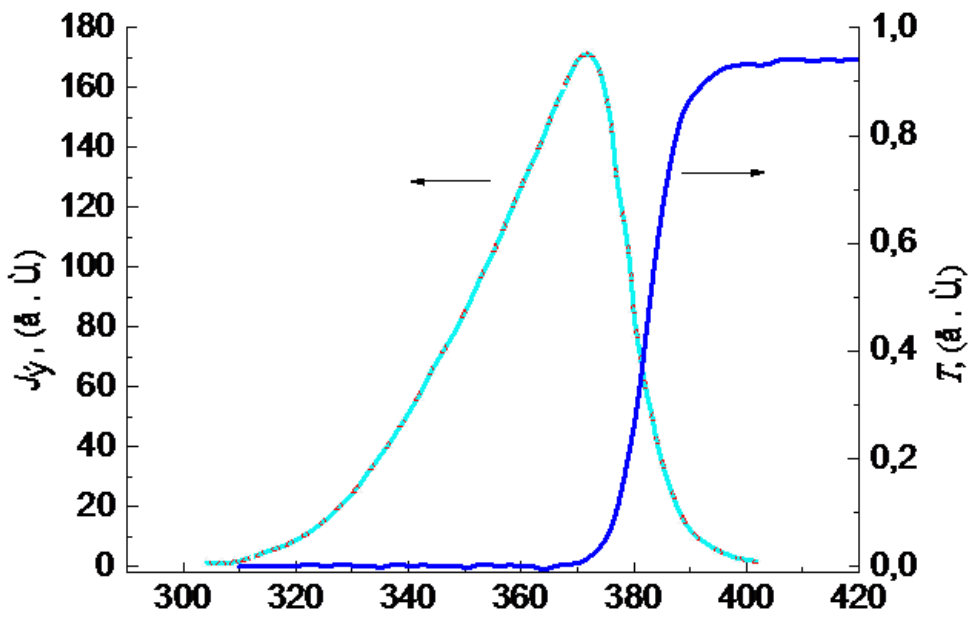
Նկ. 2.14. ZnO:Li թաղանթի V-I-ը. 1- լուսավորած ժամանակ, 2- մուլթ ժամանակ:

Նկ. 2.14-ում պատկերված է լուսավորած ժամանակ (1) և մուլթ ժամանակ (2) Al/ZnO:Li/Al հարթ կառուցվածքի վոլտ-ամպերային

բնութագիրը (V-I): Ինչպես երևում է նկարից, V-I-ը ունի գծային կախվածություն մոլթև ֆոտոհաղորդականության դեպքերում, ինչը պայմանավորված է ZnO:Li/Al օհմական բնույթի անցումով:

Նկ. 2.15-ն Լ մ պատկերված է ZnO:Li (0,8%-ով) թաղանթի

Ֆոտոհաղորդականության հոսանքի  $J_{ph}$  և բացթողման գործակցի  $T$  սպեկտրալ կախվածությունը: Պարզ է, որ պայմանավորված վալենտականության գոտուց հաղորդականության գոտի էլեկտրոնների գրգռմամբ՝ ֆոտոհաղորդականության սպեկտրն ունի գագաթ 370 նմ-ի (3,34 էՎ) վրա, ինչն ավելի մեծ է քան ZnO:Li (0,8%-ով) թաղանթի արգելված գոտու լայնությունը  $E_g \sim 3.30$  էՎ: Համաձայն ցիսկի օքսիդի թաղանթներում Li-ի խառնուրդների սպեկտրալ հետազոտությունների՝ արգելված գոտում չի ստեղծվում լրացուցիչ մակարդակներ: Կիսահաղորդիչներում խառնուրդային



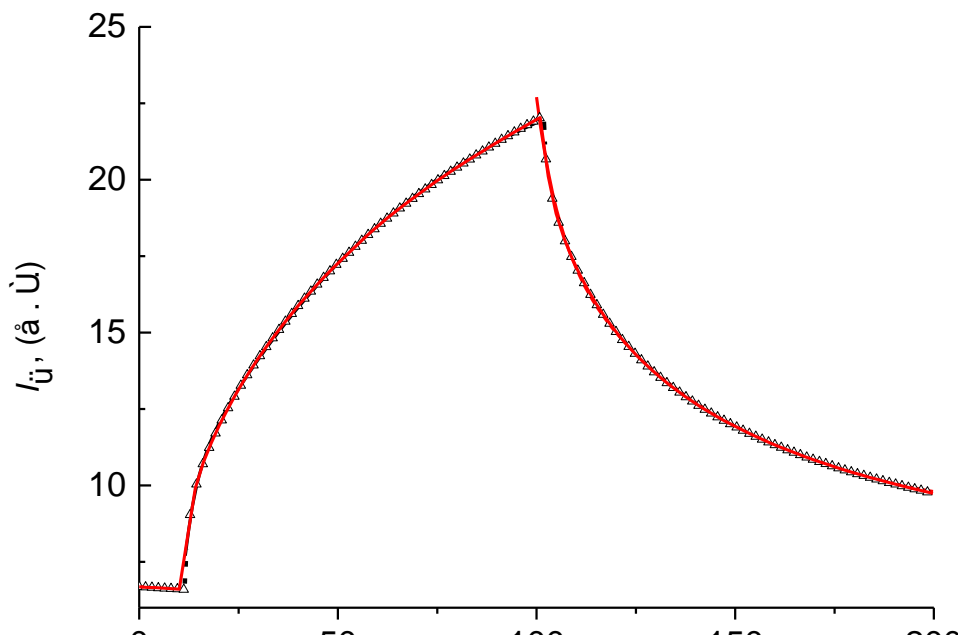
մակարդակների  $\lambda$  (Նմ) բացակայության դեպքում ֆոտոհաղորդականության սպեկտրալ բաշխման կորն ունի միայն մեկ մաքսիմում: Ֆոտոհոսանքի երկարալիքային անկումը առաջացնում է թաղանթների կլանման նվազեցում: Գոյություն ունեն ֆոտոհաղորդականության ոչ միայն երկարալիքային ( $h\omega < E_g$ ), այլ նաև կարճալիքային ( $h\omega > E_g$ ) անկումներ: Կարճալիքային անկումը ցույց է տալիս, որ այն դեպքում, երբ լույսի քվանտային էներգիան շատ ավելի մեծ է քան արգելված գոտու լայնությունը  $h\omega \gg E_g$ , լույսի կլանումը լինում է մեծ, և ամբողջ լույսը կլանվում է կիսահաղորդիչի բարակ մակերևութային շրջանում: Տեղայնացված մակերևութային (Տամի) վիճակների պատճառով լիցքակիրների կյանքի տևողությունը և շարժունակությունը այդ հատվածում ավելի ցածր է, քան ծավալում, և համապատասխանաբար, փոքր է նաև ֆոտոհոսանքի մեծությունը [102]:

*Նկ. 2.15. ZnO:Li թաղանթի  $J_{ph}$  \$Ֆոտոհոսանքի և T բացթողման գործակցի սպեկտրալ կախվածությունը:*

ZnO կիսահաղորդչային թաղանթները՝ UV տիրույթի դետեկտորներ օգտագործելու բարդությունը կայանում է նրանում, որ թաղանթի լուսավորման ժամանակ նրանցում միաժամանակ տեղի է ունենում երկու գործընթաց [101]: Այդ գործընթացները որոշ չափով կարելի է համարել անկախ: Նրանք ունեն ռելաքսացիոն ժամանակների արագ և դանդաղ բաղադրիչներ: Ֆոտոհոսանքի դանդաղ և արագ բաղադրիչների աճի և անկման տևողությունը չափելու համար օգտագործվել է չափման ստանդարտ սխեման (նկ. 2.11.(ա)) և թվային օսցիոլոգրաֆի: Արագ բաղադրիչի տևողությունը 10-100 մկվ է՝ կախված Li-ի կոնցենտրացիայից և աճեցնելուց հետո ջերմամշակումից: Ավելին, \$Ֆոտոհաղորդականության համապատասխան բաղադրիչների աճի և անկման ժամանակները գրեթե նույնն են [103, 113]: Նկ. 2.16-ում պատկերված է \$Ֆոտոհոսանքի դանդաղ բաղադրիչի աճը և անկումը: Պրոցեսների հետազոտությունները ցույց են տվել, որ \$Ֆոտոհաղորդականության դանդաղ փոփոխության ընթացքում մեծ ռելաքսացիոն ժամանակները պայմանավորված են սառեցված \$Ֆոտոհաղորդականությամբ [104]: Դնոորային կենտրոններում մի քանի վիճակների առկայությունը, պայմանավորված միջցանցային ցինկի իոններից, բերում է խառնուրդային մակարդակների շարքերով ձևավորման, Ֆերմի մակարդակի դիրքի կայունացման, էլեկտրոնների



վերաբաշխումների ռելաքսացիայի երկարաժամկետ պրոցեսների և թերմոդինամիկական հավասարակշռության վիճակի: Հիմնական չջերմամշակված թաղանթներում երևում է ուժեղ սառեցված հաղորդականություն և սառեցված ֆոտոհաղորդականություն, որը պայմանավորված է էլեկտրոնների գրավման համար բարձր արգելքով էլեկտրոնային թակարդների բացակայությամբ: Այդ թակարդները պայմանավորված են արգելված գոտու այն մակարդակով, որը գտնվում է հաղորդականության գոտուց ~120 մԷՎ էներգիայով ցածր տիրույթում: Օդում չջերմամշակումը բերում է այդ թակարդների էներգիայի մինչև 50 մԷՎ նվազեցման, որը հանգեցնում է ֆոտոհաղորդականության սառեցման նվազեցմանը:

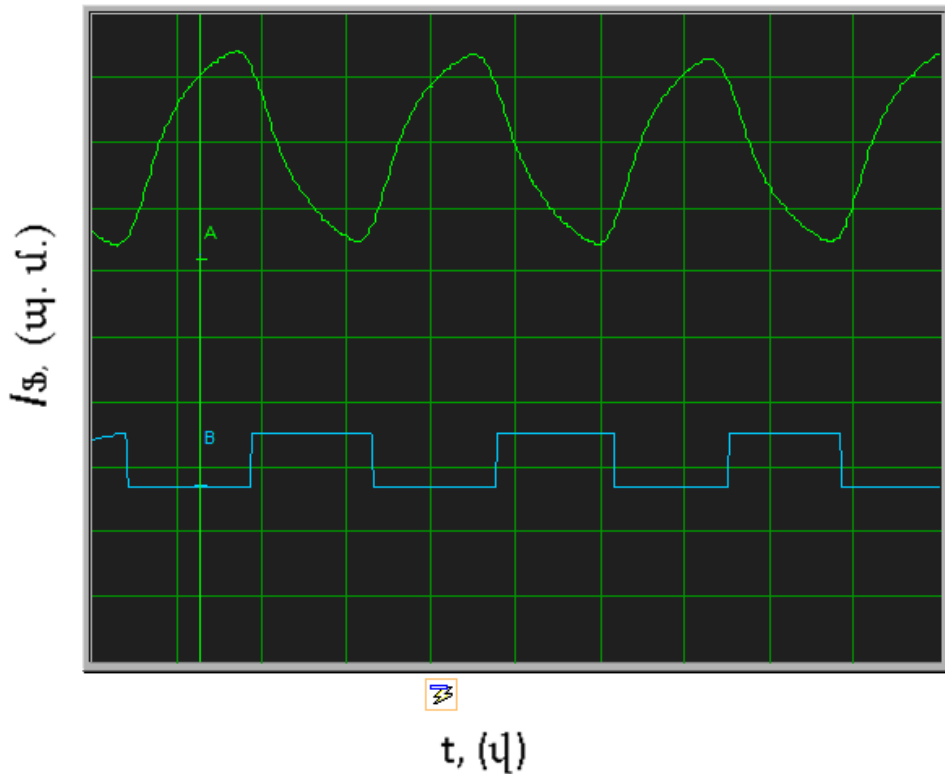


Նկ. 2.16. ZnO:Li թաղանթների ֆոտոհաղորդականության հոսանքի դանդաղ բաղադրիչի աճի և ակնման կիներտիկան:

Li-ի (0.8%)-ով լեգիրված թաղանթների հետաճային չջերմամշակումից կախված ֆոտոհաղորդականության սառեցման ռելաքսացիայի ժամանակը 40-100 վ է: Չափվել է նաև ZnO:Ga (2%)-ով թաղանթի ֆոտոհաղորդականությունը՝ օգտագործելով Al/ZnO:Ga/Al հարթ կառուցվածքը և RCL E7-8 չափիչ սարքը: Իրականացրած փորձերը ցույց են տվել, որ  $\sigma_{\text{մոլթ}}$  մթային հաղորդականությունը մինչև  $1 \text{ Վտ}\cdot\text{սմ}^{-1}$  ինտենսիվությամբ լույսով լուսավորելով ֆոտոհաղորդականության փոփոխությունն չի երևացել:

Մասնավորապես, լիցքակիրների կյանքի տևողության և ֆոտոարձագանքի ժամանակի միջև էական տարբերությունը կիսահաղորդչային նյութերում կարևորվում է անկառավարելի

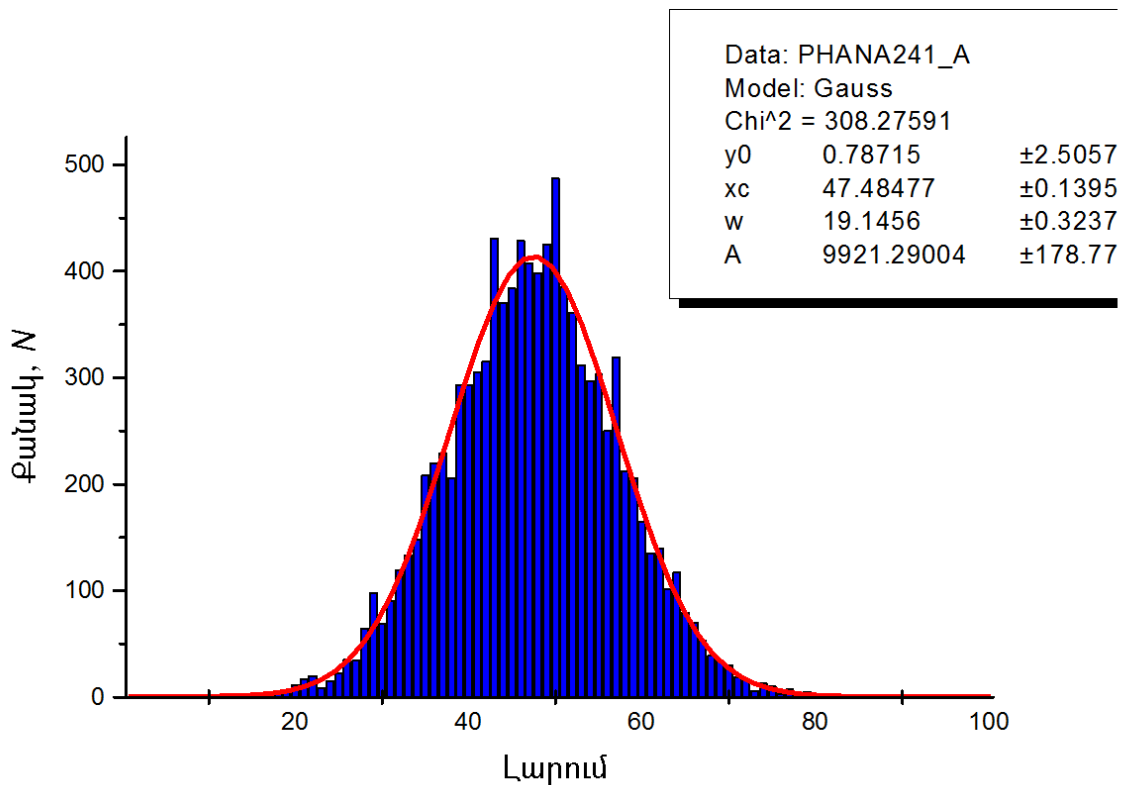
խառնուրդների պարունակությամբ: Այս խառնուրդները արգելման գոտում ստեղծում են աննշան մակարդակներ, որոնք, որպես կանոն, գտնվում են մոտիկ հաղորդականության գոտու ստորին մասին՝ մի քանի kT էներգիայի կարգին համապատասխանող հեռավորության վրա: Կիսահաղորդիչներում թակարդների հետ կարող է տեղի ունենալ ոչ միայն ռեկոմբինացիա, այլ նաև կաչուն մակարդակներում լիցքակիրների ժամանակավոր գրավում, որոնք տարբերվում են ռեկոմբինացիայի կենտրոններից նրանով, որ հաղորդականության գոտու ներքևի մոտակայքում գրաված լիցքակիրների համար ջերմային գրգռման պրոցեսը դեպի հաղորդականության գոտի ունի մեծ հավանականություն: Այդպիսի էլեկտրոնները նորից ընկնում են հաղորդականության գոտի և մասնակցում են հոսանքի տեղափոխմանը: Թակարդներ պարունակող կիսահաղորդիչներում, \$Ֆոտոարձագանքի ժամանակը, հատկապես անկման ժամանակ, լիցքակիրների ռեկոմբինացիոն պրոցեսների միջոցով կարող է գերազանցել լիցքակիրների կյանքի տևողությանը: Բացի այդ, \$Ֆոտոհաղորդականության հոսանքի անկման կորույթները էքսպոնենտային չի հանդիսանում: Նյութերը, որոնք ունեն թակարդներ, չեն կարող օգտագործվել որպես \$Ֆոտոդետեկտոր, ինչը պայմանավորված է \$Ֆոտոհոսանքի աճի և նվազեցման կորի ոչ էքսպոնենտային լինելով: Մեր փորձերում աճի և նվազեցման կորի ձևավորման ոչ էքսպոնենցիալ ուղիները երևացել է չջերմամշակված ամբողջովին մաքուր ZnO թաղանթների և Ga-ով լեգիրված թաղանթների համար: Li-ով լեգիրված ZnO թաղանթների համար աճի և նվազեցման պրոցեսը կրում է ակնհայտ արտահայտված էքսպոնենտի բնութագիր, որի օսցիլոգրաման ներկայացված է նկ. 2.17-ում: Չափման համար օգտագործվել է «National Instruments» ընկերության վիրտուալ թվային օսցիլոգրաֆ:



Նկ. 2.17. Li-նվ լ եզիրված ZnO թաղանթների ֆոտոհաղորդականության հոսանքի արագ բաղադրիչի աճի և անկման կինետիկան:

Ստորին ճառագայթը ցույց է տալիս ընկնող լույսի ինտենսիվությունը ("0"- "1"): Վերին ճառագայթը ցույց է տալիս լարումը էտալոնային դիմադրության վրա, որը հաջորդական միացված է ZnO:Li թաղանթային ֆոտոռեզիստորին:

Աղմկային բնութագրի չափման սխեման ներկայացված է նկ. 2.11.(ա)-ում: Ազդանշանը ուժեղացվել է ֆոտոդետեկտորում և մուտք է գործել (Unipan 233.7) ուժեղարարի մուտք, որը ունի 1.5 Յգ-ից 150 ԿՅգ բացթողման շերտ, 20 դԲ ուժեղացման գործակից, 100 ՄՕհմ – 1.5 պՖ մուտքային իմպեդանս և 3 դԲ սեփական աղմուկների գործակից: Դրանից հետո ղեկավարվող ազդանշանը թվայնացվել է և մուտք է գործել Labview ծրագրի փաթեթի միջոցով պատրաստված վիրտուալ ամպլիտուդային վերլուծիչը:



Նկ. 2.18. Li-ով լեգիրված ZnO թաղանթների մթային հաղորդականության աղմկային հոսանքի ամալիտուղի վերլուծության հիստոգրամը:

Նկ. 2.18-ում ներկայացված է մթային հաղորդականության աղմկային հոսանքի ամալիտուղի ստացված հիստոգրամը և դրանց գաուսյան կորի մոտարկումը:

Հաճախային դիսկրետացման համար օգտագործվել է Շենոնի ինտերպոլյացիոն թեորեմը: Ենթադրենք  $S(t)$ -ն դիսկրետացիոն համակարգ մուտք գործող իրական աղմկային ազդանշանն է, իսկ  $S_1(t)$ -ն Շենոնի համակարգով վերակառուցված ազդանշանն է: Այդ դեպքում ազդանշանի հարաբերական աղավաղումը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$\varepsilon = \frac{S_{max}(t) - S_1(t)}{S_{max}(t)}, \quad (2.5)$$

որտեղ  $S_{max}(t)$ -ն  $S(t)$  ֆունկցիայի տեղային մաքսիմումն է: Համաձայն Շենոնի ինտերպոլյացիոն բանաձևի՝  $F$  հաճախության սինուսոիդալ ազդանշանի դիսկրետացման  $F_c$  հաճախությանը պետք է բավարարի հետևյալ անհավասարությանը  $F_c \geq (2,2/\varepsilon^{1/2})F$ : Քանի որ, մեր փորձերում  $\varepsilon$ -ը գտնվում է 0.01÷0.1 միջակայքում, ապա  $F_c$

հաճախությունը պետք է լինի 5-10 անգամ մեծ, քան Շենոնի հաճախությունն է:

**ԳԼՈՒԽ 3. ԼԱՅՆԱՇԵՐՏ ZnO ԿԻՍԱՅԱՂՈՐԴԻՉՆԵՐԻ ԿՐԱ ՅԻՄԿԱՃ ԳՐԱՆՈՒԼԱՑԿԱՃ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՂՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ**

**§3.1 ZnO թաղանթների գրանուլացված կառուցվածքը**

Մեկուսացված մատրիցայում նանոչափեր ունեցող ֆերոմագնիսական մասնիկներով (գրանուլներ) գրանուլացված կառուցվածքները, որոնք ունեն օպտիկական, էլեկտրական և մագնիսական հատկություններ, էականորեն տարբերվում են բյուրեղային և ամորֆային նյութերից: Գրանուլացված կանվանենք այն նյութերը, որոնք կազմված են էականորեն տարբերվող հաղորդականություններով պատահական դասավորված փոքր տիրույթներից (գրանուլ կամ կլաստեր): Գրանուլացված կառուցվածքների տարբերվող հատկությունն է՝ պերկոլյացիոն շեմից ցածր գտնվելը, որը հիմնականում որոշվում է գրանուլների միջև թուլնելային բնութագրերով՝ արտենցիալային արգելքի բարձրությամբ և մատրիցայի տեղայնացման վիճակով:

Այդպիսի կառուցվածքների էլեկտրական հատկությունները հիմնականում կախված են հաղորդականություն ունեցող նանոմասնիկների չափերից և նրանց համախմբման ծավալային կամ մակերևութային խտություններից: Եթե մասնիկների միջին խտությունը փոքր է, ապա այդպիսի միջավայրի ստատիկ հաղորդականությունը կլինի շատ ցածր: Խտությունը մեծ լինելու դեպքում մեկ այլ իրավիճակ է, երբ զգալի թվով մասնիկներ մեկը մյուսի հետ հպման մեջ լինելով [105] կառուցվածքում կարող են ձևավորել բավականաչափ երկարաձգված հաղորդիչ կլաստերներ [106], և այդպիսի կառուցվածքի հաղորդականությունը կուսենա բարդ բնութագիր՝ պայմանավորված կիսահաղորդիչի հաղորդականությունից և նանոմասնիկների միջև անցումային շերտերից: Առանձնահատուկ հետաքրքրություն են ներկայացնում միջանկյալ խտությամբ կառուցվածքները, որոնցում միջին հեռավորությունը մասնիկների միջև նրանց չափերի կարգի են, այսինքն՝ մի քանի նանոմետրի կարգի: Այս դեպքում միջավայրի

հաղորդականությանը պայմանավորված է մասնիկների միջև էլեկտրոնների թուլեկային անցումներով:

Թուլեկային անցումների հավանականությանը կախված է գրանուլների չափերից, թուլեկային արգելքների բարձրությանից, լայնությանից և ձևերից, ինչպես նաև միջավայրի ջերմաստիճանից [6]: Կիսահաղորդչային գրանուլացված կառուցվածքների հաղորդականությանը թուլեկային ռեժիմում զգալիորեն կախված է այնպիսի կառուցվածքային և էներգետիկ անկարգությաններից, ինչպիսին են մասնիկների չափերի շեղումները, նրանց դիրքերի փոխկապակցվածությանը և պատահական պոտենցիալների առկայությանը մասնիկների վրա [107]: Թվարկված պարամետրերը կարող են տարբերվել կախված նրանց պատրաստման տեխնոլոգիաներից, ինչը բարդացնում է այդպիսի միջավայրերի հաղորդականության նկարագրումը:

Այս աշխատանքում ուսումնասիրման առարկան նաև եղել է ցինկի օքսիդի գրանուլացված կառուցվածքը, որը, ինչպես նախորդ գլխում նշեցինք ստացվել է սապֆիրե տակդիրների վրա էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակով [121]: ZnO թաղանթները պատկանում են լայնաշերտ կիսահաղորդիչների դասին: Այս թաղանթների կարևոր բնութագրիչներից է հանդիսանում հատկությունների և հաղորդականության տեսակի դեկավարումը՝ դոնորային և ակցեպտորային խառնուրդների ներմուծման միջոցով [108-110, 121]: Օրինակ, Ga-ի խառնուրդը ZnO թաղանթը դարձնում է դոնորային՝ բարձրացնում է հաղորդականությանը առանց վատացնելու օպտիկական թափանցելիությանը [111, 121], այդ նույն ժամանակ Li-ի խառնուրդը զգալիորեն իջեցնում է հաղորդականությանը [103, 112, 113]:

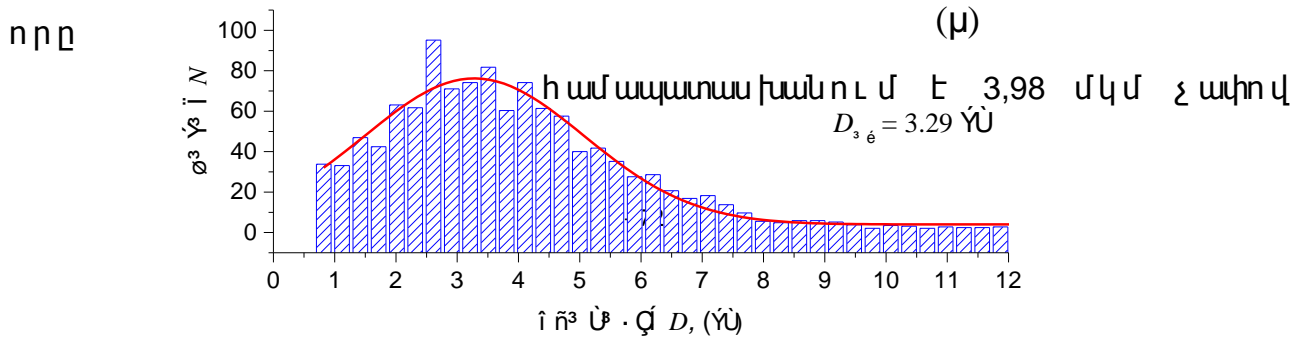
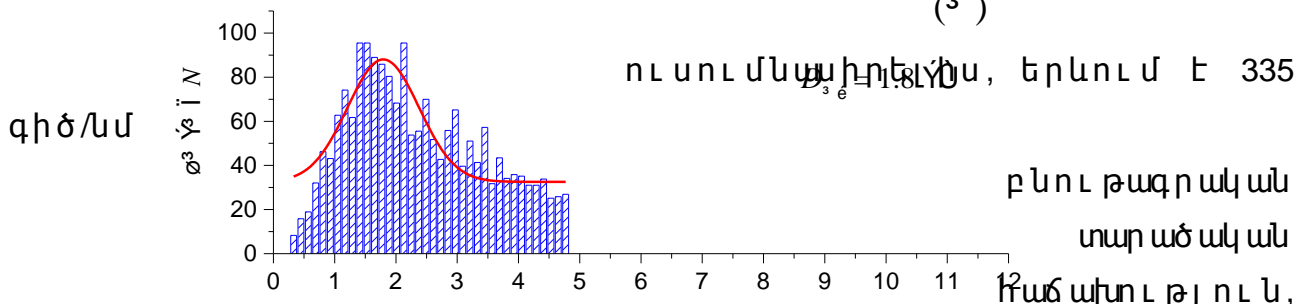
Գրանուլացված նյութերում պատահական պոտենցիալները անպայման ունենում են բնութագրական երկարություններ՝ զգալիորեն մեծ միջատոմային հեռավորություններից ընդհուպ մինչև միկրոսկոպական չափեր [114, 115]: Այս աշխատանքում հետաքրքրություն է ներկայացրել թաղանթների ձևավորումը սկզբնական շրջանում, որի ժամանակ կոնդենսացման

կենտրոններում տեղի են ունենում սաղմերի ձևավորման, աճի և խոսքման պրոցեսները: Մինչև այն ժամանակ, քանի դեռ այդ սաղմերը չեն միաձուլվել իրար, թաղանթը չի հանդիսանում ամբողջական, այլ կազմված է առանձին նանոմասնիկներից: Նստեցման պրոցեսի ժամանակ սաղմերը չափերով մեծանալով և միաձուլվելով՝ թաղանթի հարթությունում նախևառաջ առաջացնում են բազմաթիվ անընդհատ հոսանքային կանալներով պերկոլյացիոն կառուցվածքներ: Հոսանքային կանալների թիվը և թաղանթի հաղորդականություները որոշվում է առաջին հերթին երկրորդ շերտի լցվածության մակարդակով: Տակդիրի հետ կապված առումները ունենալով ջերմային էներգիա և շարժվելով մակերևույթի երկայնքով հավաքվում են պատահական առանձնացված փոքր մասնիկների տեսքով՝ ձևավորելով առանձին տեղային կլաստերներ (թաղանթի այս վիճակը անվանենք 1-ին): Հետագա նստեցման ընթացքում մասնիկները մեծանում, դիպչում, միաձուլվում են ավելի մեծ տրամագծով կաթիլներում, և տեղի է ունենում կլաստերի չափերի մեծացում (թաղանթի 2-րդ վիճակ): Այնուհետև տիրույթները ձեռք են բերում հաբիտուսի բյուրեղի ձև և ստացվում է թաղանթներ, որոնք ունեն անհամասեռ հաղորդականությամբ միջանցքային ճեղքեր (թաղանթի 3-րդ վիճակ):

Ըստ երևույթին, տակդիրի հետ մասնիկի հավոդ մասի մակերևույթի մեծացման ընթացքում նրանց կենտրոնում առաջանում են ուժեղ կապվածությամբ մասեր: Այդպիսի ամրացված մասնիկների միաձուլման դեպքում այդ մասերը նյութի խառնուրդային զանգվածի համար խաղում են ամրացված կենտրոնների դեր՝ նվազեցնելով առաջացած տիրույթներում համաչափությունը: Վերջապես, վերջին փուլում ձևավորվում է ամբողջական թաղանթները, երբ ճեղքերի հիմնական մակերեսը տիրույթների միջև փոքր է և տեղայնացված էլեկտրոնները կարող են կատարել թուլնելային անցում այդ ճեղքերով (թաղանթի 4-րդ վիճակ): Թաղանթի հաստության մեծացումը, հոսանքային կանալների քանակի աճի պատճառով, բերում է հաղորդականության աճի, հետո ամբողջ թաղանթով տեղի է ունենում համասեռ հաղորդականությամբ միաձուլում:

ZnO թաղանթների ձևաբանության՝ բյուրեղական որակի և բյուրեղների չափերի ուսումնասիրության համար օգտագործվել է էլեկտրոնային վերծանող “Vega 5130MM” միկրոսկոպը, որով ստացված պատկերները ցուցադրված են 2-րդ գլխի 2.5 և 2.6 նկարներում և DPOH-3 ռենտգենյան դիֆրակտամետր (ճառագայթումը՝  $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 0.1542$  նմ ալիքի երկարությամբ), որի հետազոտությունը նկարագրված է 2.4 պարագրաֆում, իսկ ստացված արդյունքները ցուցադրված են աղյուսակ 2.1-ում: Թաղանթների բյուրեղների միջին չափը որոշվել է դիֆրակցիոն գագաթի պրոֆիլի լայնությամբ՝ համաձայն Շերարի բանաձևի: Չայտնաբերվել է, որ գրանուլների չափերը մեծանում են 20-80 նմ, երբ թաղանթի հաստությունը մեծանում է 100-800 նմ:

Թաղանթների միկրոֆոտոգրաֆիան, որը ստացվել է էլեկտրոնային միկրոսկոպի վերծանման միջոցով՝ օգտագործվել է թաղանթը ձևավորող նանոմասնիկների չափերը որոշելու համար: Որպես չափվերցվել է շրջանագծի տրամագիծը, որում տեղավորվել է մասնիկների պատկերը: Ստացված տվյալների հիման վրա կառուցվել է մասնիկների դասավորվածության ստատիկ հիստագրերը՝ գրանուլների կոնցենտրացիայի կախումը չափերից: Ստացված կախվածությունները մոտարկվել են գաուսի ֆունկցիայով: Նկ. 3.1-ում ներկայացված է ZnO:Ga թաղանթի չափերից կախված գրանուլների դասավորվածության հիստագրերը, որը կառուցվել է 125 նմ (ա) և 542 նմ (բ) հաստությամբ թաղանթերի էլեկտրոնային միկրոսկոպի նկարների ստատիկ ուսումնասիրման արդյունքների հիման վրա: Չաստության մեծացմանը զուգահեռ երևում է մաքսիմումների դասավորվածության ոչ մեծ տեղաշարժ: Ինչպես նկարագրված է 3.3 պարագրաֆում, հոսանքի տարածակն  $\Phi_{(3)}$  ու կտուցիաները





գրանուլին: Յիստոգրամից երևում է, որ 542 նմ հաստությամբ թաղանթում նկատվում է այդպիսի չափերով գրանուլների մեծ կոնցենտրացիա:

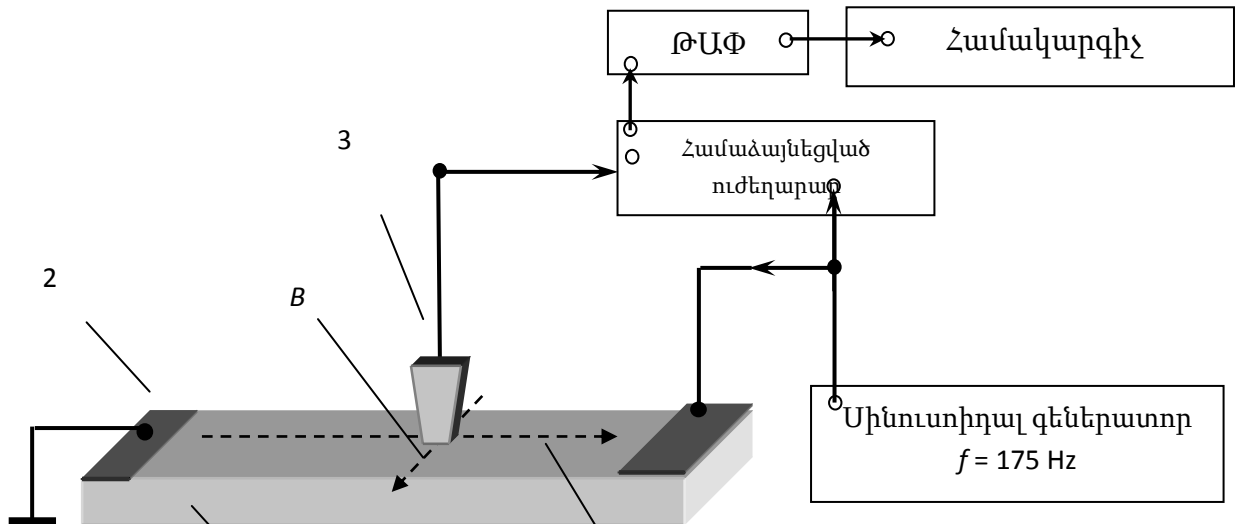
*Նկ. 3.1. 125 նմ (ա) և 542 նմ (բ) հաստությու ն ներով ZnO:Ga թաղանթների գրանուլների բաշխվածությու նը:*

### **§3.2. Թաղանթներում տեղային հոսանքի խտությու նը չափելու համար մշակված նոր համակարգը**

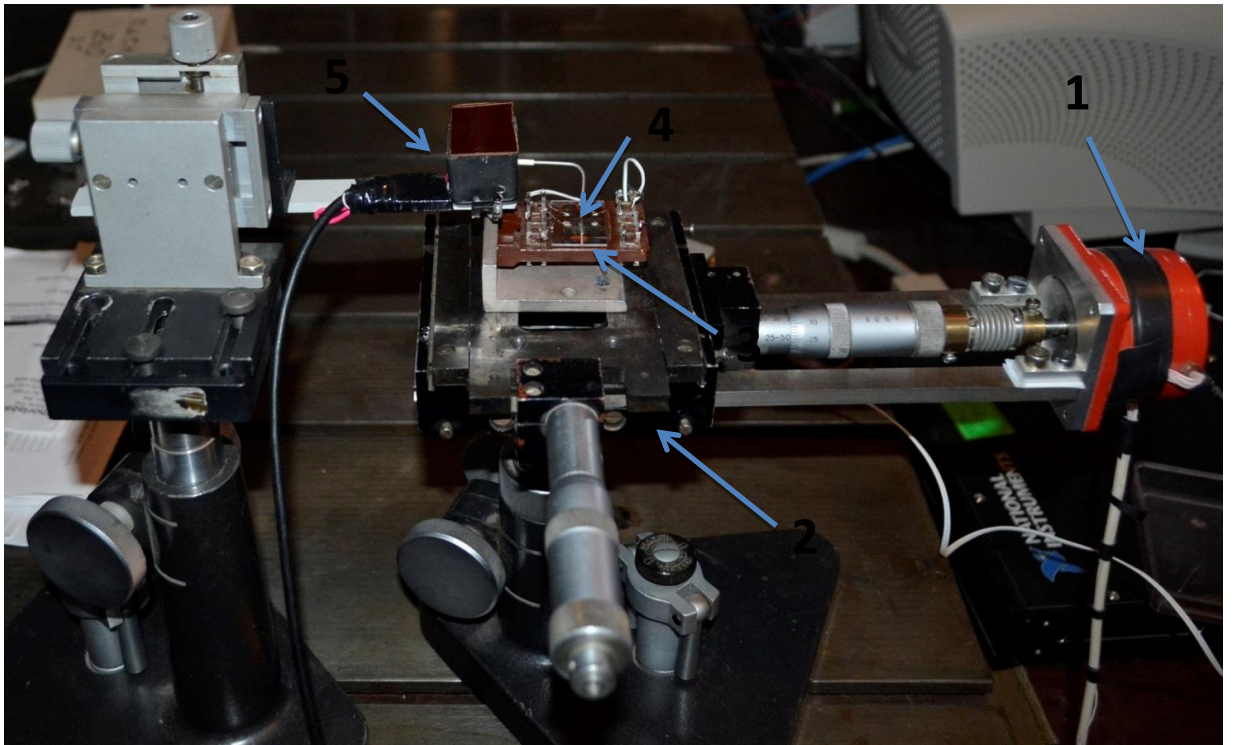
Այս աշխատանքում առաջարկվել է սկզբունքորեն նոր մեթոդ թաղանթներում պերկոլյացիոն հաղորդականության դեպքում տեղային հոսանքների խտությու նը չափելու համար [5]: Մշակվել է համակարգ, որի կառուցվածքը ներկայացված է նկ. 3.2-ում, իսկ լուսանկարը պատկերված է նկ. 3.3-ում: Al/ZnO:Li/Al կամ Al/ZnO:Ga/Al հարթ կառուցվածքների միջով բաց է թողնվել 175 Յգ հաճախականությամբ էլեկտրական հոսանք: Տեղային հոսանքների մեծությու նը չափվել է ST-251 կոշտ սկավառակի MIG (Metal in the head gap) տեսակի մագնիսական գլխիկի միջոցով (նկ. 3.4 և նկ. 3.5), որը աշխատում է հոսանքի տրանսֆորմատորի ռեժիմում: Եթե հոսանքի հոսքը գտնվում է 1-ին դիրքում, ապա տրանսֆորմատորի ելքում հոսանքը բացակայում է, իսկ եթե հոսանքի հոսքը գտնվում է 2-րդ դիրքում, այսինքն՝ մագնիսական վերծանիչի օդային ճեղքի տիրույթում, ապա հոսանքի ազդանշանը տրանսֆորմատորի ելքում համեմատական է տեղային հոսանքի մեծությանը: Մագնիսական վերծանիչով ազդանշանի գրանցումը իրականանում է սինքրոն նաևովու տետրի միջոցով:

Նմուշի վերծանումը տեղի է ունեցել հոսանքի գծերին զուգահեռ և ուղղահայաց, որը նկ. 3.2-ում ցուցադրված է A և B

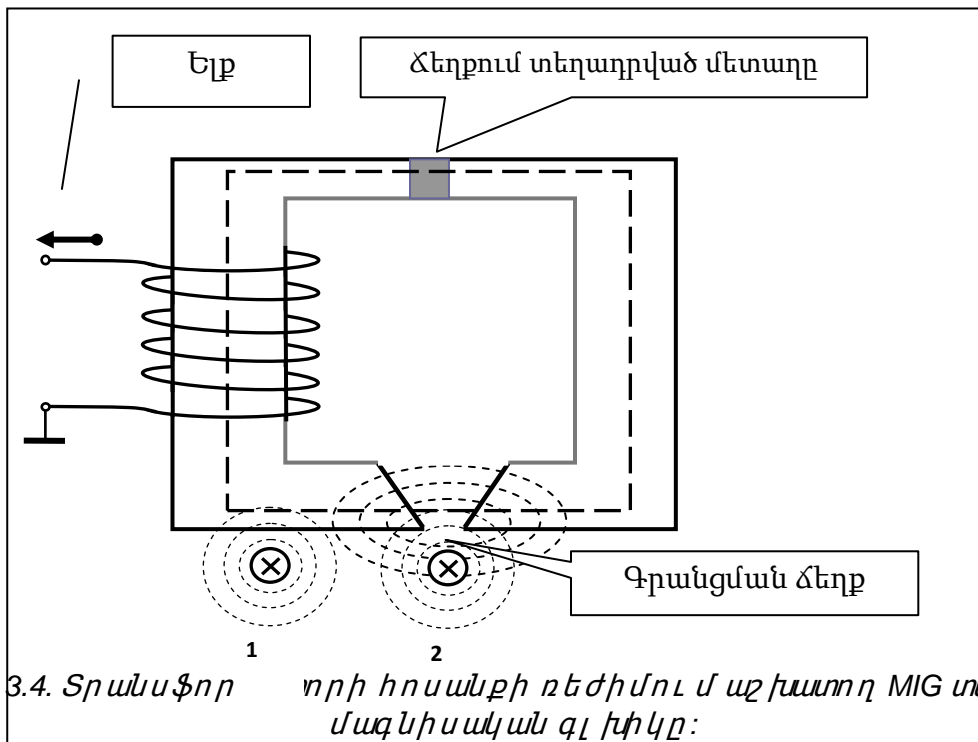
սլաբներով: Վերծանիչի մեխանիկական տեղափոխումը իրականացվել է օգտագործելով «THORLABS» ընկերության Z612 շարժաբերը: Փորձի ղեկավարումը տեղի է ունեցել «National Instruments» ընկերության DAC համակարգի միջոցով (Նկ. 3.6): Թաղանթի բնութագրերը չափելու համար մշակվել է մաթեմատիկական ապահովում և կառուցվել է վիրտուալ գործիքներ [7]:



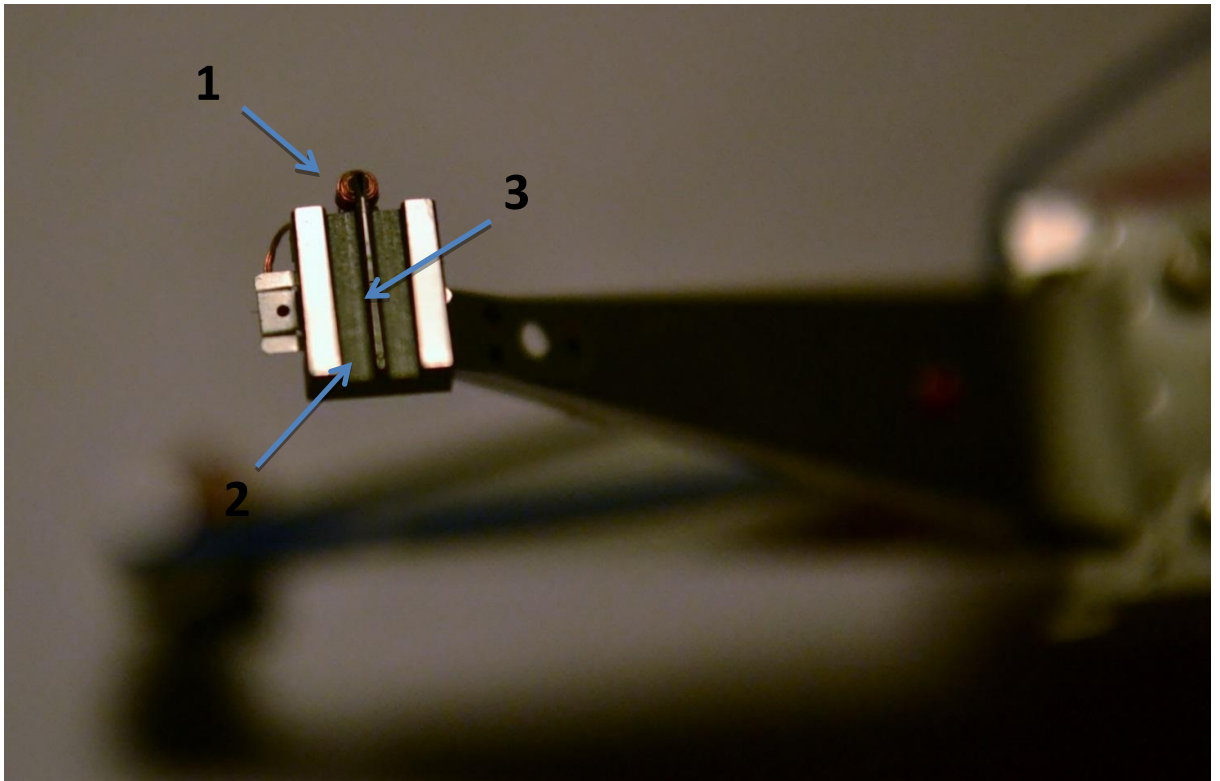
Նկ. 3.2. Տեղ. 1 – ի հոսանքի խողովակի մեջ չափումներ իրականացնող համակարգի ղեկավարումը: 1 – ... Ga/Al կամ Al/ZnO:Li/Al հարթ կառուցվածքը, 2 – մետաղական էլեկտրոդները, 3 – MIG տեսակի մագնիսական վերծանիչը, որը աշխատում է հոսանքի տրանսֆորմատորի ռեժիմում:



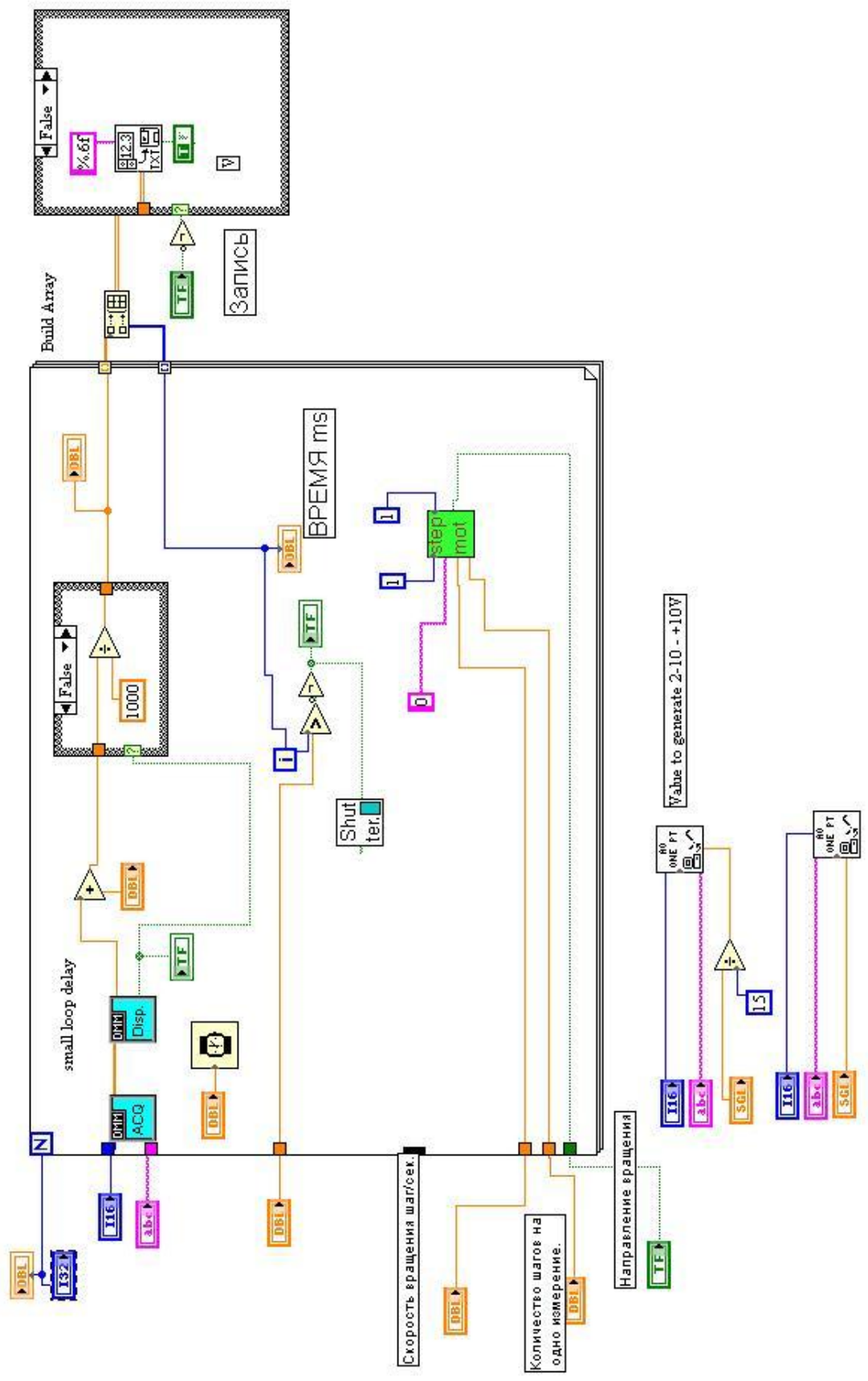
Նկ. 3.3. Տեղային հոսանքի չափման համակարգի լուսանկարը. 1 – քայլային շարժիչը, 2 – միկրոմետրական սեղանը, 3 – հետազոտվող ZnO թաղանթի նմուշը, 4 – MIG (metal in the head gap) մագնիսական վերծանող գլխիկը, 5 – MIG մագնիսական վերծանիչը կրող համակարգը:



Նկ. 3.4. Տրանսֆորմորի հոսանքի ռեժիմում աշխատող MIG տեսակի մագնիսական գլխիկը:



*Նկ. 3.5. MIG մագնիսական վերծանող գլխիկի պատկերը.  
1-ելքային ազդանշանի կոճը, 2- մագնիսապարախակիչը,  
3-ազդանշանի գրանցման օդային բացվածքը:*



Նկ. 3.6. National Instruments»-ի թիթեղի վիրտուալ սարքի բլոկ տեղ է ապակե տակդիրի վրա միաց ախ և երկչ ախ ցանցի տեսքով թեստայ ին

հաղորդիչ կառուցվածքներ: Օգտագործելով տրաֆարետներ՝ ջերմային նստեցման մեթոդով պատրաստվել են 200 նմ շերտի հաստությամբ արծաթե հաղորդիչներ, որոնց լայնությունը և նրանց միջև հեռավորությունը եղել է 31 մկմ: Այս նույն եղանակով պատրաստվել են 62 մկմ քայլով կամ 16,1 գիծ/մմ տարածական հաճախականությամբ միաչափ հաղորդիչ ցանցեր: Նկ. 3.7-ում ներկայացված են թեստավորման արդյունքները, որից պարզ է, որ հոսանքները գրանցվում են յուրաքանչյուր հաղորդչում, իսկ հոսանքի ազդանշանի Ֆուրյե ձևափոխությունից երևում է, որ տարածական հաճախականությունը  $A=15,92$  գիծ/մմ է: Ֆուրյե ձևափոխությունը հաշվելու համար օգտագործվել է արագ Ֆուրյե ձևափոխության (FFT) ալգորիթմը:

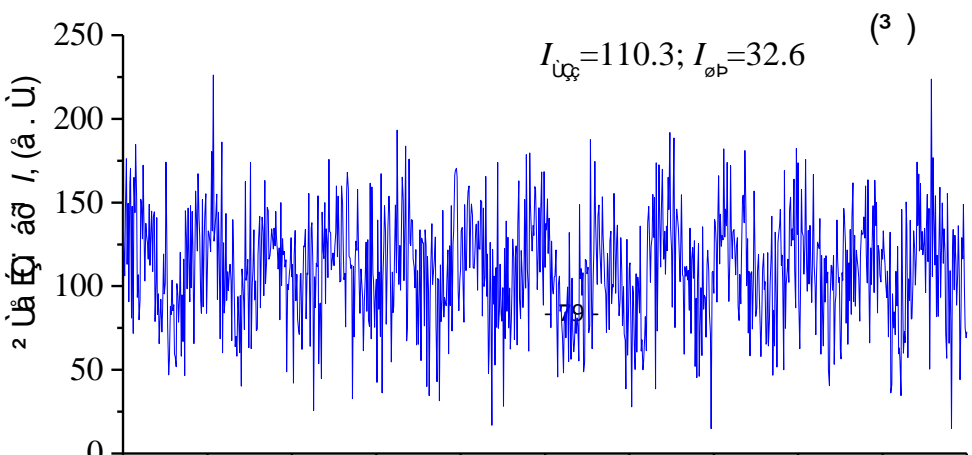
*Նկ. 3.7. Թեստային կառուցվածքի վերծանման դեպքում հոսանքի կախվածությունը տարածական կոորդինատներից և հոսանքի տարածական տեղաբաշխման Ֆուրյե ձևափոխությունը:*

**§3.3. Ալցեպտրային (Li) և դոնորային (Ga) խառնուրդներով լեգիրված ZnO գրանուլացված թաղանթների հաղորդականություն և ֆոտոհաղորդականություն ու սումմաիրությունները**

Ga-ով և Li-ով լեգիրված ZnO թաղանթները ստացվել են

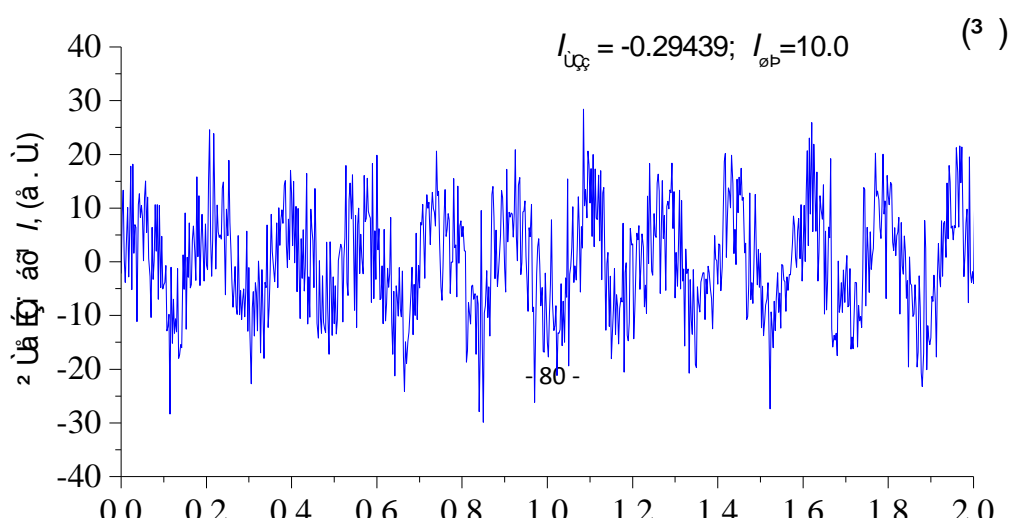
Էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակով (0001) կողմնորոշվածություներ ունեցող սապֆիրե տակդիրների վրա, որն ապահովում է տակդիրի հարթությանն ուղղահայաց [0001] առանցքային կողմնորոշում ունեցող թաղանթներ: Այս նստեցման եղանակը բերում է թթվածնի պակասով թաղանթների պատրաստման, այդ պատճառով նրանք լրացուցիչ ջերմամշակվում են օդում՝ թթվածնով հագեցնելու համար: Այդպիսի ջերմամշակումը բերում է թթվածնային թափուր տեղերի նվազեցման և, հետևաբար նվազեցնում է դոնորային կենտրոնները: Արդյունքում ստացվել են գրանուլացված ցինկի օքսիդի թաղանթներ, որոնք պարունակում են ինչպես դոնորային, այնպես էլ ակցեպտորային կենտրոններ: Որպես օհմական կոնտակտներ օգտագործվել են ալյումինե էլեկտրոդներ, որոնք ստացվել են վակուումային նստեցման ջերմային եղանակով: Ֆոտոխառնուրդային պրոցեսները բացառելու համար թաղանթի մակերևույթը ծածկվել է  $MgF_2$  պաշտպանիչ շերտով: Հաղորդականության չափումները իրականացվել են՝ օգտագործելով Al/ZnO:Ga/Al հարթ կառուցվածքները:

Նկ. 3.8.(ա)-ում ներկայացված է 3-րդ վիճակի (ճեղքերի ձևավորման սկզբում) ZnO:Ga թաղանթի հոսանքի մեծության կախվածությունը տարածական կոորդինատներից հոսանքի գծերին ուղղահայաց վերձանման դեպքում: Նկ. 3.8.(բ)-ում ներկայացված է հոսանքի տարածական կախվածության Ֆուրյե ձևափոխությունը: Ինչպես երևում է նկարից, հոսանքի մեծությունն ունի բավականաչափ մեծ տարածական ֆլուկտուացիա (նկարում ներկայացված է  $I_{\text{rms}}$  հոսանքի միջին մեծությունը և  $I_{\text{pc}}$  միջին քառակուսային շեղումը): Ֆուրյե ձևափոխությունից առանձնանում է 12,7 գիծ/սմ տարածական հաճախականության համապատասխան գագաթը: Սա նշանակում է, որ պերկալյացիոն գրանուլները (հաղորդականության կլաստերները) այդ ուղղությամբ ունեն 78,7 մկմ բնութագրական չափեր:



Նկ. 3.8. Հոսանքի կախվածությունը տարածական կոորդինատներից 3-րդ վիճակի (պրոցեսի սկիզբ) 126 նմ հաստությամբ ZnO:Ga թաղանթների համար հոսանքի գծին ուղղահայաց վերժանման դեպքում (ա):  
Հոսանքի տարածական տեղաբաշխման հոլը Ե ձևափոխությունը (բ):

Նկ. 3.9.(ա)-ում ցուցադրված է հոսանքի կախվածությունը տարածական կոորդինատներից, այդ նույն թաղանթների հոսանքի գծերին զուգահեռ ուղղությամբ: Նկ. 3.9.(բ)-ում ներկայացված է հոսանքի տարածական կախվածության համապատասխան հոլը Ե ձևափոխությունը: Ինչպես երևում է նկարից հոսանքի մեծությունը ունի նույն կարգի տարածական ֆլուկտուացիաներ ինչ-որ ունեն հոսանքի գծերին ուղղահայաց չափման դեպքում (նկարում ցուցադրված է  $I_{միջ}$  հոսանքի միջին մեծությունը և ստանդարտ  $I_{\sigma}$  միջին քառակուսային շեղումը): Հոլը Ե ձևափոխությունով առաջանում է 55 գիծ/մմ տարածական հաճախականությամբ գագաթ, որը համապատասխանում է 18,1 մկմ-ին: Այդ չափումները ցույց են տալիս, որ ZnO թաղանթների պերկոլյացիոն հաղորդականության գրանուլները 3-րդ վիճակում ունեն 78x18,1 մկմ<sup>2</sup> բնութագրական չափեր:

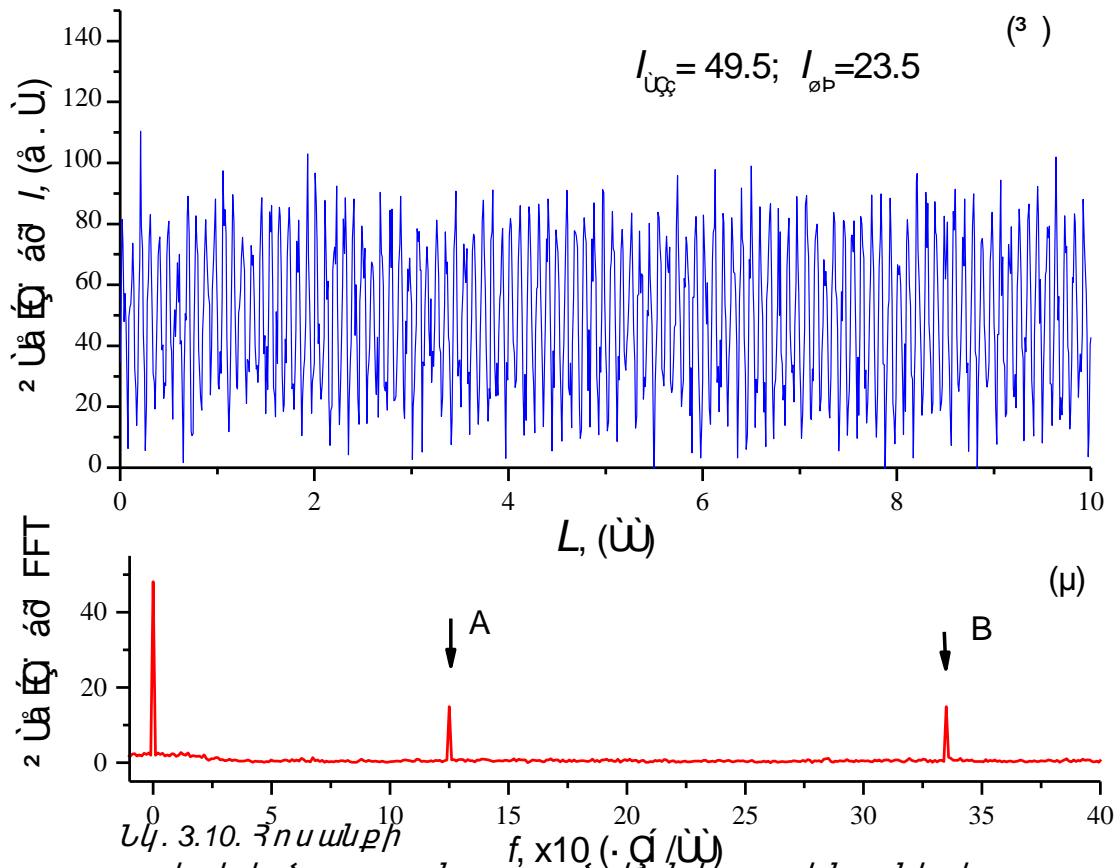




*Նկ. 3.9. Հոսանքի կախվածությունը տարածական կոորդինատներից 3 վիճակի*

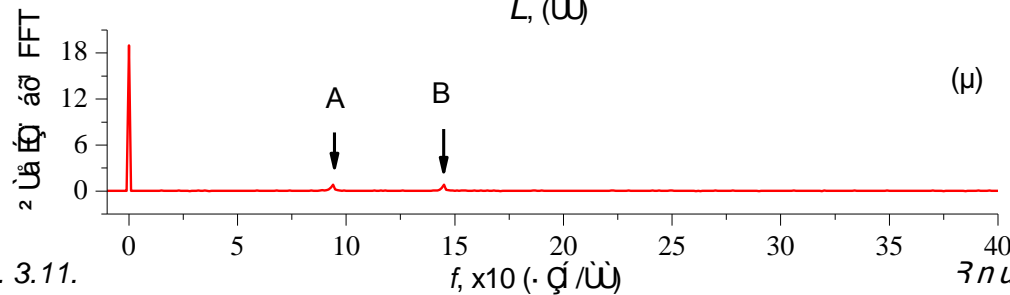
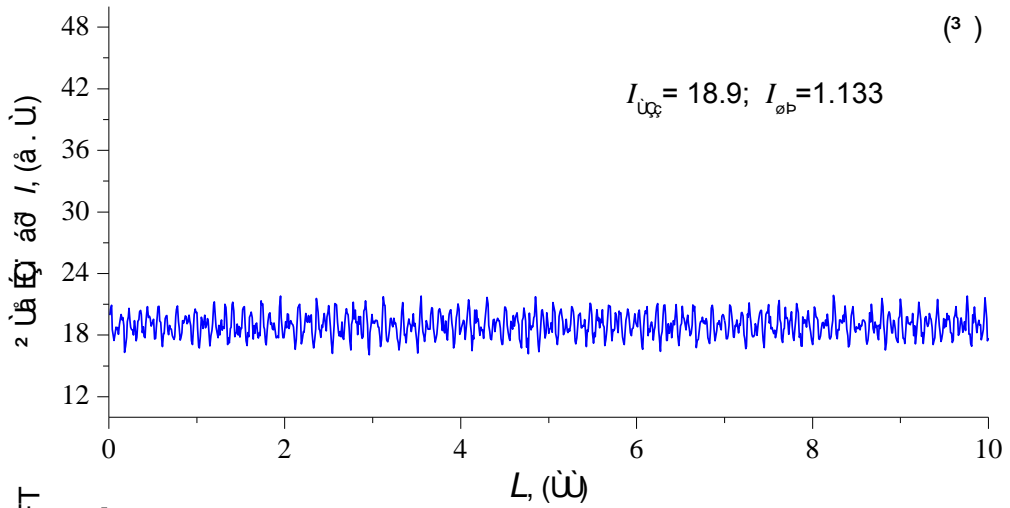
*(պրոցեսի սկիզբ) ZnO:Ga թաղանթների համար՝ հոսանքի գծերին գու գահեռ վերծանման դեպքում (ա): Հոսանքի տարածական տեղաբաշխման Ֆուրյե ձևափոխությունը (բ):*

Նկ. 3.10-ում ներկայացված է 4-րդ վիճակի ZnO:Ga թաղանթի նույնափսի կախվածությունն հոսանքի գծերին ուղղահայաց վերծանման դեպքում: Երևում է, որ տարածական ֆլուկտուացիաների մեծությունը փոքրանում է, փոխվում է նաև հոսանքի տարածական կախվածության Ֆուրյե ձևափոխությունը: Առաջանում է երկու բնութագրական չափ: Ֆուրյե ձևափոխությունում առաջանում է երկու գագաթ՝  $A=120$  գիծ/մմ և  $B=335$  գիծ/մմ: Հոսանքի գծերի երկայնքով վերծանման դեպքում երևում է  $B=335$  գիծ/մմ մեկ բնութագրական չափ:  $335$  գիծ/մմ բնութագրական չափերից մեկը, որը համապատասխանում է  $2,98$  մկմ գրանուլի չափին, երևում է նաև էլեկտրոնային վերծանող միկրոսկոպի միջոցով ստացված նկարներում:



Նկ. 3.10. Հոսանքի կախված ությունը տարածական կոորդինատներից 4-րդ վիճակի (պրոցեսի սկիզբ) 320 նմ հաստությամբ ZnO:Ga թաղանթի համար՝ հոսանքի գծերին ուղղահայաց վերծանման դեպքում (ա): Հոսանքի տարածական տեղաբաշխման հոլը  $\rho$  և  $\delta$  նախորդ ությունը (բ):

Նկ. 3.11-ում ներկայացված է նույն անիսի կախված ությունը ներ 4-րդ վիճակի ZnO:Ga թաղանթի համար, սակայն, այստեղ թաղանթի հաստություը էականորեն մեծ է նկ. 3.10-ում պատկերված թաղանթի հաստության նկատմամբ (800 նմ): Երևում է, որ տարածական հոլը կտուրացիաների մեծ ությունը շարունակում է նվազել, փոխվում է նաև տարածական հաճախության չափերը՝ համապատասխանաբար  $A = 94$  գիծ/մմ և  $B = 140$  գիծ/մմ:

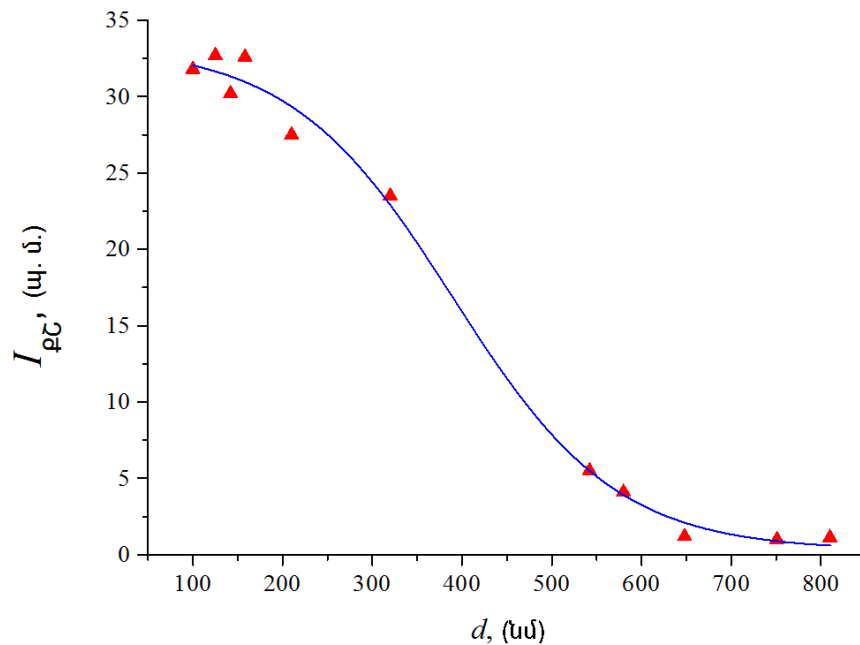


Նկ. 3.11.

Կախվածությունը տարածական

կորոդինատներից 4-րդ վիճակի (պրոցեսի սկիզբ) 800 նմ հաստությամբ ZnO:Ga թաղանթի համար՝ հոսանքի գծերին ու ղղահայաց վերծանման դեպքում (ա):

Հոսանքի տարածական տեղաբաշխման հոլը և ձևափոխությունը (բ):

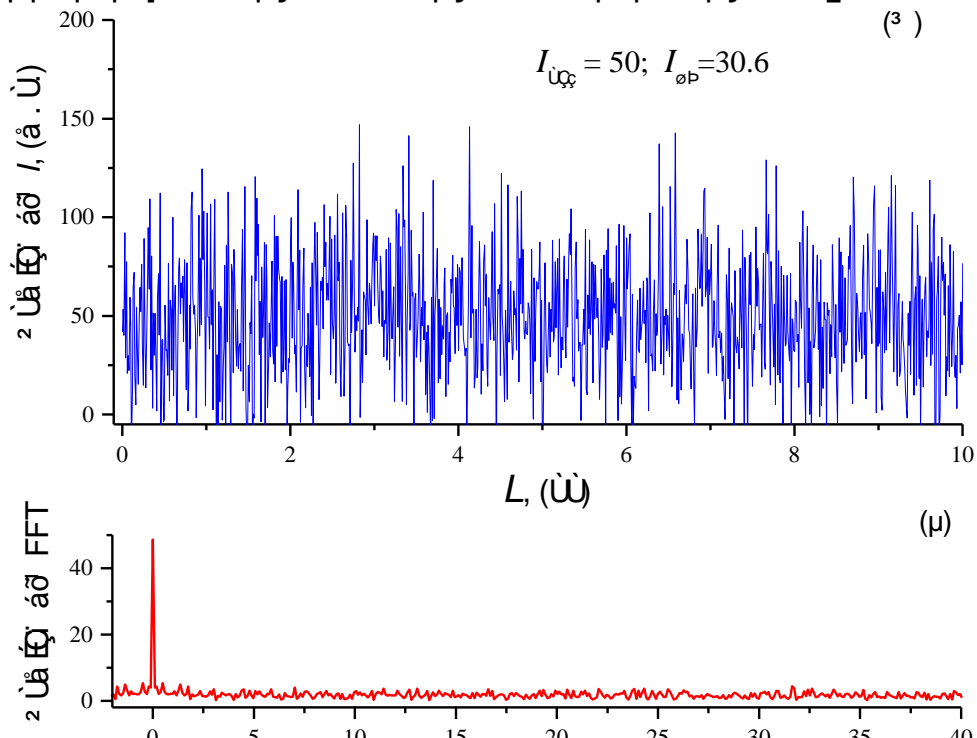


Նկ. 3.12. Տարածական հոլ ու կտուղացիաների միջին քառակուսային կախվածությունը նրա հաստությամբ ZnO:Ga թաղանթի հաստությամբ:

Պերկոլյացիոն հաղորդականության տիրույթում երևում է տարածական հոլ ու կտուղացիաների մեծության կախվածությունը

թաղանթների հաստությունը: Նկ. 3.12-ում ներկայացված է հոսանքի միջին քառակուսային շեղման ( $I_{\text{ԸԾ}}$ ) կախումը թաղանթների հաստությունից: Ինչպես երևում է նկարից, տարածական ֆլուկտուացիաների մեծությունը կտրուկ նվազում է 300-500 նմ հաստության տիրույթում:

Իրականացվել է նաև ակցեպտորային Li-ի խառնուրդով գրանուլացված թաղանթների ուսումնասիրություն [10]: Այդպիսի թաղանթներում գոյություն ունեն ինչպես ակցեպտորային կենտրոններ, այնպես էլ դոնորային կենտրոններ՝ պայմանավորված ցինկի միջհանգույցային իոններով և թթվածնային թափուր տեղերով: Նկ. 3.13.(ա)-ում ցուցադրված է 3-րդ վիճակի (սկզբնական ճեղքավորման պրոցեսում) ZnO:Li թաղանթների հոսանքի կախվածությունը տարածական կոորդինատներից՝ հոսանքի գծերին ուղղահայաց վերձանման դեպքում: Նկ. 3.13.(բ)-ում ցուցադրված է հոսանքի կախվածության Ֆուրյե ձևափոխությունը:

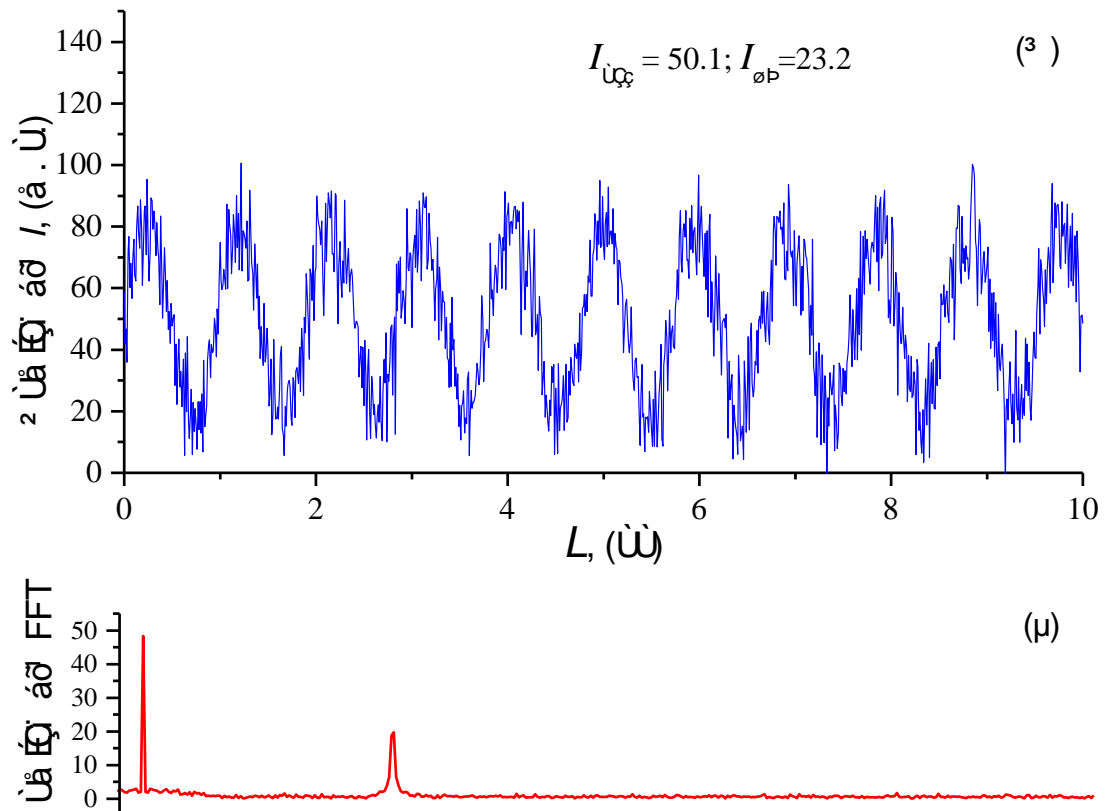


Նկ. 3.13. Հոսանքի կախվածությունը տարածական կոորդինատներից 3-րդ վիճակի ZnO:Li թաղանթի համար (ա):  
Հոսանքի տարածական տեղաբաշխման Ֆուրյե ձևափոխությունը (բ):

Ինչպես երևում է նկարից, հոսանքի խտությունն ունի բավականաչափ մեծ տարածական ֆլուկտուացիա, իսկ Ֆուրյե ձևափոխությունը չունի առանձնացված գագաթներ: Սա նշանակում է, որ ZnO:Li թաղանթների համար պերկուլյացիոն կլաստերները չունեն

բնութագրական չափեր: Անհրաժեշտ է նշել, որ այս թաղանթներն ունեն բավականաչափ մեծ դիմադրություն, քան առանց խառնուրդի կամ Ga-ի խառնուրդով թաղանթները:

Այս թաղանթները 3,2 էՎ ֆոտոնային էներգիայով UV ճառագայթմամբ լուսավորելու դեպքում՝ մթային հոսանքի կողքին առաջանում է նաև ֆոտոհոսանք: Հաշվի առնելով, որ գումարային ֆոտոհոսանքը շատ է գերազանցում մթային հոսանքին, մենք ենթադրում ենք, որ այս դեպքում տարածական դասավորվածությունը պայմանավորված է հենց ֆոտոհոսանքով:



Նկ. 3.14. Հոսանքի կախվածությունը տարածական կոորդինատներից 3 վիճակի ZnO:Li թաղանթի (a) լուսավորման դեպքում (ω):  
Հոսանքի տարածական տեղաբաշխման ֆուրյե ձևափոխությունը (ρ):

Նկ. 3.14-ում ներկայացված է ֆոտոհոսանքի կախվածությունը 3-րդ վիճակի ZnO:Li-ի թաղանթի համար: Երևում է, որ լուսավորման դեպքում առաջանում են բնութագրական չափերով կլաստերներ: Եթե մթային հոսանքի դեպքում պերկոլյացիոն կլաստերները չունենին բնութագրական չափեր, ապա լուսավորման և ֆոտոհոսանքի առկայության ժամանակ այդ նույն թաղանթներում երևում են պարբերական կառուցվածքներ: Իսկ ֆուրյե ձևափոխությունում

երևում է գազաթ՝ պայմանավորված նոր 127 գիծ/մմ տարածական պարբերությամբ: Դանշանակում է, որ ֆոտոհոսանքի պերկոլյացիոն կլաստերներն ունեն 7,8 մկմ բնութագրական չափեր:

#### **ԳԼՈՒԽ 4. ԼԻԹՈՒՄՈՎ ԼԵԳԻՐՎԱԾ ZnO ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՅԻՄԱՆ ՎՐԱ ՄԵՄՐԻՍՏՈՐՆԵՐԻ ՆԱԿԱԳՏՈՒՄԸ ԵՎ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ**

##### **§4.1. Մեմրիստորային հիշողություն տարրերը**

Չաչվողական տեխնիկայի կարևոր բաղադրիչներից է հանդիսանում պինդմարմնային էներգաանկախ վերագրանցվող հիշողություն տարրերը [1–3]: Այդ բնագավառում մեծ հեռանկարներ ունի այն եղանակը, որտեղ կիրառվում է մեմրիստորային երևույթը [116–118]: Մեմրիստորային հիշողություն տարրերը ստացել են ReRAM (resistive random-access memory) անվանումը: Մեմրիստորները, դրանք ռեզիստիվ տեսակի էլեկտրոնային համակարգեր են, որոնք ունեն հիստերիզիսային ոչ-գծային վոլտ-ամպերային բնութագրեր (V-I):

ReRAM-ները գործառնական տիրույթում ունեն 5 նմ-ի կարգի չափեր, որոնք զգալիորեն փոքր են, քան ժամանակակից սիլիցիոնային տարրերը: Մեմրիստորները, բացի ինֆորմացիա պահելուց, կարող են նաև իրականացնել ինֆորմացիայի մշակում: Մեմրիստորները սովորական տարրերից տարբերվում են նրանով, որ ինչպես երկկայուն (թվային), այնպես էլ անալոգային ռեժիմներում կարողանում են իրականացնել ինֆորմացիայի գրանցման և ընթերցման գործողությունները [119,120]:

$TiO_{2-x}$  և  $ZnO_{1-x}$  օքսիդային թաղանթների փոխարկման հատկությունները պայմանավորված են էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ՝ թթվածնային թափուր տեղերի տեղափոխությամբ [121]: Մեմրիստորների գործառնականությունում մեծ դեր են խաղում օքսիդի հետ մետաղական կոնտակտները: Մեմրիստորային երկույթ կարող է առաջանալ մետաղ-կիսահաղորդիչ սահմանին՝ Շոտկի արգելքի բնութագրական փոփոխության շնորհիվ: Այդ փոփոխությունը պայմանավորված է էլեկտրական դաշտում միջփոխային սահմանին լիցքավորված թթվածնային թափուր տեղերի տեղաշարժմամբ [122]: Գրականության մեջ նկարագրվում են նաև այլ մեխանիզմներ, որոնք որոշում են մեմրիստորի հիստերեզիսը և ոչ-գծային V-I-ը, բայց, այսպես թե այնպես, այդ մեխանիզմները կախված են օքսիդե նյութերի ոչ ստեխիոմետրիայից և իոնների շարժունակությունից:

Մետաղ-օքսիդները վաղուց են գրավել ուշադրությունն իրենց ոչ սովորական էլեկտրական հատկությունների շնորհիվ, որոնք, հատկապես ակնհայտ են դառնում նմուշի էլեկտրական ձևավորումից հետո կիրառելով հոսանքի իմպուլսներ: Մասնավորապես, հետաքրքրություն են ներկայացնում ոչ ստեխիոմետրական ZnO թաղանթները, որոնք, ի շնորհիվ իրենց հատկությունների, հանդիսանում են հեռանկարային նյութեր թափանցիկ մեմրիստորների ստեղծման համար:

Սակայն թափանցիկ մեմրիստորների լայնամասշտաբ կիրառումը միկրո և նանո էլեկտրոնիկայում կանխում են մի քանի չլուծած խնդիրներ: Դրանցից մեկը՝ հիշողության համապատասխան բիթի էներգաօգտագործումը նվազեցնելու անհրաժեշտությունն է,

երկրորդը՝ Շոտկի արգելքի կառուցումն է՝ օգտագործելով թափանցիկ էլեկտրոդներ, այսինքն՝ առանց օգտագործելով մետաղական թաղանթներ: Մեմրիստորների համար մետաղների ընտրության ժամանակ կարևոր է մտածել գրանցման և ընթերցման ընթացքում ջերմության անջատման խնդիրը: Այդ խնդիրը Pt/TiO<sub>2</sub>/Pt կառուցվածքի համար մանրամասն քննարկվել է աշխատանք [123]-ում:

#### **§4.2. Li-ով լեգիրված ZnO թաղանթների հիման վրա 1D1R տիպի հիշողության տարրի նախագծումը**

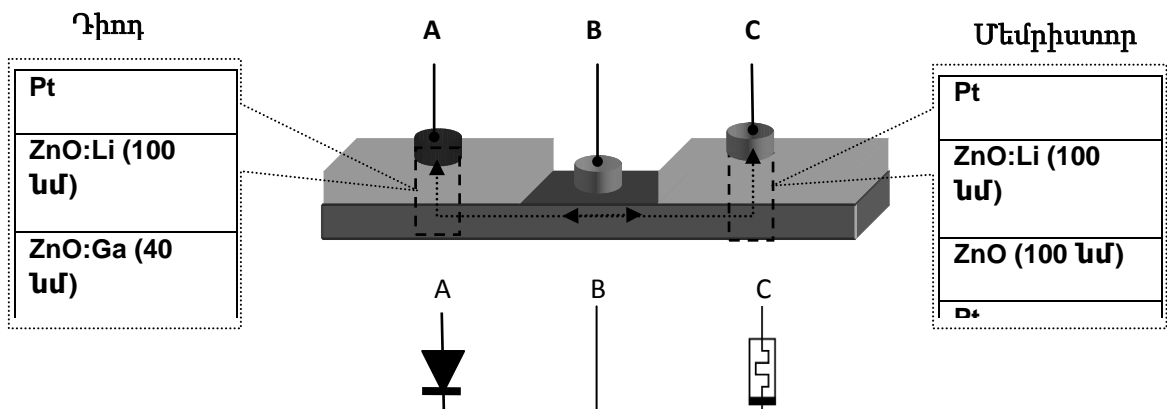
Էլեկտրոնաճառագայթման վակուումային նստեցման եղանակով սապֆիրե տակդիրների վրա ստացվել են լեգիրված ZnO:Ga և ZnO:Li թաղանթները, պատված մետաղական պլատինե շերտերով (մանրամասն նկարագրությունը տրված է 2.1. և 2.2. պարագրաֆներում) [96, 124]: Պլատինե էլեկտրոդները ստացվել են բարձրիաճախային կաթոդային նստեցման եղանակով: Թաղանթների նստեցման համար որպես թիրախներ օգտագործվել են ZnO, ZnO:Li (1%-ով), ZnO:Li (8%-ով) և ZnO:Ga (2%-ով) փոշիներից սինթեզված կերամիկական կոճակները [121]: Բոլոր թաղանթները պատրաստված են եղել նույն պայմաններում. էլեկտրոնների էներգիան եղել է ~6 կԷՎ, տակդիրի ջերմաստիճանը պահպանվել է 250±1°C և աճի արագությունը եղել է 1,45 Å/վ: Օգտագործված եղանակը ապահովում է թթվածնով աղքատ թաղանթների ստացում, արդյունքում ստացվել են կոմպենսացվող կիսահաղորդիչներ, որոնք պարունակում են ինչպես դոնորային (թթվածնային թափուր տեղեր), այնպես էլ ակցեպտորային (Li+) կենտրոններ [99, 125]: Օդում ջերմամշակումը հանգեցրել է համամասնությունների փոփոխության, այսինքն՝ փոխել է կոմպենսացիայի աստիճանը: Բյուրեղների որակը և թաղանթի կողմնորոշումը գնահատվել է ռենտգենյան դիֆրակցիայի եղանակով: Ֆոտոքիմիական պրոցեսները բացառելու համար թաղանթների մակերևույթները ծածկվել են MgF<sub>2</sub> պաշտպանիչ շերտերով [100]:

Չե տերոկառուցվածքների ստեղծման տեխնոլոգիայի օգտագործմամբ մշակվել և պատրաստվել է Pt/ZnO:Ga (40 նմ)/ZnO:Li (100 նմ)/Al հետերոկառուցվածքի հիման վրա Շոտկի (1D) դիոդ և Pt/ZnO(100



նմ)/ZnO:Li(100 նմ)/Al հետերոկառուցվածքի հիման վրա (1R) մեմրիստոր, ինչպես նաև (1D1R) միաբևեռ մեմրիստորային հիշողության տարր (միաբևեռ մեմրիստորային տարրերի նկարագրությունը տրված է 1.5): Այս փորձնական կառուցվածքներում իրականացվել են էլեկտրական բնութագրերով 1D դիոդի, 1R մեմրիստորի և (1D1R) միաբևեռ մեմրիստորային հիշողության տարրի չափումներ [6]:

Հետազոտողները առաջարկել են մեմրիստորային հիշողության տարրերի բազմաթիվ կառուցվածքներ, որոնցում խաչածև աղմուկները ճնշելու համար օգտագործվել են մեկ դիոդ և մեկ ռեզիստոր (1D1R): ZnO:Li թաղանթների օգտագործման դեպքում մեմրիստորների համար օպտիմալ կառուցվածք է հանդիսանում միաբևեռ 1D1R սխեման: Ինչպես վերը նշեցինք, 1D1R հիշողության տարրը պատրասվել է ծոտկի դիոդից (1D) հիմնված ZnO:Ga (40 նմ)/ZnO:Li (100 նմ) հետերոկառուցվածքի վրա և մեմրիստորից (1R) հիմնված ZnO (100 նմ)/ZnO:Li (100 նմ) հետերոկառուցվածքի վրա: Այդպիսի հիշողության տարրի (1D1R) կառուցվածքային սխեման ներկայացված է նկ. 4.1-ում:



Նկ. 4.1. Կառուցվածքային և համարժեք սխեմաները առաջարկվող կառուցվածքի համար [8]:

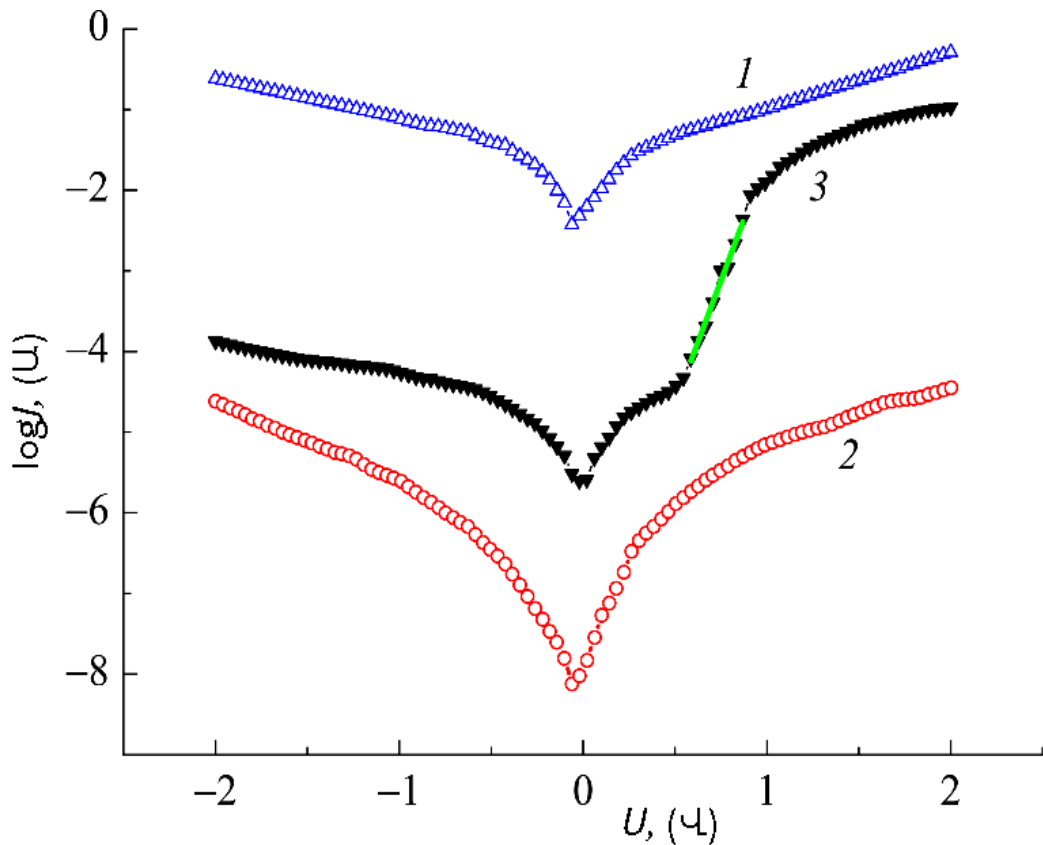
### §4.3. Li-ով լեզիրված ZnO թաղանթների հիման վրա հետերոկառուցվածքային մեմրիստորների էլեկտրական հարկությունների հետազոտությունները

Նկ. 4.2-ում ցուցադրված է ստացված կառուցվածքների V-I-երը: Չափումները իրականացվել են 200 Հց հաճախականությամբ սինուսոիդ ազդանշանով: Ստացված V-I-ը մոտարկվել է հետևյալ բանաձևով՝

$$j = j_{so} [\exp(U/nU_{th}) - 1], \quad (1)$$

որտեղ  $j_{so}$ -ն հազեցման հոսանքի խտությունն է, որը ոչ իդեալականության գործակիցն է, որը սովորաբար ընդունում է 1-ի և 2-ի միջև արժեքներ (դիֆուզիոն հոսանքի համար) և 2-ից մեծ (ռեկոմբինացիոն հոսանքի համար),  $U_{th} = K_B T/q$  – ջերմային լարումն է (thermal voltage), որը 290K ջերմաստիճանում հավասար է  $25 \times 10^{-3}$  Վ-ի: Pt/ZnO:Li կառուցվածքը ունի հոսանքի փոքր հոսք, և դրական և բացասական տիրույթներում V-I-երի կորերը համարյա սիմետրիկ են: Դա կապված է Pt/ZnO:Li անցման ճոտկի արգելքի հետ, որը արգելափակում է էլեկտրոնների ինժեկցիան: Հակառակը, հոսանքի մեծ հոսք և գծային V-I երևում է Pt/ZnO:Ga կառուցվածքներում, որը պայմանավորված է մետաղ-ZnO:Ga կոնտակտների օհմական բնութագրերով:

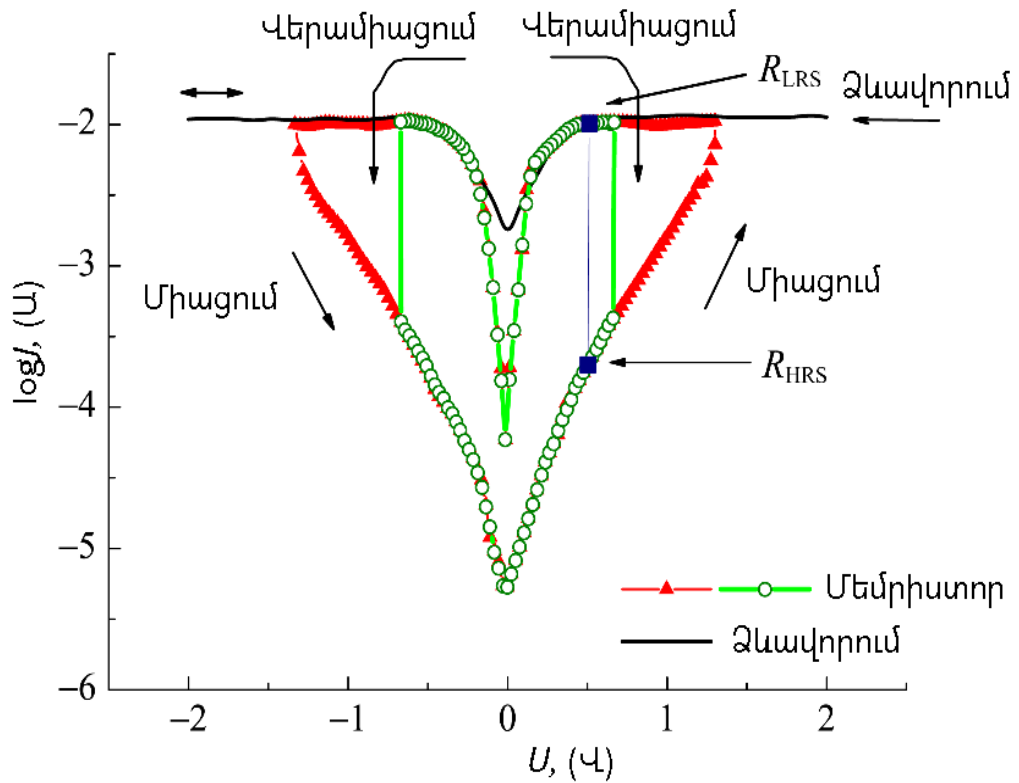
ZnO:Ga թաղանթի համար Ֆերմի մակարդակը գտնվում է հաղորդականության գոտու մոտ, դրա պատճառով երևում է լիցքակիրների բարձր կոնցենտրացիա, որը իր հերթին Pt/ZnO:Ga անցումում բերում է ճոտկի արգելքի լայնքի նեղացման: Դրա արդյունքում էլեկտրոնները թունելային մեխանիզմով կարող են հեշտությամբ անցնել Pt/ZnO:Ga ճոտկի արգելքով: Այդ պատճառով Pt/ZnO:Ga արգելքը ունի օհմական V-I, իսկ Pt/ZnO անցումները հանդիսանում են ոչ -գծային V-I-ով ճոտկի արգելք: Pt/ZnO:Ga/ZnO:Li/Pt կառուցվածքն ունի ոչ -գծային անհամաչափ V-I: Հոսանքները ուղիղ և հակադարձ լարման փոփոխությունով մոտավորապես  $10^3$  անգամ տարբերվում են  $\pm 2$  Վ լարման փոփոխության ժամանակ, ուղիղ անկման լարումը  $U = 0.9-1$  Վ է և ոչ իդեալականության գործակիցը  $n=2.7$  է [8]:



Նկ. 4.2. Pt/ZnO:Ga/Al (1-ին կոորդ) կառուցվածքի V-I-ը, Pt/ZnO:Li/Al (2-րդ կոորդ) կառուցվածքի V-I-ը և Pt/ZnO:Ga/ZnO:Li/Pt (3-րդ կոորդ) 1D կառուցվածքի ոչ-գծային V-I-ը  $n=2.7$  ոչ իդեալ ականոն թյան գործակիցով:

Նկ. 4.3-ում ցուցադրված է Pt/ZnO/ZnO:Li/Al կառուցվածքի հիման վրա 1R միաբևեռ ռեզիստորային փոխարկիչի (մեմրիստորի) տիպային V-I-երի կորերը: Այս աշխատանքի նպատակներից մեկը եղել է միաբևեռ համակարգերի կառուցումը, որոնցում բնութագրական երկարժեք ունեն կարող է առաջանալ միայն մի ուղղությամբ լարման դեպքում: Պատրաստումից հետո տեղի է ունեցել հետերոկառուցվածքների էլեկտրական ձևավորման արոցեսը այնպիսի լարումների դեպքում, որոնք գերազանցում են աշխատանքային լարումները [126]: Էլեկտրական ձևավորումից հետո անցումները բարձր դիմադրությունների վիճակների  $R_{HRS}$  (high resistance state – HRS) և ցածր դիմադրությունների վիճակների  $R_{LRS}$  (low resistance state – LRS) միջև իրականացվել են  $f = 200$  Հց հաճախականությամբ սինուսոիդալ ազդանշանով: HRS վիճակից LRS վիճակ լարման փոխարկումը  $U_{միացում}$  եղել է  $\pm 1.5$  Վ, իսկ լարման հակառակ փոխարկումը  $U_{վերամիացում}$  եղել է  $\pm 0.5$  Վ: Մեմրիստորի այդ վիճակների դիմադրությունները հարաբերությունը  $R_{HRS}/R_{LRS} \approx 100$ :

Նկ. 4.3-ի սլաքները ցույց են տալիս 1R կառուցվածքների համար կոնտակտի միջոցով բացթողման հոսանքի կինետիկայի փոփոխությունը:

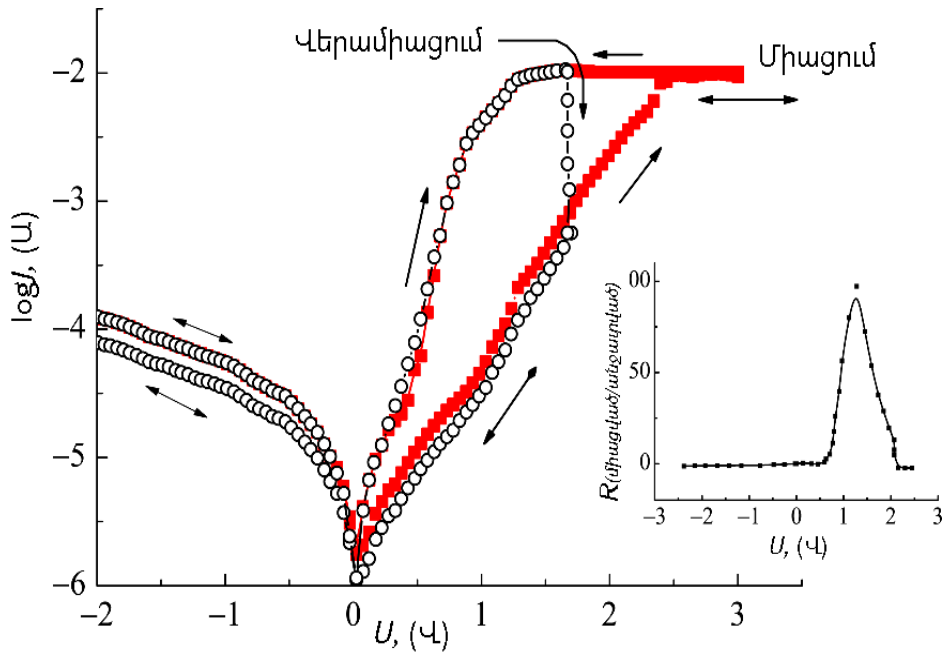


Նկ. 4.3. Pt/ZnO/ZnO:Li/Al հիման վրա 1R միաբևեռ մեմրիստորի V-I-ը:

Նկ. 4.4-ում ցուցադրված են ինտեգրալային 1D1R սարքի տիպային V-I-երը, այսինքն՝ հաջորդական միացված 1R մեմրիստորի և 1D դիոդի: Այդ համակարգը նույնպես անցնում է էլեկտրական ձևավորման սկզբնական արոցես: Փոխակերպման գործողությունները շեղման բացասական տիրույթներում արգելափակված են հակադարձ փոխակերպման դիոդով: 1D1R համակարգը փոխակերպվել է միայն դրական բևեռացման լարման դեպքում,  $U_{\text{միացում}}$  և  $U_{\text{վերամիացում}}$  համապատասխանաբար կազմել են 2.5 և 1.7 Վ: Նկ. 4.3-ի և 4.4-ի համեմատությունից կարելի է ասել, որ 1D1R սարքի համար գրանցման աշխատանքային լարումները  $U_{\text{HRS}}$  և  $U_{\text{LRS}}$  մեծ են, քան 1R կառուցվածքի համար՝ 1D1R սարքում դիոդի և մեմրիստորի վրա լարման անկման պատճառով:

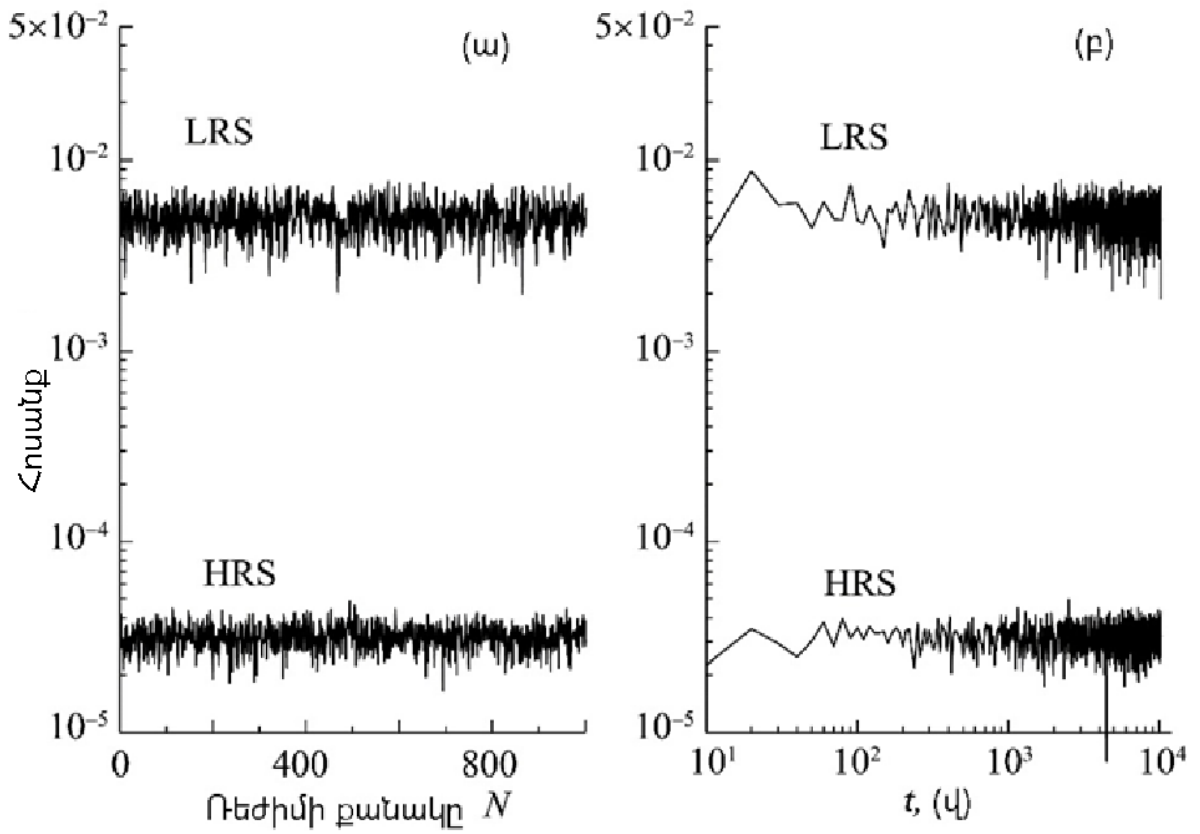
Նկ. 4.4-ի մեջ ցույց է տրված, որ 1D1R սարքի R(միացված/անջատված) հարաբերությունը ինֆորմացիայի

ընթերցման ժամանակ ունի մաքսիմում արժեք  $\sim 80$   $\mu$ արման 1  $\mu$  փոփոխման դեպքում: Այսպիսով,  $R_{HRS}$  և  $R_{LRS}$  դիմադրությունները կարող են ընթերցվել 1  $\mu$   $\mu$ արման փոփոխմամբ, որը ընթերցման ժամանակ ինֆորմացիայի կորուստ թույլ է տալիս և կտրուկ մեծացնում է ընթերցման ցիկլերի թիվը:



Նկ. 4.4. 1D1R միաբևեռ ռեզիստիվ ինտեգրալային մեմորիստորի V-I-ը:

Նկ. 4.5.(ա)-ում ներկայացված է 1D1R սարքի, գրանցում-ընթերցում ցիկլի ռեժիմում հոսանքի կախվածությունը HRS ցածր և LRS բարձր դիմադրություններով վիճակներում: Ինչպես երևում է նկարից, սարքը, առանց էլեկտրական պարամետրերի էականորեն վատացման, թույլ է տալիս վերագրանցել ինֆորմացիան  $10^4$  վայրկյան: Նկ. 4.5.(բ)-ում ներկայացված է նույնպիսի կախվածությունն ընթերցման ժամանակից ինֆորմացիայի միանգամյա գրանցման համար HRS կամ LRS վիճակներում: Ինչպես երևում է նկարից, սարքը, առանց էլեկտրական պարամետրերի էականորեն վատացման, թույլ է տալիս ընթերցել գրանցման ինֆորմացիան  $10^4$  վայրկյան: Եթե ենթադրենք, որ միանգամյա ընթերցման ժամանակը  $10^{-6}$  վայրկյան է, որը նշանակում է ընթերցել ինֆորմացիան  $10^{10}$  անգամ առանց պարամետրերի վատացման [11]:



Նկ. 4.5. Թեստավորվող 1D1R սարքը ցիկլի իկ գրանցման և ընթերցման ռեժիմում (ա) և ինֆորմացիայի գրանցման միանգամյա ընթերցման ռեժիմում (բ)՝ 1 Վ ընթերցման լարման HRS և LRS վիճակներում:

1. Մշակվել է Լեգիրված ZnO թաղանթների ստացման եղանակ, որը թույլ է տալիս ստեղծել ինչպես բարձր, այնպես էլ ցածր հաղորդականություներով թաղանթներ: Ցույց է տրվել, որ խառնուրդներով թաղանթների հաղորդականության ղեկավարումը արդյունավետ է, ինչպես հաստատուն, այնպես էլ 1000 Հց փոփոխական լարումների դեպքում: Լեգիրված դոնորային կամ ակցեպտորային խառնուրդներով թաղանթների դիմադրություների հարաբերության արժեքները հասնում են մինչև  $10^8$ - $10^9$ , որը թույլ է տալիս բավարարել թափանցիկ էլեկտրոնիկայի համար էլեկտրաստատիկական նյութերին ներկայացվող պահանջները:
2. Իրականացվել են ZnO թափանցիկ թաղանթների  $\Phi$ ոտոէլեկտրական բնութագրերի հետազոտություներ: Ցույց է տրվել, որ Li-ի խառնուրդով Լեգիրված թաղանթների համար մթության ժամանակ ապահովվում է հաղորդականության էական նվազեցում (առանց հաղորդականության տեսակի փոփոխության) և կարելի է հասնել  $\Phi$ ոտոհաղորդականության և հաղորդականության հարաբերություների զգալի աճի: Այս արդյունքները կարող են օգտագործվել UV տիրույթի պինդմարմնային  $\Phi$ ոտոդետեկտորների պատրաստման համար:
3. Իրականացրած ZnO թափանցիկ թաղանթների  $\Phi$ ոտոհաղորդականության ուսումնասիրություները ցույց է տալիս, որ  $\Phi$ ոտոհաղորդականության դանդաղ փոփոխության ընթացքում ռելաքսացիոն ժամանակները պայմանավորված են սառեցված  $\Phi$ ոտոհաղորդականությամբ (frozen photoconductivity):
4. Առաջարկվել և փորձով իրականացվել է սկզբունքորեն նոր եղանակ բարակ թաղանթներում տեղային հոսանքի խտությունը չափելու համար, որը թույլ է տալիս միաժամանակ ստուգել բարակ թաղանթների էլեկտրահաղորդականությունը և որոշել հաղորդիչ կլաստերի չափերը գրանուլացված թաղանթներում:
5. Li-ով և Ga-ով Լեգիրված ZnO բարակ թաղանթների հիման վրա ստացվել են գրանուլացված կառուցվածքներով թաղանթներ: Ուսումնասիրվել է թթվածնային թափուր տեղերով և ցինկի միջհանգույցային ատոմներով պայմանավորված ակցեպտորային և

դոնորային կոմպլեքսների ազդեցությունը և խառնուրդների (Li և Ga) ազդեցությունը բյուրեղային կառուցվածքի հաղորդականության վրա:

6. Յետազոտվել է գրանուլների չափերի և բյուրեղային կառուցվածքի ազդեցությունը հաղորդականության և ֆոտոհաղորդականության վրա: Ցույց է տրվել, որ ZnO:Ga թաղանթներում գրանուլների չափերը և հաղորդիչ կլաստերների չափերը համարժեք չեն: Մթային և լուսային հաղորդականությունները նույն ZnO:Li թաղանթների համար ունեն տարբեր հաղորդականությամբ կառուցվածքներ: Եթե մթային հոսանքների համար պերկոլյացիոն կլաստերները չունեն բնութագրական չափեր, ապա ֆոտոհոսանքի դեպքում պերկոլյացիոն կլաստերները ունեն 9.4 մկմ բնութագրական չափ: Փորձարարական արդյունքները բացատրվում են պերկոլյացիոն տեսության հիման վրա:
7. Մշակվել և հետազոտվել է նոր մեմրիստորային հիշողության տարր պատահական հասանելիությամբ հիշողության համար (resistance random access memory - ReRAM): Մշակված կառուցվածքը բաղկացած է Pt/ZnO:Ga/ZnO:Li/Pt հետերոկառուցվածքի հիման վրա (1D) Շոտկի դիոդից և Pt/ZnO/ZnO:Li/Pt հետերոկառուցվածքի հիման վրա (1R) մեմրիստորից:
8. 1D1R հիշողության տարրը փոխակերպվում է  $R_{HRS}$  վիճակից  $R_{LRS}$  վիճակի և հակառակը՝ օգտագործելով դրական բևեռացման լարումով իմպուլսներ, այսինքն՝ հանդիսանում է միաբևեռ հիշողության տարր: Առաջարկվող տարրը ունի մեծ կայունություն և դիմանում է մինչև  $10^4$  փոխակերպման ցիկլերի գրանցման-ընթերցման ռեժիմում և  $10^{10}$  անգամ ընթերցում է միանգամյա գրանցված ինֆորմացիան՝ առանց պարամետրերի էական վատացման: Բացի այդ, մշակված մեմրիստորային տարրը օժտված է փոքրածավալ էներգապառումով:



## **ՇՆՈՐՀԱԿԱԼ ԱԿԱՆ ԽՈՍՔ**

Խորին երախտագիտությունն էմ հայ տնուում իմ ատենախոսության ղեկավար՝ պարոն **Ռուբեն Յովսեփյանին**, ատենախոսության աշխատանքիս ղեկավարությունը ստանձնելու, ինձ գիտության մեջ ուղղորդելու, նպատակասլացությունն սերմանելու, դժվարին պահերին նոր գաղափարներով, իր բազմամյա փորձով ու նորանոր գիտելիքներով կիսվելու համար: Ինչպես նաև խորին շնորհակալությունն էմ հայ տնուում **Արմեն Պողոսյանին**, ում անմիջական մասնակցությունն ատենախոսության մեջ առաջադրված խնդիրների տեսական և փորձարարական ուսումնասիրություններում, այս աշխատանքը դարձրեց ամբողջական:

Մեծ շնորհակալությունն էմ հայ տնուում Բյուրեղօպտիկայի լաբորատորիայի բոլոր աշխատակիցներին, աշխատանքի իրականացման ընթացքում օգնելու՝ իրենց պատրաստակամության, քննարկումների, սեմինարների և հաճելի ու ընկերական աշխատանքային միջավայր ստեղծելու համար:

## ՀԱՊԱՎՈՒՄՆԵՐԻ ՑԱՆԿ

Հապավոր մը	Լրիվ անվանումը(անգլ երեն)	Անվանման հայ երեն թարգմանում թյ ուևը
TCO	- Transparent conductive oxide	- թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդ
V-I	- Volt- Ampere characteristics	- վոլտ ամպերային բնութագիր
M-S	- Metal-semiconductor	- մետաղ-կիսահաղորդիչ
M-I	- Metal-isolator	- մետաղ-մեկուսիչ
UV	- Ultraviolet	- Ուլտրամանուշակագույն
FFT	- Fast Fourier Transform	- արագ Ֆուրյե ձևափոխումը
ReRAM	- Resistance random access memory	- ռեզիստորային պատահական հասանելիություն հիշողություն
ITO	- Indium tin oxide	- Ինդիում-մանագ օքսիդ
HRS	- High-resistance states	- բարձր դիմադրության վիճակ
LRS	- Low-resistance states	- ցածր դիմադրության վիճակ
XRD	- X-ray diffraction	- համափոխում
MIG	- Metal in the head gap	- մետաղը վերին ճեղքում
1D1R	- 1 diod & 1 resistor	- մեկ դիոդ և մեկ ռեզիստոր

## ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Z.L. Wang, ZnO nanowire and nanobelt platform for nanotechnology, Materials Science and Engineering, № 64, pp. 33–71, 2009.
2. O.A. Ageev, Growth horizontal aligned ZnO nanowires by pulsed laser deposition, Book of abstracts of Russian, Taiwanese Symposium “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications”, p. 5, 2012.
3. H. Morkoç, Ü. Özgür, Zinc Oxide. Fundamentals, Materials and Device Technology, p. 490, 2009.
4. **Ջ.Է. Էլբակյան**, Фотозлектрические свойства легированных Ga и Li пленок ZnO, Известия НАН Армении, Физика, т. 51, с. 62-69, 2016.
5. Р.К. Овсепян, А.Р. Погосян, **Ջ.Է. Էլբակյան**, Проводимость гранулированных структур на основе широкозонных полупроводников ZnO, Известия НАН Армении, т. 50, с. 85-95, 2015.
6. **Ջ.Է. Էլբակյան**, Р.К. Овсепян, А.Р. Погосян, Мемристоры на основе легированных литием пленок ZnO, Известия НАН Армении, т. 50, с. 368-374, 2015.
7. A.R. Poghosyan, **E.Y. Elbakyan**, R. Guo, R.K. Hovsepyan, S.I. Petrosyan, Photoconductivity of ZnO based granular structures, Proc. SPIE, v. 9200, p. 92001G (1-7), 2014.
8. A.R. Poghosyan, **E.Y. Elbakyan**, R. Guo, R.K. Hovsepyan, Memristor memory element based on ZnO thin film structures, Proc. SPIE, v. 9586, p. 95861C (1-5), 2015.
9. A.R. Poghosyan, N.R. Aghamalyan, **E.Y. Elbakyan**, R. Guo, R.K. Hovsepyan, Ferroelectric memory element based on thin film field effect transistor, Proc. SPIE, v. 8847, p. 88471R (1-7), 2013.
10. **E.Y. Elbakyan**, R.K. Hovsepyan, A.R. Poghosyan, Photoelectrical properties of granular ZnO films, Proc. of int. conf. on “Laser Physics 2015”, pp. 55-56, 2015.
11. **E.Y. Elbakyan**, R.K. Hovsepyan, A.R. Poghosyan, ZnO films with n and p conductivities for information recording systems, Proc. of int. conf. on ‘Semiconductor Micro & Nanoelectronics’ (ICMN-15), pp. 28-31, 2015.

12. З.Г. Евгений, Дисс., Разработка и исследование технологических основ формирования наноструктурированных пленок ZnO Методом импульсного лазерного осаждения для чувствительных элементов газовых сенсоров, 2015.
13. Е.А. Тутов, Ф.А. Тума, В.И. Кукуев, Механизмы токопереноса в структуре Al/ZnO/Si, Конденсированные среды и межфазные границы, с. 334-342, 2006.
14. D.C. Look, Progress in ZnO Materials and Devices, Journal of Electronic Materials, v. 35, pp. 1299-1305, 2006.
15. K. Ellmer, R. Mientus, Carrier transport in polycrystalline transparent conductive oxides: A comparative study of zinc oxide and indium oxide, Thin Solid Films, v. 516, pp. 4620-4627, 2008.
16. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников, Физика полупроводников, с. 678, 1977.
17. J. Frank Blatt, Theory of Mobility of Electrons in Solids, Academic Press Publishers, New York, pp. 150, 1957.
18. J.A. Reissland, The Physics of Phonons, John Wiley and Sons Ltd., London, New York, Sydney, Toronto, p. 700, 1973.
19. S. Kaleemulla, A.S. Reddy, S. Uthanna, P.S. Reddy, Physical properties of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films prepared at various oxygen partial pressures, Journal of Alloys and Compounds, v. 479, pp. 589-593, 2009.
20. W. Seiler, M. Nistor, C. Hebert, J. Perriere, Epitaxial undoped indium oxide thin films: Structural and physical properties, Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 116, pp. 34-42, 2013.
21. C.Y. Wang, V. Lebedev, V. Cimalla, T. Kups, K. Tonisch, O. Ambacher, Structural studies of single crystalline In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films epitaxially grown on InN (0001), Applied Physics Letters, v. 90, p. 3, 2007.
22. B.S. Kang, L. Stan, I.O. Usov, J.K. Lee, T.A. Harriman, D.A Lucca, R.F. De Paula, P.N. Arendt, M. Nastasi, J.L. Mac Manus-Driscoll, B.H. Park, Q. Jia, Strain Mismatch Induced Tilted Heteroepitaxial (000l) Hexagonal ZnO Films on (001) Cubic Substrates, Advanced Engineering Materials, v. 13, pp. 1142-1145, 2011.
23. T.C. Kaspar, T. Droubay, S.M. Heald, M.H. Engelhard, P. Nachimuthu, S.A. Chambers, Hidden ferromagnetic secondary phases in cobalt-doped ZnO epitaxial thin films, Physical Review B, v. 77, p. 4, 2008.
24. Y. Xie, M. Madel, T. Zoberbier, A. Reiser, W.Q. Jie, B. Neuschl, J. Biskupek, U. Kaiser, M. Feneberg, K. Thonke, Enforced c-axis growth of ZnO epitaxial chemical

- vapor deposition films on a-plane sapphire, *Applied Physics Letters*, v. 100, p. 4, 2012.
25. A. Rogozin, N. Shevchenko, M. Vinnichenko, M. Seidel, A. Kolitsch, W. Moeller, Annealing of indium tin oxide films by electric current: Properties and structure evolution, *Applied Physics Letters*, v. 89, p. 061908, 2006.
  26. S. Cho, Effects of rapid thermal annealing on the properties of  $\text{In}_2\text{O}_3$  thin films grown on glass substrate by rf reactive magnetron sputtering, *Microelectronic Engineering*, v. 89, pp. 84-88, 2012.
  27. S.K.V. Farahani, T.D. Veal, P.D.C. King, J. Zuniga-Perez, V. Munoz-Sanjose, C.F. Mc Conville, Electron mobility in CdO films, *Journal of Applied Physics*, v. 109, p. 073712, 2011.
  28. G. Rey, C. Ternon, M. Modreanu, X. Mescot, V. Consonni, D. Bellet, Electron scattering mechanisms in fluorine-doped  $\text{SnO}_2$  thin films, *Journal of Applied Physics*, v. 114, p. 183713, 2013.
  29. D.A. Bonnell, D.N. Basov, M. Bode, U. Diebold, S.V. Kalinin, V. Madhavan, L. Novotny, M. Salmeron, U.D. Schwarz, P.S. Weiss, Imaging physical phenomena with local probes: From electrons to photons, *Reviews of Modern Physics*, v. 84, p. 1343, 2012.
  30. В.А. Бабаев, Дисс., Эпитаксиальный рост пленок оксида цинка на подложках (0001) лейкосапфира с модифицированной поверхностью, 2015.
  31. М.А. Мелкозерова, В.Н. Красильников, О.И. Гырдасова, Е.В. Шалаева, И.В. Бакланова, Л.Ю. Булдакова, М.Ю. Янченко, Влияние легирования 3d-элементами (Co, Ni, Cu) на собственную дефектную структуру и фотокаталитические свойства наноструктурированного ZnO с трубчатой морфологией агрегатов, т. 55, с. 2340-2345, 2013.
  32. И.А. Тамбасов, Дисс., Тонкие  $\text{In}_2\text{O}_3$ , Fe –  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – ZnO пленки, полученные твердофазными реакциями: структурные, оптические, электрические и магнитные свойства, 2014.
  33. D.A. Zuev, A.A. Lotin, O.A. Novodvorsky, F.V. Lebedev, O.D. Khramova, I.A. Petuhov, P.N. Putilin, A.N. Shatohin, M.N. Rumyanzeva, A.M. Gaskov, Pulsed laser deposition of ITO thin films and their characteristics, *Semiconductors*, v. 46, pp. 410-413, 2012.

34. J. Ma, F. Ji, H.L. Ma, S.Y. Li, Preparation and properties of transparent conducting zinc oxide and aluminium-doped zinc oxide films prepared by evaporating method, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 60, pp. 341-348, 2000.
35. W. Mao, B. Xiong, Y. Liu, C. He, Correlation between defects and conductivity of Sb-doped tin oxide thin films, *Applied Physics Letters*, v. 103, p. 031915, 2013.
36. Y. Zhu, R.J. Mendelsberg, J. Zhu, J. Han, A. Anders, Transparent and conductive indium doped cadmium oxide thin films prepared by pulsed filtered cathodic arc deposition, *Applied Surface Science*, v. 265, pp. 738-744, 2013.
37. M. Gao, X. Wu, J. Liu, W. Liu, The effect of heating rate on the structural and electrical properties of sol-gel derived Al-doped ZnO films, *Applied Surface Science*, v. 257, pp. 6919-6922, 2011.
38. A. Rogozin, N. Shevchenko, M. Vinnichenko, F. Prokert, V. Cantelli, A. Kolitsch, W. Moller, Real-time evolution of the indium tin oxide film properties and structure during annealing in vacuum, *Applied Physics Letters*, т. 85, № 2, с. 212-214, 2004.
39. Y. Muraoka, N. Takubo, Z. Hiroi, Photoinduced conductivity in tin dioxide thin films, *Journal of Applied Physics*, v. 105, p. 103702, 2009.
40. I.A. Zhurbina, O.I. Tlin, V.Y. Timoshenko, Optical Generation of Free Charge Carriers in Thin Films of Tin Oxide, *Semiconductors*, v. 45, pp. 236-240, 2011.
41. T. Koida, M. Kondo, K. Tsutsumi, A. Sakaguchi, M. Suzuki, H. Fujiwara, Hydrogen-doped  $\text{In}_2\text{O}_3$  transparent conducting oxide films prepared by solid-phase crystallization method, *Journal of Applied Physics*, v. 107, p. 033514, 2010.
42. M. Nistor, F. Gherendi, N.B. Mandache, C. Hebert, J. Perriere, W. Seiler, Metal-semiconductor transition in epitaxial ZnO thin films, *Journal of Applied Physics*, v. 106, p. 103710, 2009.
43. Y. Li, Q. Huang, X. Bi, The change of electrical transport characterizations in Ga doped ZnO films with various thicknesses, *Journal of Applied Physics*, v. 113, p. 053702, 2013.
44. S. Calnan, A.N. Tiwari, High mobility transparent conducting oxides for thin film solar cells, *Thin Solid Films*, v. 518, pp. 1839-1849, 2010.
45. B.Z. Dong, H. Hu, G.J. Fang, X.Z. Zhao, D.Y. Zheng, Y.P. Sun, Comprehensive investigation of structural, electrical, and optical properties for ZnO:Al films deposited at different substrate temperature and oxygen ambient, *Journal of Applied Physics*, v. 103, p. 073711, 2008.

46. T. Wagner, C.D. Kohl, S. Morandi, C. Malagu, N. Donato, M. Latino, G. Neri, M. Tiemann, Photoreduction of Mesoporous  $\text{In}_2\text{O}_3$ : Mechanistic Model and Utility in Gas Sensing, *Chemistry-a European Journal*, v. 18, pp. 8216-8223, 2012.
47. T. Wagner, S. Haffer, C. Weinberger, D. Klaus, M. Tiemann, Mesoporous materials as gas sensors, *Chemical Society Reviews*, v. 42, pp. 4036-4053, 2013.
48. N. Katsarakis, Photon sensitive high index metal oxide films, *Journal of Physics-Condensed Matter*, v. 16, pp. 757-768, 2004.
49. T. Siegrist, P. Jost, H. Volker, M. Woda, P. Merkelbach, C. Schlockermann, M. Wuttig, Disorder-induced localization in crystalline phase-change materials, *Nature Materials*, v. 10, pp. 202-208, 2011.
50. C.A. Amorim, O.M. Berengue, H. Kamimura, E.R. Leite, A.J. Chiquito, Measuring the mobility of single crystalline wires and its dependence on temperature and carrier density, *Journal of Physics-Condensed Matter*, v. 23, p. 205803, 2011.
51. В.В. Валяев, В.Л. Гуртовой, Д.Ю. Иванов, С.В. Морозов, В.В. Сироткин, Ю.В. Дубровский, С.Ю. Шаповал, Ю.Н. Ханин, Е.Е. Вдовин, А.Н. Пустовит, Проводимость и замороженная фотопроводимость в эпитаксиальных шенках GaAs с одиночными и двойными дельта-оюями. Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов. ЖЭТФ, т. 113, с. 69-702, 1998.
52. Н.Р. Агамалян, Т.А. Асланян, Э.С. Варданян, Е.А. Кафадарян, Р.К. Овсепян, С.И. Петросян А.Р. Погосян, Электронные фазовые переходы металл–изолятор в широкозонных полупроводниках ZnO. Известия НАН Армении, Физика, т. 47, с. 417-426, 2012.
53. H. Park, Growth and characterization of single crystal ZnO thin films using inductively coupled plasma metal organic chemical vapor deposition, *J. Appl. Phys. Lett*, v. 89, p. 121108, 2006.
54. J. Ye, The growth and annealing of single crystalline ZnO films by low pressure MOCVD, *Journal of Crystal Growth*, v. 243, pp. 151-156, 2002.
55. E.G. Zamburg, Researching influence of IBAD PLD parameters on properties of nanocrystalline ZnO thin films, *Applied Mechanics and Materials*, v. 481, pp. 55-59, 2014.
56. A.P. Caricato, A. Cretí, A. Luches, Zinc Oxide Nanostructured Layers for Gas Sensing Applications, *Laser Physics*, v. 21, pp. 588-597, 2011.

57. Е.Г. Замбург, Получение прозрачных проводящих нанокристаллических пленок оксида цинка методом импульсного лазерного осаждения, *Фундаментальные исследования*, с. 373–376, 2012.
58. Е.Г. Замбург, Фоторезистор ближнего УФ диапазона на основе нанокристаллической плёнки ZnO, *Фундаментальные исследования*, с. 1206-1209. 2012.
59. О.А. Агеев , Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК, *Известия ЮФУ, Технические науки*, с. 109, 2011.
60. Т.В. Пешкова, Структуры из нанопроводов с переходами Zn–ZnO : CuO для детектирования паров этанола, *Журнал технической физики*, т. 84, с. 143-148, 2014.
61. Y.W. Neo, ZnO nanowire growth and devices, *Materials Science and Engineering*, v. 47, pp. 1-47, 2004.
62. Z.L. Wang, Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications, *Journal of Physics: Condensed Matter*, v. 16, pp. 829–858, 2004.
63. L.O. Chua, Memristor-The missing circuit element, *IEEE Transactions on Circuit Theory*, v. 18 , pp. 507 – 519, 1971.
64. D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams, The missing memristor und Brief Communication Arising Nature, pp. 80-83, 2008.
65. R. Waser and M. Aono, Nanoionics-based resistive switching memories, *Nature Materials*, pp. 833 – 840, 2007.
66. A. Sawa, Resistive switching in transition metal oxides, *Materials Today*, v. 11, pp. 28-36, 2008.
67. B.J. Choi, D.S. Jeong, S.K. Kim, C. Rohde, S. Choi, J.H. Oh, H.J. Kim, C.S. Hwang, K. Szot, R. Waser, B. Reichenberg and S. Tiedke, Resistive switching mechanism of TiO<sub>2</sub> thin films grown by atomic-layer deposition, *Appl. Phys.*, v. 98, p. 033715, 2005.
68. S. Seo, M.J. Lee, D.H. Seo, E.J. Jeoung, D.S. Suh, Y.S. Joung, I.K. Yoo, I.R. Hwang, S.H. Kim, I.S. Byun, J.S. Kim, J.S. Choi and B.H. Park, Reproducible resistance switching in polycrystalline NiO films, *Appl. Phys. Lett.*, v. 85, p. 5655, 2004.



69. H.B. Lv, M. Yin, X.F. Fu, Y.L. Song, Resistive Memory Switching of Films for a Nonvolatile Memory Application, *IEEE Electron Device Letters*, v. 29, pp. 309-311, 2008.
70. Y. Watanabe, J.G. Bednorz, A. Bietsch, Ch. Gerber, D. Widmer, A. Beck and S.J. Wind, Current-driven insulator–conductor transition and nonvolatile memory in chromium-doped  $\text{SrTiO}_3/\text{SrTiO}_3$  single crystals, *Appl. Phys. Lett.*, v. 78, p. 3738, 2001.
71. R. Dong, Q. Wang, L.D. Chen, D.S. Shang, T.L. Chen, X.M. Li and W. Q. Zhang, Retention behavior of the electric-pulse-induced reversible resistance change effect in  $\text{Ag-La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3\text{-Pt}$  sandwiches, *Appl. Phys. Lett.*, v. 86, p. 172107, 2005.
72. W.Y Chang, Y.C Lai, T.B. Wu, S.F. Wang, F. Chen and M.J. Tsai, Unipolar resistive switching characteristics of ZnO thin films for nonvolatile memory applications, *Applied Physics Letters*, v. 92, p. 022110 (1-3), 2008.
73. S. Kim, H. Moon, D. Gupta, S. Yoo and Y.K. Choi, Resistive switching characteristics of Sol–Gel zinc oxide films for flexible memory applications, *IEEE Transactions on Electron*, v. 56, pp. 696 – 699, 2009.
74. Nuo Xu, Lifeng Liu, Xiao Sun, Xiaoyan Liu, Dedong Han, Yi Wang, Ruqi Han, Jinfeng Kang and Bin Yu, Characteristics and mechanism of conduction process in  $\text{TiN/ZnO/Pt}$  resistance switching random-access memories, *Appl. Phys. Lett.*, v. 92, p. 232112, 2008.
75. M. Villafuerte, S.P. Heluani, G. Juárez, G. Simonelli, G. Braunstein and S. Duhalde Electric-pulse-induced reversible resistance in doped zinc oxide thin films, *Appl. Phys. Lett.*, v. 90, p. 052105, 2007.
76. X. Chen, G. Wu and D. Bao, Resistive switching behavior of  $\text{Pt/Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{O/Pt}$  devices for nonvolatile memory applications, *Appl. Phys. Lett.*, v. 93, p. 093501, 2008.
77. X. Chen, G. Wu, P. Jiang, W. Liu and D. Bao, Colossal resistance switching effect in  $\text{Pt/spinel-MgZnO/Pt}$  devices for nonvolatile memory applications, *Appl. Phys. Lett.*, v. 94, p. 033501, 2009.
78. C. Agashe, O. Kluth, J. Hupkes, U. Zastrow, B. Rech and M. Wuttig, Efforts to improve carrier mobility in radio frequency sputtered aluminum doped zinc oxide films, *J. Appl. Phys.*, v. 95, p. 1911, 2004.

79. J.K. Sheu, M.L. Lee, C.J. Tun and S.W. Lin, Ultraviolet band-pass Schottky barrier photodetectors formed by Al-doped ZnO contacts to, *Appl. Phys. Lett.*, v. 88, p. 043506, 2006.
80. S. Liang and X. Bi, Structure, conductivity, and transparency of Ga-doped ZnO thin films arising from thickness contributions, *J. Appl. Phys.*, v. 104, p. 113533, 2008.
81. T. Minami, Present status of transparent conducting oxide thin-film development for Indium-Tin-Oxide (ITO) substitutes, v. 516, pp. 5822–5828, 2008.
82. J.W. Seo, J.W. Park, K.S. Lim, J.H. Yang and S.J. Kang, Transparent resistive random access memory and its characteristics for nonvolatile resistive switching, *Appl. Phys. Lett.*, v. 93, p. 223505, 2008.
83. А.В. Тесленок, Методы напыления ультратонких металлических пленок. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г.Томск, с. 40-43, 2015.
84. В.Ю. Петухов, Г.Г. Гумаров, Ионно-лучевые методы получения тонких пленок. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета, Казань, с. 87, 2010.
85. А.В. Циркин, Технологические процессы изготовления деталей машин: методические указания к лабораторным работам, Ульяновск: УлГТУ, с. 42, 2007.
86. И.П. Кузьмина, В.А. Никитенко, Окись цинка. Получение и оптические свойства, 1984.
87. Y. Sato, S. Sato, Preparation and some properties of nitrogen-mixed ZnO thin films, *Thin Solid Films*, v. 281, pp. 445–448, 1996.
88. V. Bermudez, J. Capmany, J. Garcia Sole and E. Dieguez, Growth and second harmonic generation characterization of Er<sup>3+</sup> doped bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub>, *Applied physics letters*, v. 73, pp. 593-595, 1998.
89. T.K. Subramanyam, B. Srinivasulu Naidu, S. Uthanna, Characterisation of DC Reactive Magnetron Sputtered ZnO Films Prepared at Different Oxygen Pressures, *Physica status solidi (a)*, v. 173, pp. 425–436, 1999.
90. V. Gupta, A. Mansingh, Influence of postdeposition annealing on the structural and optical properties of sputtered zinc oxide film, *J. Appl. Phys.*, v. 80, p. 1063, 1996.
91. K. Sato et al., Patent No 5, 485.753, 1995.
92. A. Onodera, N. Tamaki, Y. Kawamura et al., Ferroelectric Phase Transition in Piezoelectric Semiconductor ZnO, *Journ. Korean Physical Society*, v. 32, p. S11, 1998.

93. T. Yamamoto, H. Katayama-Yoshida, Unipolarity of ZnO with a wide-band gap and its solution using codoping method, *J. Cryst. Growth*, v. 214-215, pp. 552-555, 2000.
94. M. Miyazaki, K. Sato, A. Mitsui, H. Nishimura, Properties of Ga-doped ZnO films, *J. Of Non-Crystalline Solids*, v. 218, pp. 323-328, 1997.
95. X.W. Sun, H.S. Kwok, Optical properties of epitaxially grown zinc oxide films on sapphire by pulsed laser deposition, *J. Appl. Phys.*, v. 86, pp. 408-411, 1999.
96. N.R. Aghamalyan, E.A. Kafadaryan, R.K. Hovsepyan, *Trends in Semiconductor Science*, New York, Nova Science Publishers, pp. 81–110, 2005.
97. S.A. Studenikin, N. Golego, M. Cocivera, Optical and electrical properties of undoped ZnO films grown by spray pyrolysis of zinc nitrate solution *J. Appl. Phys.*, v. 83, p. 2104, 1998.
98. N.R. Aghamalyan, I.A. Gambaryan, E.Kh. Goulanian, R.K. Hovsepyan, R.B. Kostanyan, S.I. Petrosyan, E.S. Vardanyan. A.F. Zerrouk, Influence of thermal annealing on optical and electrical properties of ZnO films prepared by electron beam evaporation, *Semicon. Sci. Technol.*, v. 18, p. 525, 2003.
99. Н.Р. Агамалян, Р.К. Овсепян, С.И. Петросян, Полевой транзистор на основе пленок ZnO: Li, *Изв. НАН Армении, Физика*, т. 45, с. 407, 2010.
100. Н.Р. Агамалян, Р.К. Овсепян, Фотопроводимость в планарных структурах металл–полупроводник–металл с пленками ZnO:Ga и ZnO:Li, *Изв. НАН Армении, Физика*, т. 43, с. 143, 2008.
101. N.R. Aghamalyan, E.A. Kafadaryan, R.K. Hovsepyan, S.I. Petrosyan, Absorption and reflection analysis of transparent conductive Ga-doped ZnO films, *Semicond. Sci. Technol.*, v. 20, p. 80, 2005.
102. С. Дэвисон, Дж. Левин. Поверхностные (таммовские) состояния. Москва, Мир, 1973.
103. N.R. Aghamalyan, R.K. Hovsepyan, A.R. Poghosyan, V.G. Lazaryan, Photodetectors on the base of ZnO thin films *Proc. SPIE*, v. 5560, p. 235, 2004.
104. Б.А. Волков, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. *УФН*, v. 172, p. 875, 2015.
105. Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос, *Электронные свойства легированных полупроводников*, 1979.

106. B. Abeles, P. Sheng, M.D. Coutts, Y. Arie, Structural and electrical properties of granular metal films, *Adv. Phys.*, v. 24, p. 407, 1975.
107. E. Guevas, M. Ortuno, J. Ruiz, Ground state of granular metals, *Phys. Rev. Lett.*, v. 71, p. 1871, 1993.
108. A.N. Gruzintsev, V.T. Volkov, E.E. Yakimov, Photoelectric properties of ZnO films doped with Cu and Ag acceptor impurities, *Electronic And Optical Properties Of Semiconductors*, v. 37, pp. 259-262, 2003.
109. Y. Liu, C.R. Gorla. J, Ultraviolet detectors based on epitaxial ZnO films grown by MOCVD, *Electronic Materials*, v. 29, p. 69, 2000.
110. W. Yang, R.D. Vispute, Ultraviolet photoconductive detector based on epitaxial  $Mg_{0.34}Zn_{0.66}O$  thin films, *Appl. Phys. Lett.*, v. 78, p. 2787, 2001.
111. Н.Р. Агамалян, Т.А. Асланян, Э.С. Варданян, Е.А. Кафадарян, Р.К. Овсепян, С.И. Петросян, А.Р. Погосян, Электронные фазовые переходы металл–изолятор в широкозонных полупроводниках ZnO, *Изв. НАН Армении, Физика*, т. 47, с. 417, 2012.
112. S.A. Studenikin, M. Cocivera, Time-resolved luminescence and photoconductivity of polycrystalline ZnO films, *J. Appl. Phys.*, v. 91, p. 5060, 2002.
113. K.J. Chen, F.Y. Hung, Optoelectronic characteristics of UV photodetector based on ZnO nanowire thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 479, pp. 674–677, 2009.
114. R.H. Chen, K.K. Likharev, Multiple-junction single-electron transistors for digital applications, *Appl. Phys. Lett.*, v. 72, p. 61, 1998.
115. В.Ф. Гантмахер, Электроны в неупорядоченных средах. М., Физматлит, 2005.
116. M.J. Lee, S. Seo, D.C. Kim, et.al, A Low-Temperature-Grown Oxide Diode as a New Switch Element for High-Density, Nonvolatile Memories, *Adv. Mater.*, v. 19, p. 73, 2007.
117. J.W. Seo, S.J. Baik, S.J. Kang, et.al., A ZnO cross-bar array resistive random access memory stacked with heterostructure diodes for eliminating the sneak current effect, *Appl. Phys. Lett.*, v. 98, p. 233505, 2011.
118. Y.C. Shin, J.W. Song, K.M. Kim, et.al.,  $(In,Sn)_2O_3/TiO_2/Pt$  Schottky-type diode switch for the  $TiO_2$  resistive switching memory array, *Appl. Phys. Lett.*, v. 92, p. 162904, 2008.
119. S.H. Jo, T.C.I. Ebong, B. Bhadviya, et.al., Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems *Nano Lett.*, v. 10, p. 1297, 2010.

120. T. Chang, S.H. Jo, W. Lu, Short-term memory to long-term memory transition in a nanoscale memristor, *ACS Nano*, v. 5, p. 7669, 2011.
121. N.R. Aghamalyan, R.K. Hovsepyan, A.R. Poghosyan, B. von Roedern, E.S. Vardanyan. J, Photoelectric and spectral properties of ZnO thin films, *Optoelect. Advan. Materials*, v. 9, p. 1418, 2007.
122. W.J. Song, Y. Zhang, C. Xu, et al., Polar charges induced electric hysteresis of ZnO nano/microwire for fast data storage, *Nano Lett.*, v. 11, p. 2829, 2011.
123. S.N. Truong, K.S. Min, New memristor-based crossbar array architecture, *J. Semicond. Technol. Scien.*, v. 14, p. 357, 2014.
124. H.E. Maes, G. Groeseneken, H. Lebon, J. Witters, Trends in semiconductor memories, *Microelectronics Journal*, v. 20, pp. 9-58, 1989.
125. А.Н. Грузинцев, В.Т. Волков, Е.Е. Якимов, Фотоэлектрические свойства пленок ZnO, легированных акцепторными примесями Cu и Ag, *Физика и техника полупроводников*, т. 37, с. 275-278, 2003.
126. J.J. Yang, F. Miao, M.D. Pickett, D.A.A. Ohlberg, D.R. Stewart, C.N. Lau, R.S. Williams, The mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches, *Nanotechnology*, v. 20, 2009.