

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Էլ բալյ ան Էլ բալ եղիշ եի

ԳԱԼԻՈՒՄԻ ԵՎ ԼԻԹԻՈՒՄԻ ԽԱՌՆՈՒՐԴՆԵՐՈՎ ԲԱՐԱԿ ZnO
ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԵՎ ՆՐԱՆՑ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ՀԵՏԵՐՈՎԱՌՈՒ ՑՎԱԾՔՆԵՐԻ
ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ՖՈՏՈՆԵԼ ԵԿՏՐԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա.04.05 – Օպտիկ ամասնագիտությունը ամբ
Ֆիզիկ ամաթեմատիկ ական գիտությունը և ներքի թեկնածու է
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսությունը ան
ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Элбакян Элбак Егишеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO С ПРИМЕСЯМИ ГАЛЛИЯ И ЛИТИЯ И
ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности

01.04.05 – „Оптика„

ЕРЕВАН – 2016

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ ֆիզիկական
հետազոտությունը և ներքի ինստիտուտում

Գիտական դեկավար՝ ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու

Ռ.Կ. Հովսեփյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր,
պրոֆեսոր

Ռ.Բ. Ալավերդյան

տեխ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Ս.Խ. Խոսրոսյան

Առաջատար կազմակերպության ղեկավարի և
Էլեկտրոնիկայի

ինստիտուտ

Պաշտպանության ու կայանալու է 2016թ. Յունիսի 14-ին ժամը
13:00-ին

Երևանի պետական համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական
խորհրդի նիստում: Հասցե՝ 0203, Աշտարակ, Ալիխանյան եղբ. 1, ՀՀ
ԳԱԱ ՌՖԷԻ:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առավել է 2016թ. մայիսի 13-ին:

Մասնագիտական խորհրդի

Ֆ.Վ.Գ.թ., դոցենտ

Գիտական քարտուղար՝

Վ.Պ.

Քալանտարյան



Тема диссертации утверждена в Институте физических исследований НАН РА.

Научный руководитель:

кандидат физ.-мат. наук

Р.К. Овсепян

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор

Р.Б. Алавердян

доктор тех. наук, профессор

С.Х. Худавердян

Ведущая организация:

Институт радиофизики и электроники НАН

РА

Защита диссертации состоится 14 июня 2016г. в 13:00 часов,
на заседании специализированного совета 049 по физике Ереванского
государственного университета по адресу: 0203, Аштарак, ул. бр. Алиханян 1,
ИРФЭ НАН РА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 13 мая 2016г.

Ученый секретарь

специализированного совета:



к.ф.м.н., доцент

В.П. Калантарян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Ատենախոսության արդիականության ու նր

Ատենախոսությանը 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՝ փայլ 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 էգիրված ZnO թաղանթների էլեկտրահաղորդականության և ֆոտոհաղորդականության բազմաթիվ հետազոտություններ: Չնայած դրան, իրականացված հետազոտություններում

բացակայում էին այն հարցերի պատասխանները, թե ինչպես են փոխվում թաղանթների \$ոտոելեկտրական և օպտիկական հատկությունները՝ խառնուրդների տեսակի և կոնցենտրացիայի փոփոխություններից կախված: Մինչև հիմա պարզ էլույսի ազդեցությունը լայնաշերտ 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 վոլտամպերային (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 էներգապառման պատճառ, ինչը հանգեցնում է սարքերի տաքացմանը: Այդ իսկ պատճառով էլ այդպիսի մեմրիստրոնների առաջնային խնդիրներից մեկն է դարձել էներգապառման մաքսիմալ նվազեցումը:

Ելնելով վերը նշված խնդիրների առկայությունից և անհրաժեշտ հետազոտությունների բացակայությունից՝ մենք որոշել ենք շեշտը դնել տարբեր խառնուրդներով և գիրված ZnO թաղանթների հաղորդականության և \$ոտոհաղորդականության հետազոտությունների վրա, որոնք թույլ կտան իրականացնել հաղորդականության կինետիկայի և պերկոլյացիոն հաղորդականության նկարագրություն, ինչպես նաև նպատակ մեմրիստրոնային տարրերի էներգապառման նվազեցմանը:

Աշխատանքի նպատակը

Ատենախոսուող թյան նպատակն է իրականացնել տարբեր խառնուրդներով և եզրված ZnO թաղանթների ֆոտոէլեկտրական և օպտիկական հատկույթ ունեցող փորձարարական հետազոտություններ: Նշված նպատակին հասնելու համար ատենախոսուող թյան 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 վրա մշակել և հետազոտել մեմրիստորային այնպիսի տարր (ReRAM), որը պահպանելով մեմրիստորների հիմնական հատկույթ ունեցող, 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 ֆոտոհաղորդականության վրա:

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

Գործնական արժեքը

1. Իրականացրած սառեցված ֆոտոհաղորդականության հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ ZnO թաղանթները կարող են ավելի էլայն կիրառությունն 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 էլինելով փոքր հաղորդականությամբ, կարող են էլայնորեն կիրառվել նվազագույն ջերմային կորուստներով թափանցիկ մեմրիստորային տարրեր պատրաստելու համար:

Պատասխանում ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. Li-ով էգիրված ZnO թաղանթներում ֆոտոհաղորդականության կինետիկան պայմանավորված է սառեցված ֆոտոհաղորդականությամբ:
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 հետազոտության ներքին, թույլ է տալիս որոշել դրանցում պերկոլյացիոն հաղորդականության կլաստերների բնութագրական չափերը:
4. ZnO:Li թաղանթների օգնությամբ կարելի է ստանալ այնպիսի թափանցիկ մեմբրիստրներ, որոնք չունենալով պարամետրերի զգալիորեն շեղումներ՝ օժտված կլինեն փոքրածավալ էներգապաշտամբ:

Աշխատանքի ներկայացում

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները բազմիցս քննարկվել են Ֆիզիկական հետազոտության ներքին 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:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆՊԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներածություն մեջ հիմնավորված է ատենախոսության արդիականությունը, հստակ ձևակերպված է աշխատանքի նպատակները, խնդիրներն ու պաշտպանության ներկայացվող

հիմնական դրույթները: Նշված է նաև ստացված արդյունքների գիտական նորույթը և գործնական արժեքը:

Գլուխ 1-ում ներկայացված է թեմային վերաբերվող արդի գրականության հակիրճ ամփոփում: **1.1** պարագրաֆում ներկայացված են ZnO թաղանթների կիրառությունները թափանցիկ էլեկտրոնիկայի բնագավառում և դրանց հիմնական հատկությունները:

1.2 պարագրաֆում նկարագրված են թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդ-թաղանթների ստացման տարբեր ֆիզիկական եղանակներ: Մանրամասն նկարագրված է էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակը:

Պարագրաֆ **1.3-**ում ներկայացված են ZnO հաղորդիչ թաղանթների կառուցվածքները: Քննարկված են թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդ-թաղանթների միաբյուրեղային և բազմաբյուրեղային կառուցվածքները: Նկարագրված է ZnO-ի վուրտցիտ տեսակի կառուցվածքը, ինչպես նաև մանրամասն նկարագրված է ZnO թափանցիկ թաղանթների գրանուլացված կառուցվածքը:

1.4 պարագրաֆը նվիրված է թափանցիկ հաղորդիչ օքսիդ-թաղանթների էլեկտրական և ֆոտոէլեկտրական հատկություններին: Նկարագրված են ջերմամշակման և խառնուրդներով լեգիրման ազդեցությունները թաղանթների էլեկտրական հաղորդականության վրա: Մանրամասն նկարագրված է թաղանթների ֆոտոհաղորդականությունը, ինչպես նաև թաղանթների սառեցված ֆոտոհաղորդականությունը (frozen photoconductivity):

1.5 պարագրաֆում ներկայացված են ZnO թաղանթների հիման վրա մշակված մեմրիստրոնները: Տրված է միաբևեռ և երկբևեռ մեմրիստրոնների նկարագրություն: Ինչպես նաև մանրամասն ներկայացված է ZnO թաղանթների հիման վրա թափանցիկ մեմրիստրային տարրերը:

Գլ ու խ 2-ը նվիրված է Li-ով և Ga-ով լեգիրված ZnO թաղանթների ֆոտոէլեկտրական հատկություններին: **2.1** պարագրաֆում մանրամասն նկարագրված է ZnO թաղանթների ստացման էլեկտրոնաճառագայթային վակուումային նստեցման եղանակը: Այնուհետև նկարագրված է աճեցումից հետո մշակման եղանակները, ինչպես նաև ջերմամշակման միջոցով թաղանթերի էլեկտրաֆիզիկական հատկությունների ղեկավարման հնարավորությունը:

2.2 պարագրաֆում ներկայացված է ակցեպտորային (Li) և դոնորային (Ga) խառնուրդներով լեգիրված ZnO թաղանթների ստացումը: Քննարկված է մետաղների իոնների լեգիրմամբ թաղանթների տեսակարար դիմադրության ղեկավարումը և ներկայացված է էլեկտրոնաճառագայթային նստեցման համար թիրախները: ZnO թաղանթի դիմադրությունը ղեկավարելու համար սինթեզվել են 0.1, 0.5; 0.6; 0.8; 1; 5 և 10%-անոց Li-ի (հաղորդականությունը նվազեցնելու համար) և 0.7 ու 2 %-անոց Ga-ի (հաղորդականությունը մեծացնելու համար) խառնուրդներով լեգիրված թաղանթները:

2.3 պարագրաֆը վերաբերվում է թաղանթների բնութագրական հատկանիշների ուսումնասիրման եղանակներին: Նկարագրված են թաղանթի հաստության չափման կշռային և օպտիկական եղանակները: Այնուհետև ներկայացված է լույսի ցրման չափումը թաղանթներում, ինչպես նաև թաղանթների էլեկտրահաղորդականության և ֆոտոհաղորդականության հատկությունների ուսումնասիրման եղանակները:

Պարագրաֆ **2.4-**ում ներկայացված է ստացված ZnO թաղանթների կառուցվածքի ձևաբանության հատկություններին ուսումնասիրությունը: Ռենտգենյան հետազոտությունները ցույց են տվել, որ ստացված ZnO թաղանթները կողմնորոշված են: Ցուցադրված են էլեկտրոնային և օպտիկական միկրոսկոպերով ստացված ջերմամշակված և չջերմամշակված

տարբեր թաղանթների պատկերները, որոնցից երևում է, որ բոլոր թաղանթներն ունեն համասեռ կառուցվածքներ:

2.5 պարագրաֆում ներկայացված են թաղանթների էլեկտրահաղորդականության և ֆոտոհաղորդականության հատկությունները: Աղյուսակ 1-ում ցուցադրված են տարբեր կոնցենտրացիաներով Li-ով և Ga-ով լեգիրված ZnO թաղանթների հաղորդականության չափման արդյունքները:

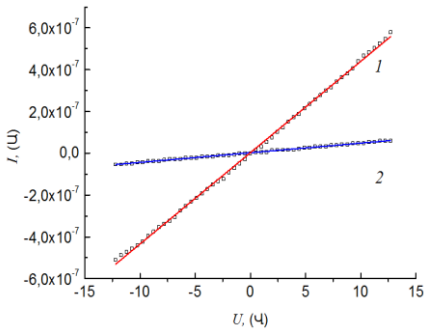
Աղյուսակ 1. ZnO թաղանթների բնույթագրերը:

N	Խառնուրդ, %-ով	Թաղանթների ջերմամշակումը				Հաստությունը, նմ	Հաղորդականությունը (Օհմ.սմ) ⁵ , հաճախություններում	
		ջերմամշ.	T ⁰ °C	բողե	մշտված		0 Հց	1000 Հց
1	Ga, 2	չջերմամշ.	-	-	-	345	2.9×10 ³	0.8×10 ³
2	Ga, 0.7	չջերմամշ.	-	-	-	77	0.9×10 ³	0.4×10 ²
3	Ga, 2	ջերմամշ.	350	60	օդ	350	0.77×10 ³	0.6×10 ³
4	Li, 5	ջերմամշ.	350	60	օդ	170	5.8	2×10 ⁻¹
5	Li, 5	չջերմամշ.	-	-	-	150	1.5	
6	Li, 0.5	ջերմամշ.	350	300	օդ	210	6.8×10 ⁻³	1×10 ⁻³
7	Li, 0.6	չջերմամշ.	-	-	-	630	1.5×10 ⁻¹	
8	Li, 0.6	ջերմամշ.	350	60	օդ	630	0.8×10 ⁻⁶	
9	Li, 0.8	ջերմամշ.	350	60	օդ	550	0.5×10 ⁻⁶	

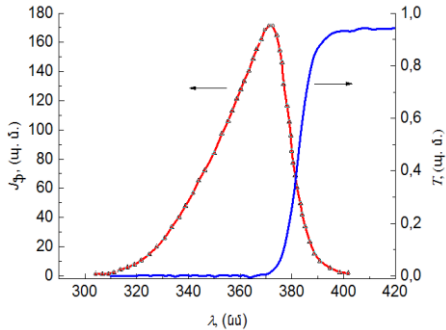
Թթվածնով աղքատացած ZnO:Li բարակ թաղանթները հավելյալ ջերմամշակվել են օդում՝ թթվածնային պակասը նվազեցնելու համար, և որպես հետևանք նվազել է դոնորային կենտրոնների թիվը: Տույց է տրվել, որ ինչպես ջերմամշակման եղանակով, այնպես էլ լեգիրելով խառնուրդներով կարելի է ղեկավարել հաղորդականությանը: Լեգիրված դոնորային կամ ակցեպտորային խառնուրդներով թաղանթների հաղորդականության հարաբերության արժեքները հասնում են մինչև 10⁹, որը շատ կարևոր արդյունք է թափանցիկ էլեկտրոնիկայի տարբեր ստեղծելու համար:

Չաչորդիվ իրականացրած բացթողման տիրույթների չափումները ձևավորում են հիմնական կլանման երկարալիքային եզրը՝ որոշելու համար ZnO թաղանթների

թափանցիկության տիրույթն ու օպտիկական ճառագայթման ազդեցությունը թաղանթների հաղորդականության վրա և օպտիկական անցումների բնութագրերի վրա: Ցույց է տրվել, որ բոլոր թաղանթները թափանցիկ են տեսանելի տիրույթում և ունեն մեծ թողունակություն: Այնուհետև իրականացվել է Ֆոտոհաղորդականության կինետիկայի չափումներ: ZnO:Ga թաղանթների համար լույսի առկայության դեպքում հաղորդականության փոփոխությունն չի դիտվել: Իսկ ահա ZnO:Li (նկ. 1) թաղանթների համար մթության և լուսավորության դեպքերում դիտվել է հաղորդականության էական փոփոխություն:



Նկ. 1. ZnO:Li թաղանթի U-I-ը. 1-լուսավորած, 2-մութ

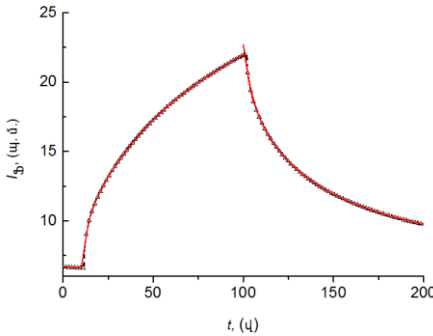


Նկ. 2. ZnO:Li թաղանթի J_{ph} ֆոտոհոսանքի և T բացթողման գործակցի սպեկտրալ կախվածությունը

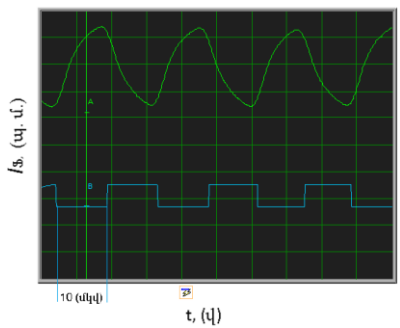
ZnO:Li (0,8%-ով) թաղանթի ֆոտոհաղորդականության հոսանքի J_{ph} և բացթողման գործակցի T սպեկտրալ կախվածության հետազոտման արդյունքներից (նկ. 2) պարզ է, որ պայմանավորված վալենտականության գոտուց հաղորդականության գոտի էլեկտրոնների գրգռմամբ՝ ֆոտոհաղորդականության սպեկտրն ունի գագաթ 370 նմ-ի (3,34 էՎ) վրա:

Իրականացվել է ZnO:Li (0.8%) թաղանթի համար ֆոտոհաղորդականության հոսանքի կինետիկայի հետազոտություններ: Ստացված արդյունքները մի էքսպրեսենցիայով չեն բացատրվում, այլ բացատրվում են 2

Էքսպրեսենցիաների գումարով (նկ. 3): Արագ բաղադրիչի հետազոտման համար իմպուլսներով միացվել և անջատվել է ԼՈւյսը, որից նույնպես երևում է, որ կորերը Էքսպրեսենցիային են (նկ. 4): Այսպիսի թաղանթները կարող են օգտագործվել UV տիրույթի ֆոտոդետեկտորների պատրաստման համար: Ցույց են տրվել, որ ֆոտոհաղորդականության դանդաղ փոփոխության ընթացքում ռելաքսացիոն ժամանակները պայմանավորված են սառեցված ֆոտոհաղորդականությամբ:



Նկ. 3. ZnO:Li թաղանթների ֆոտոհաղորդականության հոսանքի դանդաղ բաղադրիչի աճի և անկման կինետիկան:

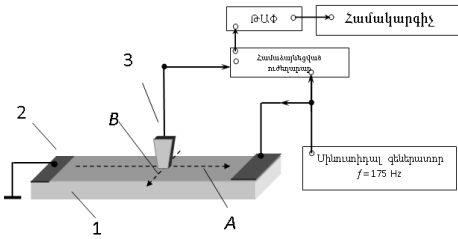


Նկ. 4. ZnO:Li թաղանթների ֆոտոհաղորդականության հոսանքի արագ բաղադրիչի աճի և անկման կինետիկան:

ԳԼՈՒԽ 3-ը ամբողջովին նվիրված է Լայնաչերտ ZnO կիսահաղորդիչների վրա հիմնված գրանուլացված կառուցվածքների հաղորդականության ուսումնասիրությանը: Պարագրաֆ 3.1-ում ներկայացված են թաղանթների գրանուլացված կառուցվածքի հատկությունները և էլեկտրոնային վերծանող միկրոսկոպի միջոցով թաղանթների գրանուլների չափերի հետազոտությունը: Ցույց է տրվել, որ 125 նմ հաստությամբ ZnO:Ga թաղանթում առավելագույն քանակությամբ գրանուլներն ունեն 1.8 նմ տրամագիծ և 542 նմ հաստությամբ ZnO:Ga թաղանթում՝ 3.29 նմ:

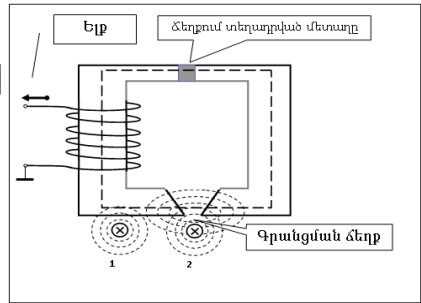
Թաղանթներում հաղորդիչ կլաստերների չափերը որոշելու համար մշակվել և պատրաստվել է թաղանթներում տեղային հոսանքի խողայան չափման համակարգ: Պարագրաֆ 3.2-

ու մ ներկայացված են թաղանթներում տեղային հոսանքի խտության չափման համար մշակված նոր համակարգի կառուցվածքը (նկ . 5):



Նկ. 5. Տեղային հոսանքի խտության չափում մետրի իրականացնող համակարգի բլոկ սխեման:

1- Al/ZnO:Ga/Al կամ Al/ZnO:Li/Al հարթ կառուցվածքը, 2-մետաղական էլեկտրոդներ:

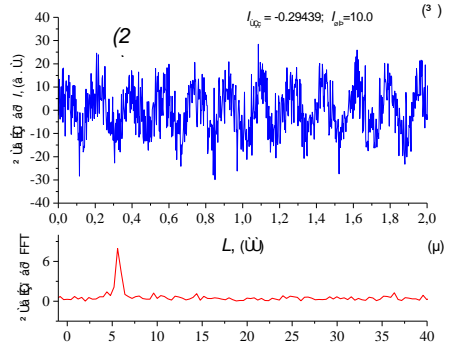
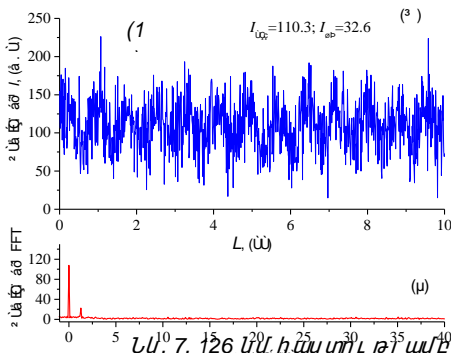


Նկ. 6. Տրանսֆորմատորի հոսանքի ռեժիմում աշխատող MIG տեսակի մագնիսական ալիսի սխեման:

Տեղային հոսանքների մեծությունը չափվել է ST-251 կոշտ սկավառակի MIG (Metal in the head gap) տեսակի մագնիսական գլխիկի միջոցով (նկ. 6), որը աշխատում է տրանսֆորմատորի հոսանքի ռեժիմում: Փորձերը կատարվել են Labview ծրագրի օգնությամբ:

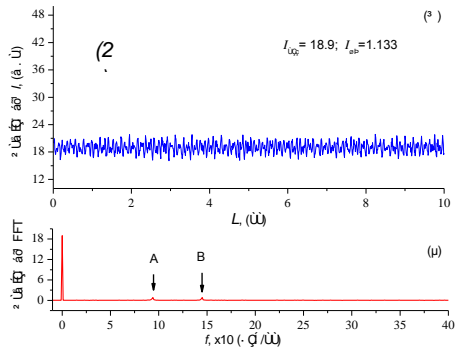
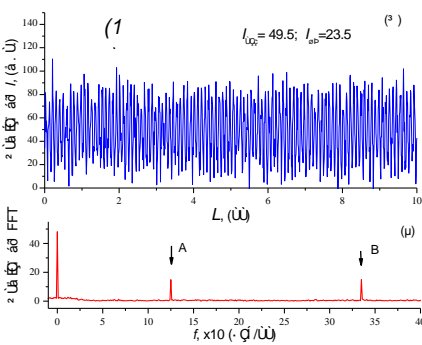
Իրականացվել է մշակված համակարգի թեստավորում և ցույց է տրվել, որ կիսահաղորդչային թաղանթներում այդ համակարգով կարելի է չափել տեղային հոսանքի խտությունը:

3.3 պարագրաֆում քննարկված են Li-ով կամ Ga-ով էգիրված ZnO գրանուլացված թաղանթների հաղորդականության և ֆոտոհաղորդականության ուսումնասիրությունները: Ստեղծված նոր համակարգով իրականացվել են ZnO:Ga թաղանթների տեղային հոսանքի խտության չափումներ: Հոսանքի գծերին ուղղահայաց վերծանման դեպքում արագ ֆուրյե ձևափոխության (FFT) գագաթը 13 գիծ/մ է, այսինքն՝ այդ ուղղվածությունում հաղորդիչ կլաստերների բնութագրական չափերը 78 մկմ են, իսկ գուգահեռ վերծանման դեպքում կլաստերների բնութագրական չափերը 18.1 մկմ են (նկ. 7):



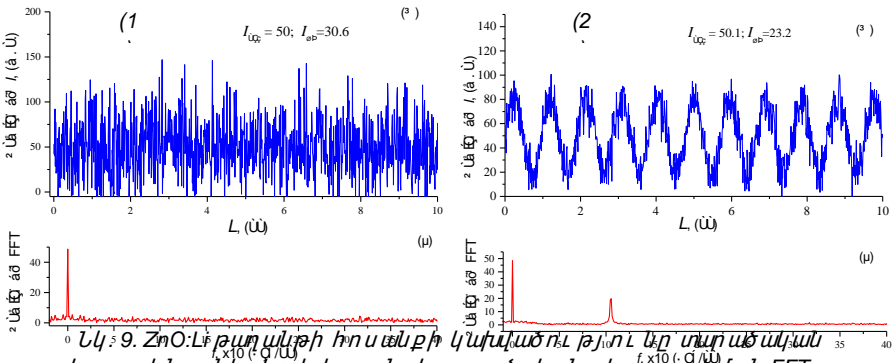
Նկ. 7. 126 նմ հաստու թյամբ ZnO:Ga թաղանթի հոսանքի կախված ու թյ ու նը տարածական կոորդինատներից և հոսանքի տարածական տեղաբաշխման FFT-ն.

320 նմ և 800 նմ հաստու թյ ու ններով ZnO:Ga թաղանթների ուղղահայաց վերծանման դեպքում FFT-ն ու նի երկու գագաթներ (Նկ. 8), այսինքն՝ այդ ուղղու թյամբ հաղորդիչ կլաստերներն ու նեն երկու բնութագրական չափեր: Երևում է, որ թաղանթի հաստու թյ անմեծացման հետ տարածական ֆլուկտուացիաները փոքրանում են: Ցույց է տրվել, որ հոսանքի միջին քառակուսային շեղումը կտրուկ նվազում է թաղանթների 300-500 նմ հաստու թյ անտիրույթում և թաղանթների հաստու թյ ու նը մեծացնելուց հաղորդականու թյ ու նը դառնում է համասեռ:



Նկ. 8. 320 նմ (1) և 800 նմ (2) հաստու թյամբ ZnO:Ga թաղանթների հոսանքի կախված ու թյ ու նը տարածական կոորդինատներից և հոսանքի տարածական տեղաբաշխման FFT-ն ու ուղղահայաց մեծանման ռեառում:

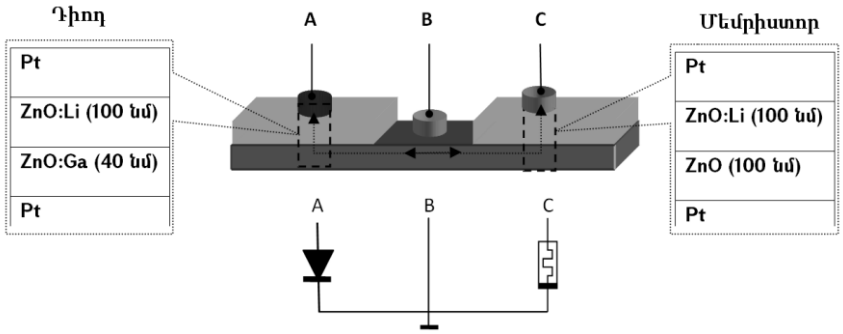
Իրականացվել են հետազոտություններ նաև Li-ով լեգիրված ZnO թաղանթների համար (նկ. 9): Ցույց է տրվել, որ մթնոլորտային ժամանակ պերկոլյացիոն կլաստերները չունեն բնութագրական չափեր, իսկ լուսավորության ժամանակ պերկոլյացիոն կլաստերներն ունեն 78 մկմ բնութագրական չափեր: Ցույց է տրվել, որ ստացված ZnO թաղանթներում հաղորդիչ կլաստերների չափերը չեն համընկնում գրանուլների չափերի հետ:



Նկ. 9. ZnO:Li թաղանթի հոսանքի կախվածությունը տարածական կոորդինատներից և հոսանքի տարածական տեղափոխման FFT-ը (1)-մթնոլորտային ժամանակ, (2)-լուսավորման ժամանակ:

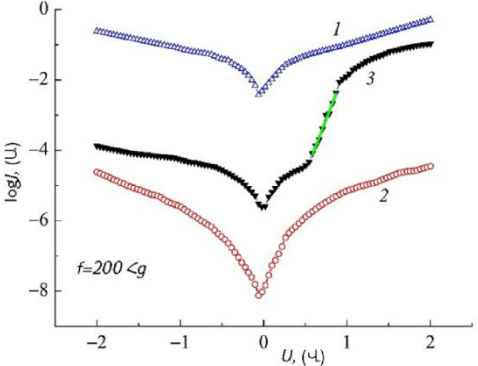
Գլուխ 4-ը նվիրված է լիթիումով լեգիրված ZnO թաղանթների հիման վրա մեմրիստորների նախագծմանը և ուսումնասիրությանը: **4.1** պարագրաֆում ներկայացված են մեմրիստորային հիշողության տարրերի աշխատանքային սկզբունքը և թաղանթների օգտագործումը դրանց պատասխան համար:

4.2 պարագրաֆում ներկայացված է աշխատանքում առաջարկված Pt/ZnO:Ga(40 նմ)/ZnO:Li(100 նմ)/Pt հետերոկառուցվածքի հիման վրա ճոտկի (1D) դիոդից և Pt/ZnO(100 նմ)/ZnO:Li (100 նմ)/Pt հետերոկառուցվածքի հիման վրա (1R) մեմրիստորից պատասխան (1D1R) միաբևեռ մեմրիստորային հիշողության տարրի կառուցվածքը (նկ. 10):



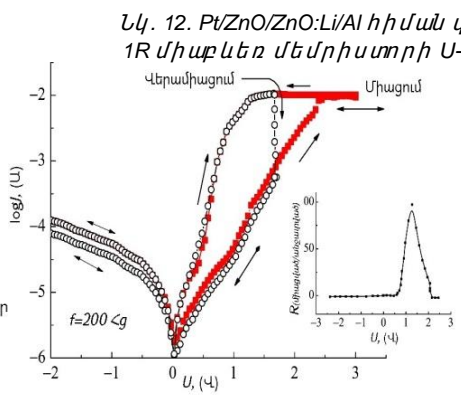
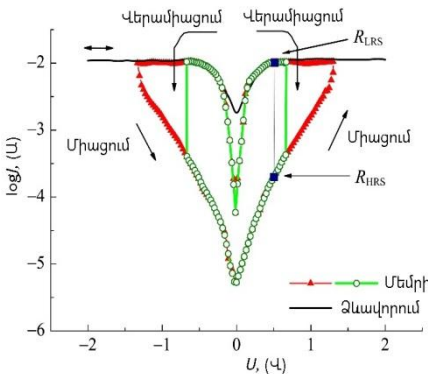
Նկ. 10. 1D1R մեմրիստորային տարրի կառուցվածքային և համարժեք սխեմաները:

4.3 պարագրաֆում ներկայացված են Li-ով լեգիրված ZnO թաղանթների հիման վրա հետերոկառուցվածքային մեմրիստորների U-I-երի չափումները: Նկ. 11-ում ցուցադրված է տարբեր հետերոկառուցվածքների U-I-երը, որոնց համեմատությամբ ունից երևում է, որ Pt/ZnO:Li կառուցվածքն ունի հոսանքի փոքր արտահոսք, և դրական ու բացասական տիրույթներում U-I-երի կորերը համարյա սիմետրիկ են: Հակառակը, հոսանքի մեծ հոսք և գծային U-I երևում է Pt/ZnO:Ga կառուցվածքներում: Pt/ZnO:Ga/ZnO:Li/Pt կառուցվածքն ունի ոչ-գծային անհամաչափ U-I: Հոսանքներն ուղիղ և հակադարձ լարման փոփոխությամբ ունով մոտավորապես 10^3 անգամ տարբերվում են ± 2 Վ լարման փոփոխության ժամանակ, ուղիղ անկման լարումը $U=0.9-1$ Վ է և ոչ իդեալականության գործակիցը $n=2.7$ է:



Նկ. 11. Pt/ZnO:Ga/Al (1-ին կոր) կառուցվածքի U-I-ը, Pt/ZnO:Li/Al (2-րդ կոր) կառուցվածքի U-I-ը և Pt/ZnO:Ga/ZnO:Li/Pt (3-րդ կոր) 1D կառուցվածքի ոչ-գծային U-I-ը, $n=2.7$ ոչ իդեալականության գործակիցով:

Իրականացվել է Pt/ZnO/ZnO:Li/Al կառուցվածքի հիման վրա 1R միաբևեռ ռեզիստորային մեմրիստորի U-I-ի չափումներ: Յտեռոկառուցվածքի պատրաստումից հետո տեղի է ունեցել էլեկտրական ձևավորման արոցեսը այնպիսի լարումների դեպքում, որոնք գերազանցում են ախատանքային լարումները: Նկ 12-ում պատկերված է բարձր և ցածր դիմադրություն ունեցող վիճակներում U-I-երը: Այսպիսի տարբերը հանդիսանում են երկբևեռ մեմրիստորներ, քանի որ ախատում են բացասական և դրական լարումների դեպքում:



Նկ. 12. Pt/ZnO/ZnO:Li/Al հիման վրա 1R միաբևեռ մեմրիստորի U-I-ը:

Նկ. 13-ում ցուցադրված է ինտեգրալային 1D1R սարքի տիպային U-I-ը, 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 մեմրիստորային տարրը հանդիսանում է միաբևեռ, քանի որ համակարգը փոխակերպվել է միայն դրական բևեռացման լարման դեպքում: Նկ. 13-ի մեջ ցույց է տրված, որ 1D1R սարքի R (միացված/անջատված) հարաբերությունն ինֆորմացիան ընթերցելու ժամանակ ունի մաքսիմում արժեք ~ 80 լարման 1V փոփոխման դեպքում:

Իրականացվել է նաև 1D1R սարքի թեստավորման հետազոտություններ գրանցում-ընթերցում ցիկլիկ մեծումում: Ցույց է տրվել, որ սարքը առանց էլեկտրական պարամետրերի էականորեն վատացման, թույլ է տալիս ընթերցել գրանցման ինֆորմացիան 10^4 վայրկյանում: Եթե ենթադրենք, որ միանգամյա հաշվարկի ժամանակը 10^{-6} վայրկյան է, դա նշանակում է ընթերցել ինֆորմացիան 10^{10} անգամ առանց պարամետրերի վատացման: Բացի այդ, մշակված մեմրիստորային տարրը օժտված է փոքրածավալ էներգասպառումով:

Եզրակացություն

1. Մշակվել է էպիքրված ZnO թաղանթների ստացման եղանակ, որը թույլ է տալիս ստեղծել ինչպես բարձր, այնպես էլ ցածր հաղորդականություններով թաղանթներ: Ցույց է տրվել, որ խառնուրդներով թաղանթների հաղորդականության դեկավարումը արդյունավետ է, ինչպես հաստատուն, այնպես էլ 1000 Յգ փոփոխական լարումների դեպքում: Լեգիրված դոնորային կամ ակցեպտորային խառնուրդներով թաղանթների դիմադրությունների հարաբերության արժեքները հասնում են մինչև 10^8 - 10^9 , որը թույլ է տալիս բավարարել թափանցիկ էլեկտրոնիկայի համար էլեկտրաստիկական նյութերին ներկայացվող պահանջներին:
2. Իրականացվել են ZnO թափանցիկ թաղանթների ֆոտոէլեկտրական բնութագրերի հետազոտություններ: Ցույց է տրվել, որ Li-ի խառնուրդով թաղանթների էպիքրումը ապահովում է հաղորդականության էական նվազեցում (առանց հաղորդականության տեսակի փոփոխության) և կարելի է հասնել ֆոտոհաղորդականության և հաղորդականության հարաբերությունների զգալի աճի: Այս արդյունքները կարող են օգտագործվել UV տիրույթի պինդմարմնային ֆոտոդետեկտորների պատրաստման համար:
3. Իրականացրած ZnO թափանցիկ թաղանթների ֆոտոհաղորդականության ուսումնասիրությունը նաև ցույց է տալիս, որ ֆոտոհաղորդականության դանդաղ փոփոխության ընթացքում մեկաբացիոն ժամանակները

պայմանավորված են սառեցված ֆոտոհաղորդականության (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 գրանուլացված թաղանթներում հաղորդիչ կլաստերի չափերը:
5. Li-ով և Ga-ով լիգիված ZnO բարար թաղանթների հիման վրա ստացվել են գրանուլացված կառուցվածքներով թաղանթներ: Ուսումնասիրվել է թթվածնային թափուր տեղերով և ցինկի միջհանգույցային ատոմներով պայմանավորված ակցեպտորոյին և դոնորային կոմպլեքսների ազդեցությունը և խառնուրդների (Li և Ga) ազդեցությունը բյուրեղային կառուցվածքի հաղորդականության վրա:
6. Հետազոտվել 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 հաղորդականության կառուցվածքներ: Եթե մթային հոսանքների համար պերկոլյացիոն կլաստերները չունեն բնութագրական չափեր, ապա ֆոտոհոսանքի դեպքում պերկոլյացիոն կլաստերներն ունեն 9.4 մկմ բնութագրական չափ: Փորձարարական արդյունքները բացատրվում են պերկոլյացիոն տեսության հիման վրա:
7. Մշակվել և հետազոտվել է նոր մեմրիստորային հիշողության տարր պատահական հասանելիության հիշողության համար (resistance random access memory - ReRAM): Մշակված կառուցվածքը բաղկացած է Pt/ZnO:Ga/ZnO:Li/Pt հետերոկառուցվածքի հիման վրա (1D) ծոսկի 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 սարքը 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 էներգապառու մով:

Օգտագործված 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.

Հրատարակված ախառնությունների ցուցակը

1. **Ջ.Է. Էլբակյան**, Фотозлектрические свойства легированных Ga и Li пленок ZnO, Известия НАН Армении, Физика, т. 51, с. 62-69, 2016.
2. Р.К. Овсепян, А.Р. Погосян, **Ջ.Է. Էլբակյան**, Проводимость гранулированных структур на основе широкозонных полупроводников ZnO, Известия НАН Армении, Физика, т. 50, с. 85-95, 2015.
3. **Ջ.Է. Էլբակյան**, Р.К. Овсепян, А.Р. Погосян, Мемристоры на основе легированных литием пленок ZnO, Известия НАН Армении, Физика, т. 50, с. 368-374, 2015.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. **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.
8. **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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO С ПРИМЕСЯМИ ГАЛЛИЯ И ЛИТИЯ И ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ

АННОТАЦИЯ

Прозрачные проводящие пленки широкозонного полупроводника ZnO могут найти широкое применение в устройствах прозрачной электроники. Предполагается их использование как в нелинейных элементах прозрачной оптики, так и в пассивных элементах, таких как проводники и электроды.

Поскольку полупроводниковые пленки ZnO имеют гранулированную структуру, то в них транспорт носителей заряда объясняется низкоразмерной неоднородной проводимостью с использованием перколяционной модели. В настоящее время исследования таких структур с перколяционной проводимостью отсутствуют.

Широкое применение пленки ZnO могут найти и в системах памяти, в частности при создании мемристорных и сегнетоэлектрических систем оперативной и энергонезависимой памяти. Первичной задачей при создании мемристоров является максимальное снижение энергопотребления.

В работе уделено особое внимание исследованиям фотопроводимости и проводимости легированных разными примесями пленок ZnO, что в дальнейшем даст возможность использовать эти пленки в вышеупомянутых элементах прозрачной электроники.

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика получения легированных пленок ZnO, позволяющая создавать пленки как с высокой, так и с низкой проводимостью. Показано, что примесное управление сопротивлением пленок эффективно как на постоянном токе, так и на частотах до 1000 Гц. Отношение сопротивлений пленок, легированных донорной и акцепторной примесями, достигает значений 10^8 - 10^9 , что позволяет удовлетворить требования, предъявляемые к электрооптическим материалам для прозрачной электроники.
2. Проведены исследования фотоэлектрических характеристик прозрачных пленок ZnO. Показано, что легирование Li обеспечивает значительное уменьшение темновой проводимости (без изменения типа проводимости) и позволяет достигнуть существенного увеличения отношения фотопроводимости к темновой. Это явление может быть использовано при разработке твердотельных фотодетекторов для УФ диапазона.

3. Исследования фотопроводимости прозрачных пленок ZnO показали, что времена релаксации в процессе медленного изменения фотопроводимости обусловлены замороженной фотопроводимостью.
4. Для измерения плотности локальных токов в тонких пленках был предложен и реализован принципиально новый метод, позволяющий измерять величину и направление локальных токов в низкоразмерных системах проводимости, а также локальную проводимость тонких пленок и определять размеры кластера проводимости в модели перкаляционной проводимости.
5. Получены пленки с гранулированной структурой на основе тонких пленок ZnO, легированных Li и Ga. Исследовано влияние акцепторной примеси Li и донорной примеси Ga, а также комплексов, обусловленных вакансиями кислорода и межузловыми атомами Zn и акцепторной и донорной примесью, на проводимость.
6. Исследовано влияние размеров гранул и кристаллической структуры на проводимость и фотопроводимость. Показано, что в пленках ZnO:Ga размеры гранул и кластеров проводимости не совпадают. Фото и темновая проводимости для одних и тех же пленок ZnO:Li имеют разные структуры и соответственно разный размер кластера проводимости. Если для темновых токов перколяционные кластеры не имеют характерных размеров, то в случае фототока они имеют характерный размер, равный 9,4 мкм.
7. Разработан и исследован новый мемристорный элемент памяти с произвольным доступом (resistance random access memory - ReRAM). Разработанная структура 1D1R состоит из диода Шоттки (1D) на основе гетероструктуры Pt/ZnO:Ga/ZnO:Li/Pt и мемристора (1R) на основе гетероструктуры Pt/ZnO/ZnO:Li/Pt.
8. Элемент памяти 1D1R преобразуется из состояния R_{HRS} в состоянии R_{LRS} и обратно, используя импульсы с положительным импульсным напряжением, то есть является элементом униполярной памяти. Предложенное устройство имеет большую стабильность и выдерживает 10^4 циклов чтения-записи и 10^{10} циклов считывания однократно записанной информации без ухудшения параметров. Предложенная структура мемристорного элемента памяти имеет низкое энергопотребление.

RESEARCH OF OPTICAL AND PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF ZnO
THIN FILMS WITH LITHIUM AND GALLIUM IMPURITIES AND
HETEROSTRUCTURES BASED ON THEM

SUMMARY

Transparent conductive thin films of wideband ZnO semiconductor can be widely used in transparent electronic devices. It is expected that they will be used in the nonlinear elements of transparent optics and as passive elements, such as the conductors and the electrodes.

Since ZnO films have a granular structure, hence they have percolation conductivity. At the moment, the study of such percolation conductivity structures hasn't been implemented yet.

ZnO films also can be widely used in memory systems, in particular for development of memristor and ferroelectric memories. The primary objective of the memristor development is the maximum reduction of the energy consumption.

In current work special attention was paid to the study of the photoconductivity and conductivity of ZnO films doped with different impurities, which furthermore will give an opportunity to use these films in abovementioned elements of transparent electronics.

During research work the following main results have been achieved:

1. A method of creating doped ZnO films, which allows to obtain films with both high and very low conductivity, has been developed. It is showed, that the management of the conductivity of doped films is effective both at DC and at AC up to 1000 Hz frequencies. The ratio of conductivities of the films doped with donor and acceptor impurities reaches to 10^8 - 10^9 , which let to satisfy the conditions of electrooptical materials in transparent electronics.
2. The researches of photoelectric characteristics of transparent ZnO thin films have been implemented. It is showed that Li doping ensures a significant reduction of conductivity (without change of conductivity type), hence we can reach to a significant increase of the ratio of photoconductivity and conductivity. These results can be used in the development of solid state UV photodetectors.
3. Implemented researches of the photoconductivity of transparent ZnO films showed also, that during the slow change of photoconductivity the relaxation times are due to frozen photoconductivity.
4. A principally new method for measurements of the local electric current in thin films has been proposed and experimentally realized. It allows to measure value and direction of local currents in low dimensional conductivity systems and to determine the size of the conductivity cluster in granular structures.

5. The granular structures were prepared on the base of ZnO thin films doped by Li and Ga. The influence of acceptor (Li) and donor (Ga) impurities and complexes, caused by oxygen vacancies and interstitial zinc atoms and impurities, on the conductivity has been investigated.
6. The effect of granule size and crystallite structure on conductivity and photoconductivity was studied. It was shown that the granule size and size of conductivity cluster in ZnO:Ga film don't correlate. It was found that dark conductivity and photoconductivity in ZnO:Li films have different conductivity structure: if for dark current there are no percolation clusters, for photocurrent the percolation clusters have a 9.4 microns characteristic size.
7. The new memristor memory element for random access memory (resistance random access memory - ReRAM) was developed and investigated. The developed structure 1D1R consists of a Schottky diode (1D) based on Pt/ZnO:Ga/ZnO/Pt heterostructure and a memristor (1R) based on Pt/ZnO:Ga/ZnO/ZnO:Li/Pt heterostructure.
8. The 1D1R memory element is switched from R_{HRS} to R_{LRS} state and back using pulses of positive polarity, i.e. it is a unipolar memory element. The proposed device has a high stability and can withstand 10^4 cycles of switching in a regime of writing-reading and 10^{10} cycles of reading of once recorded data without significant deterioration of parameters. Besides, the developed memory element has a very low energy consumption.