

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Հովհաննես Ռոբերտի Դաշտոյան

**ՄԵՏԱՂ-ՖԵՐՈՒԷԼ ԵԿՏՐԻԿ-ՄԵՏԱՂ
ՆԱՆՈԹԱՂԱՆԹԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒ ՑՎԱՃՔՆԵՐԻ ՍՏԱՑՈՒ ՄԸ ԵՎ
ՍՏԱՏԻԿ, ԴԻՆԱՄԻԿ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒ ՄԸ**

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅՈՒՆ

Ե.27.01 - «Էլեկտրոնիկա, միկրո և նանոէլեկտրոնիկա»
մասնագիտու էլ ղ ղ ամբ տեխնիկական գիտու էլ ղ ու ն ն երի թեկնածու է
գիտական աստիճանի
հայցման համար

Գիտական ղեկավար՝
Տեխնիկական գիտու էլ ղ ու ն ն երի դոկտոր, պրոֆեսոր,
ՀՀ Գիտու էլ ղ ան վաստակավոր գործիչ
Վահե Վազգենի Բուռնիաթյան

ԵՐԵՎԱՆ 2016

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Գ Լ Ո Ւ Խ 1. ՖԵՐՈԷԼԵԿՏՐՈՒԿՆԵՐ. ՍՏԱՑՈՒՄԸ, ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ (ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԿԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ)	10
§1.1. Ֆերոէլ եկտրիկներ. կառուցվածքը, առանձնահատկություններն ու կիրառությունները	10
§1.2. Տե նանոթաղանթային կառուցվածքների ստացման տեխնոլոգիաներ	14
§1.3. Հաղորդականության մեխանիզմները ֆերոէլ եկտրիկ թաղանթներում	17
§1.4. Եզրակացությունն ու խնդրի դրվածքը	21
Գ Լ Ո Ւ Խ 2. ԲԱՐԴՕՔՍԻԴԱՅԻՆ ՏԵ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՍԻՆԹԵԶԸ, ԿԵՐԱՄԻԿԱՆԵՐԻ ՊԱՏՐԱՍՏՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ	24
§2.1. Բարդօքսիդային ֆերոէլ եկտրիկ բարիում-ստրոնցիումի տիտանատը (BST)	24
§2.2. (Ba,Sr)TiO ₃ փոշենյութի ինքնատարածվող բարձր ջերմաստիճանային սինթեզի (ԻԲՍ) մեթոդը	28
§2.3. (Ba,Sr)TiO ₃ նանոփոշենյութի ցիտրատ-գել սինթեզի (ՑԳՍ) մեթոդը	32
§2.4. (Ba,Sr)TiO ₃ -ի գլիցին-նիտրատայրման (ԳՆԱ) սինթեզի մեթոդը	39
§2.5. Եզրակացություններ երկրորդ գլխի վերաբերյալ	41
Գ Լ Ո Ւ Խ 3. ԲԱՐԴՕՔՍԻԴԱՅԻՆ ՖԵՐՈԷԼԵԿՏՐՈՒԿ ՆԱՆՈԹԱՂԱՆԹԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆ	43
§3.1. Լազերափմառված սային փոշենստեցումը և կիրառված տեղակայանքը	43
§3.2. ԼԻՓ-ով BST-ի նանոթաղանթների ստացումը	47
§3.3. BST-ի նանոթաղանթների բաղադրության ու կառուցվածքի հետազոտումը	50
§3.4. Եզրակացություններ երրորդ գլխի վերաբերյալ	57

ԳԼՈՒԽ4. Մ-ՖԷ-Մ ՆԱՆՈԹԱՂԱՆԹԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՍՏԱՏԻԿ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ	58
§4.1. Մ-ՖԷ-Մ նանոթաղանթային կառուցվածքների ստացումը	58
§4.2. Ստացված Մ-ՖԷ-Մ նանոթաղանթային կառուցվածքների ստատիկ բնութագրերի հետազոտությունը	63
§4.3. Թթվածնային վականսիաներ պարունակող Մ-ՖԷ-Մ թաղանթային կառուցվածքների վրա էլեկտրոնային ճառագայթման ուսումնասիրությունը	69
§4.4. Եզրակացություններ չորրորդ գլխի վերաբերյալ	78
ԳԼՈՒԽ5. Մ-ՖԷ-Մ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԴԻՆԱՄԻԿ (ԲԱՐՁՐՅԱՃԱԽԱԿԱՆԱՅԻՆ) ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄ	80
§5.1. Ներածություն	80
§5.2. Մաթեմատիկական մոդելը և տեսական առնչությունները	84
§5.3. Եզրակացություններ հինգերորդ գլխի վերաբերյալ	104
ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԱՄՓՈՓՈՒՄ ԵՎ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ	106
ՕԳՏԱԳՈՐԾՎԱԾ ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ	110
ՅԱՎԵԼՎԱԾ 1.....	118
ՅԱՎԵԼՎԱԾ 2.....	119

***Աշխատանքս նվիրում եմ Արցախում
2016-ի ապրիլ 7-ին թեժ մարտերում անմահացած
մեր հերոս նահապետների սուրբ հիշատակին:***

ՆԵՐԱՃՈՒ ԹՅՈՒՆ

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒ ԹՅԱՆ ԱՐԴԻԱԿԱՆՈՒ ԹՅՈՒՆԸ

Ժամանակակից տեղեկատվական համակարգերի օրըստօրե աճող խփստ պահանջները բավարարելու համար անհրաժեշտ են նոր և բարելավված հատկություններով նյութեր ու կառուցվածքներ: Բարդօքսիդային \$երոելեկտրիկ (ՖՕՏԷ) նյութերը և դրանց վրա հիմնված նանոթաղանթային կառուցվածքները վերջին տարիներին այնպես լայնորեն են կիրառվում գիտության ու արտադրության բնագավառներում, որ գիտական շրջանակներում մինչև անգամ բավականին լուրջ ու հիմնավոր քննարկումներ են ընթանում մոտապագայում կիսահաղորդչային տեխնոլոգիաներից ՖՕՏԷ նյութերի վրա հիմնված տեխնոլոգիաներին անցում կատարելու կամ առնվազն ՖՕՏԷ նյութերը կիսահաղորդչային տեխնոլոգիաներում առավել մեծ չափով ինտեգրելու մասին: Որպես ասվածի ապացույց բավական է ընդամենը նշել ՖՕՏԷ-ների կիրառությունների մասին Էներգոանկախ \$երոելեկտրական օպերացիոն հիշողություններում (FeRAM), բարձր ծրարման խտությամբ դինամիկ օպերացիոն հիշողություններում (DRAM), մետաղ-Ֆերոելեկտրիկ-կիսահաղորդիչ դաշտային տրանզիստորներում (MFSFET), վերջին մի քանի տարիներին հսկայական ուշադրության արժանացած, մեմրիստիվ երևույթի (անգլ.՝ memristive phenomena) հիման վրա աշխատող մեմրիստորային Էներգոանկախ հիշող տարրերում (ReRAM), պինդմարմնային վառելիքային մարտկոցներում (SOFC), ամենատարբեր տվիչային (սենսորային) միկրոսարքերում, վարակտորներում և այլուր: Եթե այս շարքում ավելացնենք նաև ՖՕՏԷ-ների կիրառությունը որպես անմիջական շրջապատից Էներգիայի կուտակիչներ (օրինակ, ջերմային Էներգիայի կուտակման համար պիրոելեկտրիկ, իսկ մեխանիկական տատանումների (վիբրացիաների) Էներգիայինը՝ պիեզոելեկտրիկ սարքերը), ապա այլևս ակնհայտորեն կփաստվի ՖՕՏԷ-ների կիրառության արդիական ու խփստ հեռանկարային լինելը:

Պերովսկիտային կառուցվածք ունեցող ՖՕՏԷ-ները լավ դիելեկտրիկներ են, որոնք բնութագրվում են փոքր կորուստներով, լավ պիեզոելեկտրական հատկություններով, շատ մեծ դիելեկտրիկ թափանցելիությամբ, որը կախված է կիրառված էլեկտրական դաշտից, մեխանիկական ազդեցություններից և ջերմաստիճանից: Վերջին

տասնամյակում պերովսկիտ՝ $A_xA'_{1-x}BO_3$ ($A = P, Ba, La, Li; A' = Sr, Ca; B = Ti, Ta, Co, Fe, B = Ti, Ta, Co, Fe; 0 < x < 1$), կառուցվածքով մետաղօքսիդների նկատմամբ հետաքրքրությունը պայմանավորված է դրանց էլեկտրական հատկությունների բազմազանությամբ՝ դիէլեկտրիկականից մինչև իոնական/կամ մետաղական, n- և p-տեսակի կիսահաղորդչայինից մինչև գերհաղորդիչ: Լայնորեն հետազոտվել և կիրառություն են գտել հատկապես պերովսկիտ տիպի միջարք FO_5E նյութեր, օրինակ, $BaTiO_3, SrTiO_3, (Ba,Sr)TiO_3$ (BST), $PbTiO_3, Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT), $BiFeO_3, LiNbO_3$ և այլն:

Ժամանակակից տեխնոլոգիաները թույլ են տալիս ստանալ նանոթաղանթային, մինչև անգամ ատոմական մի քանի շերտից բաղկացած կառավարելի կառուցվածքներ, որոնք ցուցաբերում են ծավալային համեմատությամբ էապես տարբեր հատկություններ: Այնուամենայնիվ, պետք է փաստել, որ ներկայումս առկա են բավականին լուրջ նախագծային և տեխնոլոգիական դժվարություններ՝ կապված FO_5E նյութերից որակյալ, կառավարելի և վերարտադրելի բնութագրերով նանոթաղանթների հիմքի վրա նախագծվող կառուցվածքների ու սարքերի պատրաստման հետ: Այս իմաստով չափազանց կարևորվում են FO_5E նյութերից նանոչափային կառուցվածքների նախագծման, պատրաստման տեխնոլոգիական ռեժիմների մշակման ուղղությամբ իրականացվող փորձարարական աշխատանքները:

Ատենախոսության փորձարարական մասն իր մեջ ներառում է ո՛չ միայն լայն կիրառություններ ստացած և հեռանկարային FO_5E նյութ բարիում-ստրոնցիումի տիտանատի (BST) տարբեր մեթոդներով սինթեզումը, սինթեզված BST փոշենյութերից ծավալային կերամիկաների և կոնդենսատորների պատրաստումը, այլ նաև FO_5E նյութերից նուրբ թաղանթների ստացման տեխնոլոգիաների ուսումնասիրումն ու տեխնոլոգիական ռեժիմների մշակումը, ստացված FO_5E թաղանթների հիմքի վրա մետաղ-Ֆերոէլեկտրիկ-մետաղ նանոթաղանթային կառուցվածքների պատրաստումը, որով և փաստվում է ատենախոսության արդիական ու հեռանկարային լինելը:

Ֆերոէլեկտրական ԳԲՅ կոնդենսատորների բնութագրերի, կոնտակտներից լիցքակիրների ինժեկտման մեխանիզմների, դրանց կորստյան հոսանքների, կորստյան անկյան տանգենսի, դիէլեկտրիկ

թափանցելիության, ունակության էլեկտրական և ջերմային ոչ գծայնության, կերամիկական և թաղանթային նյութերի ատոմական (բյուրեղական) կառուցվածքների, էլեկտրոնային սպեկտրերի, դիէլեկտրիկական և այլ հատկությունների, թաղանթային կառուցվածքներով սարքերի հոգնածության (ծերացման) մեխանիզմների ուղղությամբ վերջին տարիների ընթացքում կատարվել և կատարվում են ինտենսիվ հետազոտություններ: Սակայն դրանք գերազանցապես կրում են փորձարարական բնույթ և գիտական գրականության մեջ շատ քիչ ուսումնասիրություններ են առկա, որտեղ ներկայացված են \$երոէլեկտրական կերամիկական և, առանձնապես, նանոթաղանթային նյութերին բնորոշ բնութագրերի ազդեցությունը դրանց հիմքի վրա պատրաստված սարքերի էլքային բնութագրերի վրա: Մասնավորապես, բացակայում են \$երոէլեկտրական թաղանթներում անխուսափելիորեն առկա թթվածնային վականսիաների և \$երոնյութերի դիէլեկտրիկ թափանցելիության ոչ գծային կախվածությունների ազդեցության ուղղությամբ ուսումնասիրությունները այդ սարքերի ստատիկ և դինամիկ բնութագրերի վրա: Այս հանգամանքը հաշվի առնելով՝ ներկայացվող ատենախոսության շրջանակներում փորձ է արվել լրացնելու այդ բացը, ինչը նույնպես աշխատանքը դարձնում է արդիական և հեռանկարային:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՆՊՍԱԿՆԵՐԸ

Աշխատանքի նպատակներն են. մշակել \$երոէլեկտրիկ (\$Է) բարդօքսիդային նյութերի սինթեզման, ծավալային կերամիկաների պատրաստման, \$Է նուրբ թաղանթների ստացման տեխնոլոգիական ռեժիմներ, պատրաստել մետաղ- \$երոէլեկտրիկ-մետաղ (Մ-\$Է-Մ) նանոթաղանթային կառուցվածքներ, փորձնականորեն հետազոտել \$Է կերամիկաների և նանոթաղանթների մակերևութային, ստեխիոմետրական, էլեկտրաֆիզիկական, օպտիկական ստատիկ հատկությունները, տեսականորեն ուսումնասիրել Մ-\$Է-Մ կառուցվածքների ստատիկ և դինամիկ բնութագրերը թթվածնային վականսիաների առկայության և դիէլեկտրիկ թափանցելիության ոչ գծայնության պայմաններում, բացահայտել այդ կառուցվածքների ստացման տեխնոլոգիական լավագույն ռեժիմները և գործնական կիրառման հնարավորությունները:

ՀԵՏԱՉՈՏՄԱՆ ԱՌԱՐԿԱՆ ԵՎ ՄԵԹՈԴՆԵՐԸ

Հետազոտման առարկաները $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ փոշենյուլները, կերամիկաները, նուրբ թաղանթները, U-Sr-U , $\text{Pt-Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ - pSi-Al , $\text{Pt-Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ - SiO_2 - pSi-Al , $\text{Au-Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ - ITO-glass նանոթաղանթային կառուցվածքներն են և U-Sr-U կառուցվածքների ստադիկ, դինամիկ բնութագրերը:

Պատրաստված կերամիկական և նանոթաղանթային նմուշների դիէլեկտրիկ հատկությունները հետազոտվել են իմպեդանսաչափական մեթոդներով, BST-ի թաղանթների հաստությունները՝ պրոֆիլոմետրիայի, նմուշների մակերևույթը և բյուրեղային միկրոկառուցվածքը՝ տեսածրոդ էլեկտրոնային մանրազննման (SEM) մեթոդով, բաղադրությունը և բյուրեղային կառուցվածքը որոշվել են ռենտգենյան դիֆրակցիայի (XRD, GIXRD և TDX), ռենտգենյան միկրոֆլուորեսցենցիայի (μXRF), էներգադիսպերսիվ ռենտգենյան սպեկտրոսկոպիայի (EDS) և ռենտգենյան ֆոտոէլեկտրոնային սպեկտրոսկոպիայի (XPS) մեթոդներով:

ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՐՈՒՅԹԸ

1. Մշակվել են $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ ԲՕՏԵ նանոփոշենյուլի ցիտրատ-գել մեթոդով սինթեզման և մեծ խտությամբ ծավալային կերամիկաների ստացման տեխնոլոգիական ռեժիմները:
2. Մշակվել են տարբեր հարթակների վրա $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ հիմքով նանոթաղանթների լադերափմարվածային փոշենստեցման տեխնոլոգիական ռեժիմները:
3. Բացահայտվել է Pt-(Ba,Sr)TiO_3 - Pt նանոթաղանթային պլանար U-Sr-U կառուցվածքների ՎԱԲ-երի հիստերեզիսայնությունը:
4. Մշակվել է U-Sr-U նանոթաղանթային կառուցվածքների կորստյան/ինժեկցիոն հոսանքների և ստադիկ, դինամիկ բնութագրերի տեսական հաշվարկման մոդել, որում հաշվի է առնվում ՏԵ թաղանթի դիէլեկտրիկ թափանցելիության ոչ գծայնությունը այդ թաղանթում թթվածնի վականսիաների մեծ կոնցենտրացիայի և այդ վականսիաներով պայմանավորված թակարդային մակարդակներից էլեկտրոնների առաքման Պուլլ-Ֆրենկելյան մեխանիզմի առկայություն պարագայում:

5. Տեսականորեն և փորձնականորեն ուսումնասիրվել են էլեկտրոնային ճառագայթի ռմբակոծման ազդեցությունը Ֆեթադանթի ստատիկ բնութագրերի վրա, ինչպես նաև թթվածնային վականսիաների միգրացիայի գործընթացները և նոր մակերևութային երևույթների առաջացումը էլեկտրոնային ռմբակոծման ազդեցության պարագայում:
6. Տեսական հետազոտություններով ցույց են տրվել Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքում դինամիկ բացասական դիմադրության առաջացման մեխանիզմներն ու ռեժիմները, ԳԲՅ ազդանշանի գեներացման և ուժեղացման հնարավորությունները:

ՍՏԱՑԿԱՏ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ԿԻՐԱՊԱԿԱՆ ՆՇԱՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Մշակված տեխնոլոգիաները և BST-հիմքի վրա ստացված կերամիկաներն ու թաղանթային կառուցվածքները, շնորհիվ ընտրված էլեկտրաֆիզիկական և դիէլեկտրիկական հատկությունների, կարող են կիրառվել ԳԲՅ էլեկտրոնիկայում՝ որպես պասիվ տարրեր և ակուստիկական ռեզոնատորներ, ֆերոփակնով ՄՕԿ հիմքով էներգոանկախ հիշող բջիջներ, կենսաբժշկական և քիմիական սենսորներ, մեմրիստորային հիշասարքերի հիշող բջիջներ, ինչպես նաև որպես ԳԲՅ ազդանշանների գեներացիայի և ուժեղացման ակտիվ տարրեր, դրանով իսկ ոչ միայն ինտեգրվել ժամանակակից սիլիցիոնային տեխնոլոգիաներին, այլև հիմք հանդիսանալ ապագա ֆերոիստեգրալային միկրոսխեմաների ու տեխնոլոգիաների համար, որտեղ և՛ պասիվ, և՛ ակտիվ տարրերը պատրաստված կլինեն միայն ֆերոնյութերից:

Չետազոտման մեթոդիկան և արդյունքները ներկայումս արդեն իսկ օգտագործվում են ՀԱՊՀ-ի «Միկրոէլեկտրոնիկա և կենսաբժշկական սարքեր» ամբիոնին կից գործող «Միկրո- և նանոէլեկտրոնիկա» գիտահետազոտական և արբորատորիայում իրականացվող գիտական հետազոտություններում և ՀԱՊՀ-ի համապատասխան մասնագիտությունների գիտաուսումնական գործընթացում:

ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ ՆԵՐԿԱՅԱՑՎՈՂ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԴՐՈՒՅԹՆԵՐԸ

1. Ցիտրաւ-գել մեթոդով $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ փոշեւոյնի սինթէզի և ծավալային կերամիկաների պատրաստման տեխնոլոգիական ռեժիմները:
2. ԼԻՓ մեթոդով $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ հիմքով նանոթաղանթային կառուցվածքների ստացման տեխնոլոգիաները:
3. Մ-ՏԷ-Մ կառուցվածքների համար Պուլսոնի և հոսանքի խտւթյան հավասարումների համատեղ անալիտիկ լուծման մեթոդիկան ՏԷ թաղանթում թթվածնի վականսիաների առկայության և դիէլեկտրիկ թափանցելիության ոչ գծայնության պայմաններում:
4. Մ-ՏԷ-Մ կառուցվածքների ՎԱԲ-ի անալիտիկ արտահայտությունը նախորդ կետում բերված գործոնների հաշվի առմամբ մեծ էլեկտրական դաշտերի, մետաղական կոնտակտից շատ թույլ ինժեկցիայի դեպքում, տեսական հաշվումների և փորձնական տվյալների մեծ ճշտությամբ համընկնմամբ,
5. Մ-ՏԷ-Մ կառուցվածքի տարաբնույթ բնութագրերի վրա ՏԷ թաղանթի էլեկտրոնային մբակոծման ազդեցության արդյունքները,
6. Մ-ՏԷ-Մ կառուցվածքներում դինամիկ բացասական դիմադրության առաջացման պայմանների և ԳԲՅ ազդանշանի գեներացման (ուժեղացման) ռեժիմների հաստատման հաշվարկման մեթոդիկան:

ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ՆԵՐԿԱՅԱՑՈՒՄԸ ԵՎ ՅՐԱՏԱՐԱԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Աշխատանքի հիմնական արդյունքները ներկայացվել են հետևյալ միջազգային և հայաստանյան գիտաժողովներում և սեմինարներում.

1. “20th International Conference on Solid Compounds of Transition Elements” SCTE-2016 (11-15 ապրիլ, 2016, Սարագոսա, Իսպանիա),
2. “International OSA Network of Students” IONS-2015 (24-26 սեպտեմբեր, 2015, Վալենսիա, Իսպանիա),
3. Laser Physics 2015 International Conference (6-9 հոկտեմբեր, 2015, Աշտարակ, Ղազախստան),
4. Laser Physics 2013 International Conference (8-9 հոկտեմբեր, 2013, Աշտարակ, Ղազախստան),
5. ՀԱԿՅ Տարեկան գիտաժողովներ (2011, 2012, 2014, Երևան, Ղազախստան),
6. “BCMaterials” գիտահետազոտական կենտրոնի սեմինարներ (2015, Դերիոն, Բիսկաիայի տեխնոպարկ, Իսպանիա),

7. ՀԱՊՅ Միկրոէլեկտրոնիկայի և կենսաբժշկական սարքերի ամբիոնի գիտական սեմինարներ (2013-2016, Երևան, Հայաստան):

Ատենախոսության արդյունքները հրատարակվել են 12 գիտական աշխատանքներում, որոնք բերված են «Օգտագործված գրականության ցանկ»-ի հետևյալ հղումներով՝ [11], [70], [74-76], [87-89], [96-98], [104]:

Գ Լ ՈՒ Խ 1

ՖԵՐՈՒԷԼԵԿՏՐՈՒԿՆԵՐ.

ՍՍՏՅՈՒՄԸ, ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ԿԻՐԱՊՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

(ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԼՈՒՄԻ ԹՅՈՒԹՅՈՒՆ)

§ 1.1. Ֆեռոէլեկտրիկներ. կառուցվածքը, առանձնահատկություններն ու կիրառությունները

Գիտական շրջանակների և միկրոէլեկտրոնային արդյունաբերության համար վերջին շրջանում մշտապես կարևորվել է ֆեռոէլեկտրիկ նյութերի նուրբ թաղանթների կիրառությունը: Այդ կարևորությունը հատկապես կապված է ֆեռոէլեկտրիկների այնպիսի կիրառությունների հետ, ինչպիսիք են ինտեգրալ սխեմաների տեխնոլոգիայում լայնորեն օգտագործվող մետաղ-ֆեռոէլեկտրիկ-կիսահաղորդիչ դաշտային տրանզիստորները (MFSFET) [1–4], բարձր ծրարման խտությամբ դինամիկ օպերացիոն հիշողությունները (DRAM), էներգոանկախ ֆեռոէլեկտրական օպերացիոն հիշողությունները (FeRAM) [5–7], վերջին մի քանի տարիներին հսկայական ուշադրության արժանացած, մեմրիստիվ երևույթի (memristive phenomena) հիման վրա աշխատող մեմրիստորային էներգոանկախ հիշող տարրերը (ReRAM) [8–10], պինդմարմնային վառելիքային մարտկոցները (SOFC), ամենատարբեր տվիչային (սենսորային) միկրոսարքերը [11] և այլն:

Այժմ, երբ արդեն պարզ է ֆեռոէլեկտրիկ նյութերի կիրառական մեծ նշանակությունը, առավել հանգամանալից անդրադառնանք դրանց առանձնահատկություններին: Նախ պարզենք, թե ինչ նյութեր են ֆեռոէլեկտրիկները, որ դասին են պատկանում և ինչ առանձնահատկություններով են օժտված:

Ընդհանրապես, նյութի համար «մեկուսիչ» բնորոշումն օգտագործվում է ցույց տալու համար էլեկտրական հոսանքի

անանցանելի ու թյուր ունը դրա միջոցով, մինչդեռ «դիելեկտրիկ» եզրույթն օգտագործվում է տվյալ նյութի՝ էներգիա կուտակելու ունակությունը (բևեռացման շնորհիվ) մատնանշելու համար: Դիելեկտրիկ (ԴԷ) համարվում են այն նյութերը, որոնցում էլեկտրոնները կապված են չափազանց ամուրկերպով: Էլեկտրական լիցքերը ԴԷ-ներում արձագանքում են կիրառված էլեկտրական դաշտին դիելեկտրիկ բևեռականության փոփոխությամբ, երբ էլեկտրոնները, ձգտելով մոտենալ անոդին, տեղաշարժվում են այդ ուղղությամբ, իսկ միջուկները՝ հակառակ, այսպիսով ձևավորելով դիպոլներ, որոնք, դասավորվելով զուգահեռ շարքերով, առաջացնում են ԴԷ-ի ներքին դաշտը: Այս նյութերը գրեթե մեկուսիչներ են, որոնցում էներգիական արգելման գոտին մեծ է և էլեկտրահաղորդականությունը՝ չափազանց փոքր: Ընդհանուր առմամբ, մեկուսիչների արգելման գոտու լայնությունը մեծ է, քան 3 ԷՎ-ը կամ 5 ԷՎ-ը: Չնայած, որ ոչ բոլոր ԴԷ-ն են մեկուսիչներ, բայց բոլոր մեկուսիչներն ընդգծված ԴԷ-ներ են (ինչպես արդեն վերևում նշվեց՝ մեկուսիչ եզրույթը կապվում է ցածր էլեկտրահաղորդականության հետ, իսկ ԴԷ եզրույթը՝ բևեռացման մեծ ունակությամբ):

Ակտիվ դիելեկտրիկ նյութերի (ԱԴԷ) միջոցով հնարավոր է կատարել էներգիայի և ինֆորմացիայի ամփոջական փոխակերպում: ԱԴԷ-երի հատկությունները հնարավոր է կառավարել տարաբնույթ արտաքին ազդեցություններով՝ էլեկտրական ու մագնիսական դաշտերի միջոցով, ջերմաստիճանի փոփոխությամբ, լուսային ճառագայթմամբ, մեխանիկական լարման կիրառմամբ և այլն: ԱԴԷ-ները հիմնականում օգտագործվում են էլեկտրական ազդանշանների գեներացման և մի շարք կերպափոխումներ իրականացնելու նպատակներով [12]:

ԱԴԷ-ների օրինակներ են ֆերոէլեկտրիկները (սեգնետո-էլեկտրիկները), պիեզոէլեկտրիկները, պիրոէլեկտրիկները, ֆերոէլեկտրամագնիսները և այլն: Այս նյութերը լայնորեն կիրառվում են էլեկտրոնային ակտիվ և պասիվ տարրեր պատրաստելու համար: ԱԴԷ նյութերում կարևորվում են տարբեր մեծությունների միջև կապերի ոչ գծային բնույթը, օրինակ, բևեռացում-էլեկտրական դաշտի լարվածություն (P-E), մագնիսացում-մագնիսական դաշտի լարվածություն (B-H), արտաքին ազդեցությունների բացակայության դեպքում որոշակի

պայմաններում դիտվող ինքնակամ (սպոնտան) երևույթները, օրինակ, ինքնակամ բևեռացումը \$երոելեկտրիկների (սեգնետոելեկտրիկների) պարագայում: Էլեկտրական, ջերմային, մեխանիկական և օպտիկական խաչվող երևույթները առավել ցայտուն արտահայտված են \$երոելեկտրիկներում (սեգնետոելեկտրիկներում) [13–15]:

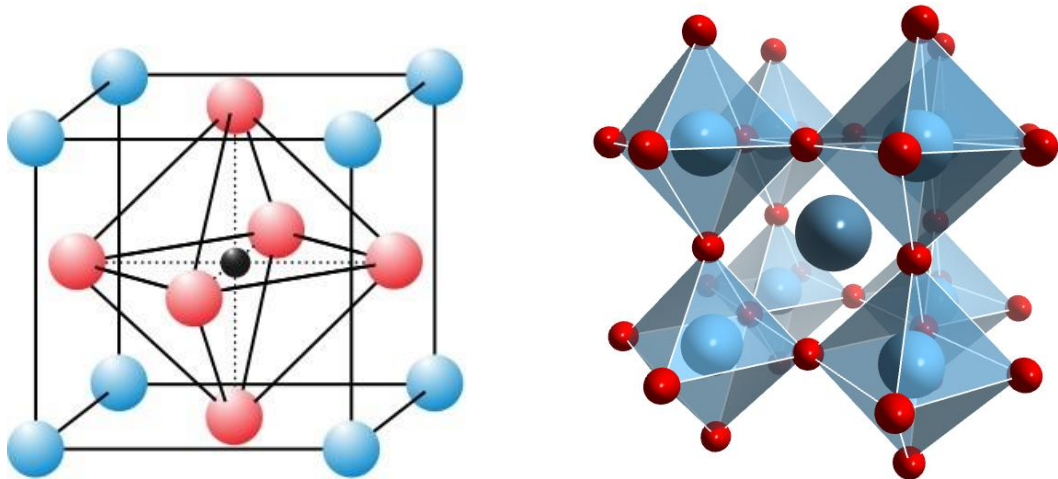
Եթե ինքնակամ բևեռացման ուղղությունը հնարավոր է փոփոխել արտաքին էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ, ապա այդպիսի նյութը \$երոելեկտրիկ (սեգնետոելեկտրիկ) է: Վերջիններում լիցքերն առանձնացած ու կողմնորոշված են առանց արտաքին դաշտի ազդեցության, այս է պատճառը, որ \$երոելեկտրիկների բևեռացումը կոչվում է ինքնակամ (սպոնտան) [15]: Քանի որ այս նյութերը բաղկացած են իրար հակառակ ուղղված բևեռականությամբ տեղամասերից, արտաքին դաշտի բացակայության պարագայում նյութում ընդհանուր բևեռականությունն իդելական դեպքում բացակայում է: Մինչև իսկ թույլ արտաքին դաշտ կիրառելու դեպքում տեղի է ունենում դիպոլների վերակողմնորոշում, և ողջ բյուրեղում առաջանում է հզոր էլեկտրական մոմենտ: Ինքնակամ բևեռականությամբ օժտված ԴԷ-ի այս վարքը կարելի է նմանեցնել մագնիսական դաշտում երկաթի վարքագծին:

Այսպիսով, կարող ենք սահմանել, որ \$երոելեկտրիկներ (սեգնետոելեկտրիկներ) են կոչվում այն ակտիվ դիելեկտրիկները, որոնցում ջերմաստիճանային որոշակի միջակայքում առկա է ինքնակամ բևեռացում, որի ուղղությունը կարելի է փոփոխել՝ արտաքին էլեկտրական դաշտ կիրառելով: \$երոելեկտրականության երևույթն առաջին անգամ նկատվել է 1921 թվին սեգնետային աղը հետազոտելիս: Վերջինիս անունով էլ այդ դասի ակտիվ դիելեկտրիկներն ի սկզբանե կոչվել են սեգնետոելեկտրիկներ [15, 16]: Իզոպրոպիլալի ի հետազոտական խմբով 1930-ականների սկզբին խորությամբ ուսումնասիրել է սեգնետային աղի հատկությունները: Յատկանշական է նրա դեռևս 1933 թվականին իր «Սեգնետոելեկտրիկներ» մենագրության վերջաբանում ձևակերպած այն կանխատեսումը, համաձայն որի կասկածի ենթակա չէ այն, որ սեգնետային աղից բացի ապագայում հայտնաբերվելու են նոր սեգնետոելեկտրիկներ [17]: Եվ իրոք, ընդամենը տասնմեկ տարի անց՝ 1944 թվականին, Վոլլը և Գոլդմանը հայտնագործում են բարիումի տիտանատը ($BaTiO_3$) [18], որն աստիճանաբար լայն կիրառություն է

ստանում էլ եկտրոնիկայում, նաև հիմք է տալիս բարդ օքսիդային սեգնետոէլեկտրիկ նյութերի հետազոտման և դրանց տեսակների ընդլայնման համար: Ժամանակին սեգնետոէլեկտրիկների հայտնաբերումն իրավացիորեն համարվել է դիէլեկտրիկների մասին գիտության ամենանշանակալի ձեռքբերումը 19:

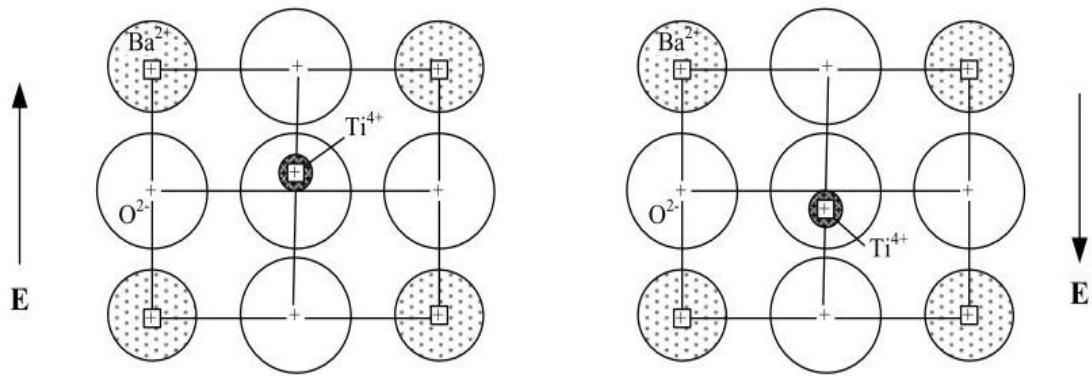
Վերջին տասնամյակներում միջազգային գիտական շրջանակներում ի սկզբանե սեգնետոէլեկտրիկ կոչված նյութերի առավել կիրառական անվանումը «Ֆերոէլեկտրիկ» եզրույթն է: Այս վերջին անվանումը կապված է ֆերոէլեկտրիկների էլեկտրական հատկությունների և ֆերոմագնիսների մագնիսական հատկությունների միջև առկա նմանության հետ [20]: Այնպես որ, հետագա շարադրանքում կօգտագործենք սեգնետոէլեկտրիկների՝ ներկայումս առավել ընդունված ֆերոէլեկտրիկ (ՖԷ) անվանումը:

Եվ այսպես, սկսած 1944 թվականից՝ մեծ թվով տեսական և փորձարարական աշխատանքներ են կատարվել ՖԷ-ների հետազոտման ուղղությամբ: Ներկայումս ՖԷ-ների թիվը հաշվվում է հարյուրներով, մեծ թափով շարունակվում են նոր ՖԷ-ների ստացման և հատկությունների լավացման, կիրառության հնարավորությունների բացահայտման ուղղությամբ տարվող հետազոտական աշխատանքները [15, 21–24]:



Նկ. 1.1.1. Պերովսկիտ տիպի տարրական բջջի ծավալային սխեմատիկ տեսքերը

Պերովսկիտ տիպի (Նկ. 1.1.1) բարդ օքսիդներից էլեկտրոնիկայում առավել կիրառվողները հետևյալներն են՝ BaTiO_3 , SrTiO_3 , BST, PbTiO_3 , PZT և այլն:



Նկ. 1.1.2. BaTiO₃-ը ֆերոէլեկտրիկ փուլում, երբ այն ունի քառակողմ (տետրագոնալ) բյուրեղ

Հիշատարբերում նախընտրելի է օգտագործել ֆերոէլեկտրիկ փուլում գտնվող ՏԷ նյութերը (նկ. 1.1.2), քանի որ այդ դեպքում ինֆորմացիան պահվում է դրանց բևեռացման հաշվին, իսկ բարձրիճափականային էլեկտրոնիկայում մեծամասամբ կիրառվում է ՏԷ-ների պարաէլեկտրիկ փուլը, որպեսզի հնարավոր լինի առավելագույնս խուսափել հիստերեզիսային կորուստներից:

§ 1.2. ՏԷ նանոթաղանթային կառուցվածքների ստացման տեխնոլոգիաներ

Պահանջվող ստեխիոմետրիայով և բյուրեղական կառուցվածքով բարդօքսիդային նյութերի նուրբ թաղանթներ ստանալու խնդիրը լուծելիս հանդիպում ենք որոշակի բարդությունների: Համեմատաբար բարդ խնդիր է միաբյուրեղ (էպիտաքսային) բարդօքսիդային թաղանթների նստեցումը: Որպեսզի նստեցվող թաղանթը լինի էպիտաքսային, անհրաժեշտ է, որ հարթակն ու թաղանթն ունենան նույնական բյուրեղացանցի հաստատուններ, ինչպես նաև ջերմաստիճանային ընդարձակման գործակիցներ, հակառակ դեպքում, բացի այն, որ նստեցված թաղանթը չի լինի էպիտաքսային, այլ նաև հարթակ-թաղանթ տեղամասում կարող են առաջ գալ զգալի և արվածություններ, որոնք չեն կարող չազդել նստեցված միկրոկառուցվածքի էլեկտրաֆիզիկական բնութագրերի վրա: Բազմաթիվ հետազոտություններում ներկայացված են հարթակի և նստեցվող թաղանթի բյուրեղացանցի հաստատունների զգալի չափով տարբեր լինելու արդյունքում առաջ եկած

լարված ությունների ազդեցությունը թաղանթների բնութագրերի վրա [15, 25]:

ՏԷ-ների վրա հիմնված համալարելի FBAR-ների, ՏԷ վարակտորների և այլ ՏԷ նյութերի հիմքով կառուցվածքների պատրաստման գործընթացները նույնանման են, այն տարբերություններ, որ FBAR-ների պատրաստման մեջ օգտագործվում են այնպիսի լրացուցիչ գործընթացներ, ինչպիսիք են Bragg ռեֆլեկտորների և թաղանթների ստացումը ծավալային և մակերևութային միկրոմշակմամբ:

Ի տարբերություն AIN FBAR-ների, համալարելի FBAR-ներում օգտագործվող ֆերոէլեկտրական թաղանթները նստեցվում են թթվածնային միջավայրում՝ առավել բարձր ջերմաստիճաններում (500-700°C), որն էլ խիստ պահանջներ է առաջադրում Bragg ռեֆլեկտորների և ստորին էլեկտրոդների համար օգտագործվող նյութերի ընտրությանը: Առաջին հերթին այդ նյութերը պետք է լինեն օքսիդակայուն և ունենան այնպիսի ընդարձակ ման գործակիցներ, որոնք թույլ կտան համակշռել լարված ությունները FBAR կառուցվածքներում: Ռեֆլեկտորների և ներքևի էլեկտրոդների համար նյութեր ընտրելիս պետք է հաշվի առնվեն նաև մակերևութային քիմիական ռեակցիաները և փոխադարձ դիֆուզիան [26]:

Նուրբ թաղանթների ստացման տեխնոլոգիական մեթոդները լինում են՝

- ֆիզիկական,
- քիմիական:

ՓՕՏԷ թաղանթների ստացման համար վերոնշյալ երկու դասին պատկանող տեխնոլոգիական մեթոդներից հիմնականում կիրառվում են բարձր հաճախականային մագնետրոնային փոշենստեցումը, լազերափմպուլսային փոշենստեցումը, մոլեկուլափնջային էպիտաքսիան (MBE), իոնաճառագայթային փոշենստեցումը, սոլ-գել գործընթացը, մետաղօրգանական քիմիական գոլորշենստեցումը (MOCVD) և այլն [27]:

Կարևորագույն չափորոշիչներից հիմնականները, որոնք պետք է հաշվի առնվեն փոշենստեցման եղանակն ընտրելիս, հետևյալներն

են՝ թաղանթի ստեխիոմետրիան, կառուցվածքը, հաստությունը, բաղադրության համասեռությունը, վերարտադրելիությունը, համատեղելիությունը կիսահաղորդչային տեխնոլոգիաների հետ: Մազնետրոնային և իոնաճառագայթային փոշենստեցումները, LԻՓ-ի հետ համեմատած, մեծ մակերեսով հարթակների պարագայում ապահովում են առավել խիտ և բարձր համասեռությամբ թաղանթներ [28]: Սակայն մազնետրոնային փոշենստեցման դեպքում դժվար է պահպանել նստեցվող թաղանթի ստեխիոմետրիան: Այս խնդիրն ավելի թույլ է արտահայտված իոնաճառագայթային փոշենստեցման դեպքում, իսկ LԻՓ-ի պարագայում այն ամենաչնչինն է [29, 30]:

Նուրբ թաղանթների նստեցման ֆիզիկական մեթոդները լինում են անընդհատ և իմպուլսային: Այս երկուսը, ըստ էության, իրարից խիստ տարբեր են: Այստեղ կարճ անդրադարձ կատարենք իմպուլսային մեթոդին: Թաղանթների ֆիզիկական նստեցման իմպուլսային մեթոդ է, օրինակ, լազերաիմպուլսային փոշենստեցումը՝ LԻՓ (Pulsed Laser Deposition (PLD)), որը շնորհիվ իր ունիվերսալության հատկապես լայն կիրառություններ է գտել գիտական-լաբորատոր հետազոտություններում [31, 32]:

Տարիներ շարունակ LԻՓ-ի եղանակով ֆերոէլեկտրիկ նուրբ թաղանթների ստացման ուղղությամբ իրականացվել են մեծաքանակ հետազոտություններ, որոնք վկայում են այս եղանակով բարդօքսիդային ֆերոէլեկտրիկ թաղանթների ստացման արդյունավետության մասին:

Աղյուսակ 1.2.1-ում ներկայացված է բարդօքսիդային նյութերի բարակ թաղանթների նստեցման համար կիրառվող հիմնական տեխնոլոգիական եղանակների համեմատական անալիզը [15, 27]:

Աղյուսակ 1.2.1. Նուրբ թաղանթների ստացման եղանակների բնութագրերը

ՆՍՏԵՑՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿԸ	ԱՌԱՎԵԼՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ	ԹԵՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ
---------------------	------------------	---------------

<p>Մետաղ- օրգանական քիմիական գոլորշե- նստեցում (MOCVD)</p>	<p>լավ ծածկողականություն, ցածր ջերմաստիճանային պրոցես</p>	<p>համասեռության ցածր աստիճան, թույլ վերարտադրելիություն, նստեցման դանդաղ տեմպ, մնացորդային կեղտոտվածություն, թուխավոր նյութեր</p>
<p>Սոլ-գել (Sol-gel)</p>	<p>մթնոլորտային միջավայր, մեծ մակերեսի վրա համասեռություն, բաղադրության կառավարման հեշտություն</p>	<p>թույլ վերարտադրելիություն, բարձր ջերմաստիճանային պրոցես, մնացորդային կեղտոտվածություն, թուխավոր նյութեր</p>
<p>ԲՅ մագնետ- րոնային (RF sputtering)</p>	<p>կրկնելիություն բարձր աստիճան, մեծ մակերեսի վրա համասեռություն, մնացորդային կեղտոտվածության գրեթե բացակայություն</p>	<p>մեծ չափեր ունեցող թիրախ նստեցման դանդաղ տեմպ</p>
<p>Լազերա- իմպուլսային փոշենստեցում (LԻՓ)</p>	<p>փոքր չափեր ունեցող թիրախ, նստեցման արագ տեմպ, պրոցեսի պարզություն, թիրախի ստեխիոմետրիայի լավ վերարտադրելիություն, մնացորդային կեղտոտվածության գրեթե բացակայություն</p>	<p>փոքր մակերեսով ծածկում, ըստ հաստության համասեռության ցածր աստիճան</p>

§ 1.3. Հաղորդականության մեխանիզմները Ֆերոէլ եկտրիկ թաղանթներում

Իդեալ ական ԴԷ-ներում 0 Կելվին ջերմաստիճանում վալենտական գոտին ամբողջությամբ զբաղեցված է, իսկ հաղորդականության գոտին՝ ամբողջությամբ դատարկ, այսինքն՝ Էլեկտրահաղորդականության համար ազատ իցթակիրներ չկան: Երբ ջերմաստիճանը 0 Կ-ից բարձր է, որոշ Էլեկտրոններ ջերմային առաքման մեխանիզմով ազատվում են վալենտային գոտուց, ինչպես նաև դոնորային խառնուրդային մակարդակներից, և տեղափոխվում հաղորդականության գոտի: Այդ ազատ Էլեկտրոններն արդեն կկարողանան մասնակցել ԴԷ-ում հոսանքի տեղափոխմանը: Նույն կերպ խոռոչները կգեներացվեն ակցեպտորային խառնուրդային մակարդակներից՝ վալենտական գոտում և դրա հարակից հատվածում առաջացնելով ազատ էներգետիկ մակարդակներ [33, 34]:

Կիրառված նորմալ Էլեկտրական դաշտի դեպքում ԴԷ-ում հոսանքը կլինի չափազանց փոքր, որովհետև դրանց հաղորդականությունը չափազանց փոքր է՝ $10^{-20} \sim 10^{-8} \Omega^{-1} \text{սմ}^{-1}$ կարգի: Դեթաղանթով անցնող հաղորդականության հոսանքը նկատելի է դառնում, երբ համեմատաբար մեծ Էլեկտրական դաշտեր են կիրառվում: Այդ հոսանքները պայմանավորված են տարատեսակ հաղորդականության մեխանիզմներով, որոնք էական նշանակություն ունեն դիէլեկտրիկ թաղանթների կիրառության տեսակետից, հետևապես այդ մեխանիզմների ուսումնասիրությունը չափազանց կարևոր է թե՛ գիտական տեսակետից և թե՛ ինտեգրալ միկրոսխեմաների (ԻՄՍ-ներ) արտադրության համար [33, 35]:

Որպես ակտիվ ԴԷ նյութեր՝ ՖԷ-ները, չնայած որ ունեն որոշ առանձնահատկություններ, բայց և ենթարկվում են ԴԷ-ներին բնորոշ հաղորդականության սկզբունքներին (մեխանիզմներին): Ստորև փոքր ինչ հանգամանալից անդրադառնանք վերջիններիս [36]:

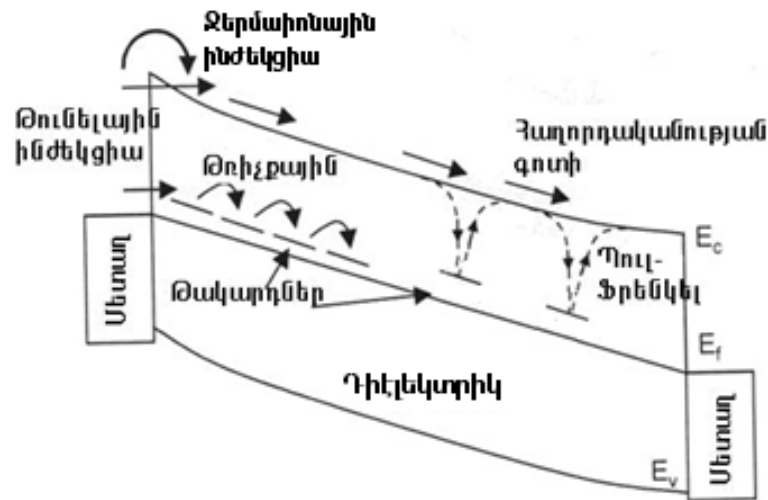
Դասականորեն ընդունված է ԴԷ թաղանթներում հնարավոր հաղորդականության մեխանիզմները բաժանել երկու մեծ դասերի միջև [33, 34, 37, 38]:

Դե թաղանթներում հաղորդականության մեխանիզմների դասակարգումը բերված է Աղյուսակ 1.3.1-ում և Նկ.1.3.1-ում:

Աղյուսակ 1.3.1.

ԴԵ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐՈՒ Մ ՅԱՂՈՐԴԱԿԱՆՈՒ ԹՅԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ԴԱՍԱԿԱՐԳՈՒՄԸ	
1. ՄԱԿԵՐԵՎՈՒ ՅԹՈՎ (ԷԼ ԵԿՏՐՈՂՈՎ) ՍԱՐՄԱՆԱՓԱԿԱՎՃ (Interface limited)	2. ԾԱՎԱԼ ՈՎ ՍԱՐՄԱՆԱՓԱԿԱՎՃ (bulk limited)
1.1. ուղիղ թուլ նեյային անցում ¹	2.1. Օհմական հաղորդականություն
1.2. ջերմափոխային-դաշտային առաքում Էլեկտրոդի մակերևույթից ջերմափոխային առաքում՝ Շոտկիի առաքում՝ ՇԱ (Schottky emission, SE)	2.2. ծավալային լիցքով սահմանափակված հոսանք՝ ԾԼՍՀ (space charge limited current, SCLC)
1.3. ջերմափոխային-դաշտային առաքում	2.3. Պուլ-Ֆրենկելի առաքում՝ ՊՖԱ (Pool-Frenkel emission, PFE)
1.4. Էլեկտրական դաշտով պայմանավորված թուլ նեյավորում՝ Ֆոուլեր-Նորդհեյմի թուլ նեյավորում՝ ՖՆԹ (Fowler-Nordheim tunneling, FNT)	2.4. թռիչքային հաղորդականություն
	2.5. փոխային հաղորդականություն
	2.6. բյուրեղների սահմանագծերով սահմանափակված հաղորդականություն

¹ Հաղորդականության այս մեխանիզմը հիմնականում գործում է նուրբ թաղանթային կառուցվածքների դեպքում [39]:



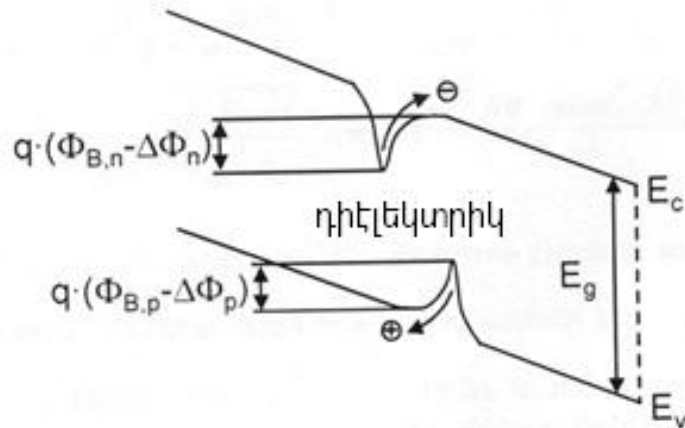
Նկ.1.3.1. Լիցքակիրների տեղափոխման (հաղորդականության) մեխանիզմները ԴԷ-ներում

Ստորև համառոտ կերպով ներկայացնենք ԴԷ-ներում հաղորդականության ամենակարևոր երկու մեխանիզմները [40, 41]:

Պուլ-Ֆրենկելի առաքման (եմիսսիայի) մեխանիզմը հնարավորություն է տալիս նկարագրել կորստյան հոսանքները մեծաքանակ դեֆեկտներով (արատներ) դիելեկտրիկներում, ինչպիսիք են օրինակ պերովսկիտ բյուրեղային կառուցվածք ունեցողները, որոնցում ամենատարածված արատները թթվածնի վականսիաներն են: Պուլ-Ֆրենկելի առաքմամբ, մասնավորապես, խորությամբ բացատրվում է մեծ լարվածություն ունեցող էլեկտրական դաշտի ազդեցության տակ դիելեկտրիկների, ինչպես նաև ՖԷ-ների հաղորդականության աճի երևույթը (նկ.1.3.2):

ՊՖԱ-ը հիմնականում նկատվում է ԴԷ-ներում, ՖԷ-ներում, ինչպես նաև այնպիսի կիսահաղորդիչ նյութերում, որոնց լիցքակիրների շարժունությունը փոքր է: Արատներով պայմանավորված թակարդային մակարդակները (Պուլ-Ֆրենկելյան մակարդակներ) կարող են տեղակայված լինել թե՛ վալենտային և թե՛ հաղորդականության գոտիների հարևանությամբ՝ դրանցից $\sim 0,06 \dots 0,4$ ԷՎ հեռավորության վրա: Օրինակ՝ մետաղական կոնտակտից ԴԷ նյութի մեջ թափանցած և ԴԷ-ի դեֆեկտային (թակարդային) մակարդակի կողմից գրավված էլեկտրոնը բավարար է ներգիտ ձեռք բերելու դեպքում (կիրառված էլեկտրական դաշտից, լուսային կամ էլեկտրոնային ճառագայթումից և այլն) կարող է անցնել հաղորդական գոտի՝ դառնալով ազատ էլեկտրոն, մինչև այն պահը, երբ կգրավվի մեկ այլ թակարդի կողմից: Մի թակարդային

մակարդակից դեպի մյուսը կատարվող այս թռիչքները կարող են կորստյան հոսանքներ առաջացնել մինչև իսկ ընդամենը մի քանի տասնյակ նանոմետր հաստությամբ ԴԵ թաղանթներում:



Նկ.1.3.2. ԴԵ-ի էներգետիկ-գոտիական դիագրամը, երբ ԴԵ-ի վրակիրառված է էլեկտրական դաշտ

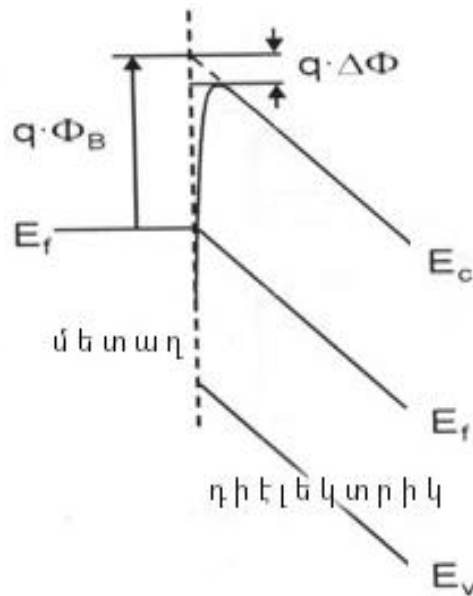
(1.3.1) հավասարումը ներկայացնում է հոսանքի խտության կախվածությունը պոտենցիալ արգելքի բարձրությունից, կիրառված դաշտից և ջերմաստիճանից (երբ թաղանթում իրար ընդհուպ հարևանությամբ խիստ մեծ թվով արատներ են գտնվում, լիցքակրի՝ մի արատից մյուսին անցնելու թռիչքային մեխանիզմը (նկ.1.3.1) չի նկարագրվում այս հավասարմամբ)։

$$J_{PF} = \sigma_{PF} E e^{\frac{-q(\Phi_B - \Delta\Phi)}{kT}}, \quad (1.3.1)$$

ուր $\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{\pi\epsilon_{opt}\epsilon_0}}$, Φ_B -ն պոտենցիալ արգելքի բարձրությունն է,

$\Delta\Phi$ -ն՝ նվազած պոտենցիալ արգելքը, E -ն՝ կիրառված էլեկտրական դաշտի լարվածությունը, ϵ_{opt} -ն՝ այն մակերևույթի օպտիկական դիէլեկտրիկ հաստատունը, ուր կատարվում է ինժեկցիան, $T=300$ Կ:

Չաղորդիչ կոնտակտից դեպի ԴԵ լիցքակիրների ինժեկտում կարող է տեղի ունենալ այն դեպքում, երբ այդ լիցքակիրները ձեռք կբերեն այնքան էներգիա, որը բավարար կլինի պոտենցիալ արգելքի բարձրության հաղթահարման համար: Շոտկիի առաքման մեխանիզմի համաձայն Φ_B էներգիական արգելքը նվազում է $\Delta\Phi$ -ով մետաղ-ԴԵ հպման մակերևույթի վրա հայելային ուժերի առկայության հետևանքով (նկ 1.3.3):



Նկ.1.3.3. Մետաղ-Դեկոնտակտի այս էներգետիկ-գոտիական գծապատկերը ներկայացնում է ճոտկի առաքման մեխանիզմի արդյունքում արգելման գոտու բարձրության փոքրացումը

(1.3.2) բանաձևը ներկայացնում է ճոտկի առաքման մեխանիզմի առկայության դեպքում հոսանքի խտության ձևը.

$$J_S = A^* T^2 e^{\frac{-q(\Phi_B - \Delta\Phi)}{kT}}, \quad (1.3.2)$$

որտեղ $\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{\pi\epsilon_{op}\epsilon_0}}$, $A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$, A^* -ն Ռիչարդսոնի արդյունարար

հաստատունն է, h -ը՝ Պլանկի հաստատունը, m^* -ը՝ էլեկտրոնի արդյունարար զանգվածը:

Հոսանքի խտության ներքին (1.3.1) և (1.3.2) բանաձևերի նմանությունն ակնհայտ է, միայն թե պետք է նկատել, որ J_{PF} -ն ուղիղ համեմատական կախվածության մեջ է E -ից, իսկ J_S -ը՝ T^2 -ով:

§ 1.4. ԵՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ ԵՎ ԽՆԴԻ ԴՐՎԱԾԸ

Ժամանակակից տեղեկատվական համակարգերի խիստ պահանջները բավարարելու համար անհրաժեշտություն է առաջանում մշակելու և ստանալու բարելավված հատկություններով նոր նյութերու կառուցվածքներ: Բարոօքսիդային ֆերոէլեկտրիկ նյութերը և դրանց վրա հիմնված նանոթաղանթային կառուցվածքները վերջին տարիներին չափազանց լայնորեն կիրառվում են գիտության ու արտադրության գրեթե բոլոր բնագավառներում: Դրանք կիրառվում են այնպիսի միկրոէլեկտրոնային տարրերում, ինչպիսիք են

Էներգոանկախ ֆերոէլեկտրական օպերացիոն հիշողությունները (FeRAM), բարձր ծրարման խտությամբ դինամիկ օպերացիոն հիշողությունները (DRAM), մետաղ-ֆերոէլեկտրիկ-կիսահաղորդիչ դաշտային տրանզիստորները (MFSFET), մեմրիստորային էներգոանկախ հիշող տարրերը (ReRAM), պինդմարմնային վառելիքային մարտկոցները (SOFC), ամենատարբեր տվիչային (սենսորային) միկրոսարքերը, վարակտորները և այլն: Հաշվի առնելով այս աստիճանի հետաքրքրությունը՝ չափազանց արդիական է բարդօքսիդային ֆերոէլեկտրիկ նյութերի սինթեզման տարբեր մոտեցումների ուսումնասիրությունը, տարբեր բաղադրությամբ կերամիկաների պատրաստումը, այդ նյութերից նուրբ թաղանթային տարբեր կառուցվածքների նախագծումն ու պատրաստումը, ինչպես նաև դրանցում ընթացող էլեկտրաֆիզիկական ստատիկ ու դինամիկ երևույթների տեսական մոդելավորումը, կառուցվածքների բնութագրերի համակողմանի փորձնական հետազոտությունները:

Թվարկված բոլոր գործընթացները, որքան էլ որ իրականացման բարձր մակարդակի վրա գտնվեն, բայց նայնպես, ունեն որոշակի բացեր, որոնց հետևանքով նորացման և կատարելագործման անհրաժեշտություն են զգում: Բարդօքսիդային ֆերոէլեկտրիկ նյութերի սինթեզման ասպարեզում անհրաժեշտություն կա ընտրել առավել մառչելի և արդյունավետ եղանակներ, իսկ թաղանթների ստացման տեխնոլոգիաներում միշտ պահանջված է տեխնոլոգիական բարելավված, առավել նպատակահարմար ռեժիմների մշակումը: Իսկ, օրինակ, ֆերոէլեկտրական նանոթաղանթային սարքերում ընթացող էլեկտրաֆիզիկական երևույթների բացահայտման ու տեսական մոդելավորման, փորձարարական արդյունքների վերծանման ու մեկնաբանման տեսանկյունից անպայմանորեն հարկավոր է հաշվի առնել ոչ միայն հաղորդականության տարաբնույթ մեխանիզմները մետաղ-ֆերոէլեկտրիկ սահմանում և ֆերոէլեկտրիկների ծավալում, այլև ֆերոէլեկտրիկ նյութերում անխուսափելիորեն առկա տարբեր բյուրեղական արատների, մասնավորապես՝ ամենահաճախ հանդիպող թթվածնի վականսիաների առկայությունը, դրանց հետևանքով էներգիական գոտիական կառուցվածքի և էլեկտրոնային սպեկտրի փոփոխությունները, ֆերոէլեկտրիկ նյութերի դիէլեկտրիկ թափանցելիության ոչ գծայնությունը և այլն:

Այս բուկորը հաշվի առնելով՝ ատենախոսությունը նպատակ է հետապնդում մշակել \$երոելեկտրիկ (\$Է) բարոքսիդային նյութերի սինթեզման, ծավալային կերամիկաների պատրաստման, \$Է նուրբ թաղանթների ստացման տեխնոլոգիական ռեժիմներ, պատրաստել մետաղ-\$երոելեկտրիկ-մետաղ (Մ-\$Է-Մ) նանոթաղանթային կառուցվածքներ, փորձնականորեն հետազոտել \$Է կերամիկաների և նանոթաղանթների մակերևութային, ստեխիոմետրական, էլեկտրաֆիզիկական, օպտիկական ստատիկ հատկությունները, տեսականորեն ուսումնասիրել Մ-\$Է-Մ կառուցվածքների ստատիկ և դինամիկ բնութագրերը թթվածնային վականսիաների առկայության և դիէլեկտրիկ թափանցելիության ոչ գծայնության պայմաններում, բացահայտել այդ կառուցվածքների ստացման տեխնոլոգիական լավագույն ռեժիմները և գործնական կիրառման հնարավորությունները:

Թվարկված նպատակներին հասնելու համար առաջադրվել են հետևյալ խնդիրները.

1. Կատարել ԲՕՏԷ նյութի ընտրություն՝ հաշվի առնելով դրա կիրառական մեծ պոտենցիալը և հեռանկարայնությունը:
2. Իրականացնել ընտրված ԲՕՏԷ նյութի սինթեզ՝ կիրառելով սինթեզման ոչ այնքան հայտնի, սակայն ոչ ծախսատար ու արդյունավետ մեթոդներ:
3. Մշակել սինթեզված նյութից ծավալային կերամիկաների պատրաստման այնպիսի տեխնոլոգիական ռեժիմներ, որոնք կապահովեն խիտ և կայուն բնութագրերով կերամիկաների ստացում, որոնք հետագա լազերափմարելուսային փոշենստեցման (ԼԻՓ) ընթացքում կծառայեն որպես թիրախներ:
4. Մշակել ԼԻՓ եղանակով տարբեր հարթակների վրա բարիում-ստրոնցիումի տիտանատի (BST) որակյալ նուրբ թաղանթների ստացման տեխնոլոգիական ռեժիմներ:
5. Հետազոտել ստացված կերամիկական և թաղանթային նմուշների մակերևույթը, բաղադրությունը և կառուցվածքը:
6. Մշակել Մ-\$Է-Մ նանոթաղանթային կառուցվածքների ստացման տեխնոլոգիա:

7. Կատարել կերամիկայի և թաղանթների էլեկտրա-օպտիկական բնութագրերի փորձնական հետազոտություններ տարբեր հաճախականային և ջերմաստիճանային միջակայքերում:
8. Մշակել Մ-ՖԷ-Մ նանոթաղանթային կառուցվածքների վոլտ-ամպերային ստատիկ բնութագրերի ուսումնասիրության բարելավված տեսական մոդել՝ հաշվի առնելով ԲՕՖԷ թաղանթներում թթվածնի վականսիաների մեծ կոնցենտրացիան և ԲՕՖԷ նյութերի դիէլեկտրիկ թափանցելիության ոչ գծային կախումը կիրառված էլեկտրական դաշտից:
9. Տեսականորեն ուսումնասիրել Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքների դինամիկ բնութագրերը և դրանց հիման վրա գերբարձր-հաճախականային (ԳԲՀ) ազդանշանի գեներացման և ուժեղացման հնարավորությունները:

ԳԼՈՒԽ 2

ԲԱՐԴՕՔՍԻԴԱՅԻՆ ՏԷ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՍԻՆԹԵԶԸ, ԿԵՐԱՄԻԿԱՆԵՐԻ ՊԱՏՐԱՍՏՈՒ ՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒ ՄԸ

«Ներկայ ու մ քիմիայի և նյութագիտության հիմնական խնդիրը ցանկալի հատկություններով օժտված նոր նյութերի նախագծումն ու սինթեզումն է, ինչպես նաև այդ հատկությունները կառավարման և լավարկման մարտավարության ու ներքին մշակումը» [42]

ՆԱԽԱԲԱՆ

Վերջին տասնամյակներում քիմիան և նյութագիտությունը չափազանց կարևոր ներդրում են ունեցել միկրոէլեկտրոնիկայում կիրառվող նյութերի մշակման և հետազոտման գործում: Եթե դիտարկենք զուտ միայն կերամիկական կառուցվածքների պարագան, ապա ներկայի համար կարելի է առանձնացնել նշված երկու գիտությունների հետևյալ երկու հիմնական դերակատարությունները.

- ինքնատիպ (սպեցիֆիկ) կիրառությունների համար ցանկալի բաղադրություններ, կառուցվածքով և հատկություններով նոր նյութերի սինթեզում,

- այդ սինթեզված նյութերից կերամիկաների պատրաստման տեխնոլոգիաների մշակում:

Չայտնի է, որ գրեթե բոլոր բարդ միացությունների, առանձնապես բարդօքսիդային բազմաբաղադրիչ նյութերի ֆիզիկաքիմիական հատկությունները պայմանավորված են սինթեզման մեթոդի և համապատասխան ռեժիմների ընտրությամբ: Չետևապես՝ վերջինս հսկայական դերակատարություն ունի տվյալ նյութերի բաղադրությունն ու կառուցվածքը վերահսկելու գործում [42]:

§2.1. Բարդօքսիդային ֆերոէլեկտրիկ բարիում-ստրոնցիումի տիտանատը (BST)

Պարաէլեկտրիկ փուլում գտնվող \$E\$ նյութերը, երբ կիրառված է արտաքին էլեկտրական դաշտ, ցուցաբերում են դիէլեկտրիկ հաստատունի մեծ փոփոխություն: \$E\$-ների այս հատկությունը միկրոէլեկտրոնային տեխնիկայում վաղուց լայն կիրառություն է ստացել [43, 44]: Չայտնի է նաև, որ այս նյութերն արագ են արձագանքում կիրառված ազդանշաններին, ունեն ալմուկների ցածր մակարդակ, բարձր հաճախականային տիրույթում ցուցաբերում են փոքր կորուստներ սենյակային ջերմաստիճանի պայմաններում: Չետևապես՝ դրանք կարող են բազմաափսի կիրառություններ գտնել ազդանշանների ռադիո- և միկրոալիքային տիրույթներում: Այդպիսի \$E\$ նյութերի շարքում բարիում-ստրոնցիումի տիտանատը (BST) արդեն իսկ լայն կիրառություններ գտած և ամենահեռանկարային թեկնածուներից առաջինն է [43, 45–48]: Օրինակ՝ ԴԷ հարթակի վրա նստեցված BST թաղանթները կարող են օգտագործվել համալարելի պլանար կոնդենսատորներում և փուլ աշրջիչներում:

Այսպիսով, բարիում-ստրոնցիումի տիտանատը (BST) լարմամբ համալարվող նյութերի շարքում ամենամեծ ու շարժողական արժանացածներից մեկն է շնորհիվ իր մի շարք յուրահատկությունների, մասնավորապես՝ մեծ դիէլեկտրիկ թափանցելիության և սենյակային ջերմաստիճանում փոքր բարձր հաճախական կորուստների և այլն:

Ընդունված է բարիում-ստրոնցիումի տիտանատը համարել բարիումի տիտանատի և ստրոնցիումի տիտանատի պինդ լուծույթ, որը կարող ենք ներկայացնել $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ կամ $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ քիմիական բանաձևերից որևէ մեկով, ուր $0 < x < 1$:

Ընդհանուր առմամբ BST-ն կարելի է դիտարկել երկու տեսանկյուններից.

- ստրոնցիումով (Sr) հարստացված բարիումի տիտանատ (BTO)՝ $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$,
- բարիումով (Ba) հարստացված ստրոնցիումի տիտանատ (STO)՝ $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$:

Ատենախոսության հետագա շարադրանքում վերոնշյալ երկու ձևերից պայմանականորեն կընտրենք $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ քիմիական նշանակումը, իսկ որպես դրակրճատձև՝ BST-ն:

Բարիումի և ստրոնցիումի տարբեր հարաբերակցությունների ընտրելով՝ հնարավոր է հեշտությամբ փոփոխել BST-ի Կյուրիի ջերմաստիճանը (T_C)՝ այն հասցնելով ընդհուպ մինչև սենյակային և ավելի բարձր ջերմաստիճանների: T_C -ից ցածր ջերմաստիճաններում BST-ի բյուրեղացանցի տարրական բջիջը քառանիստ է (տետրագոնալ), իսկ T_C -ից բարձրում՝ խորանարդաձև [49]:

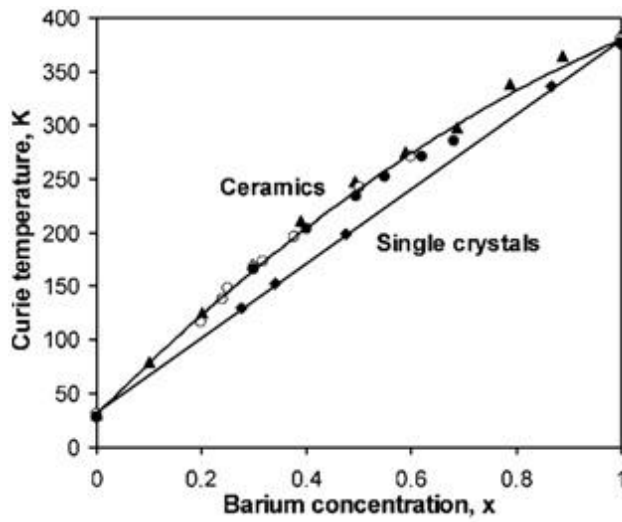
Կյուրիի ջերմաստիճանը \$E\$ նյութերի ամենակարևոր բնութագրերից է: Շատ ուսումնա-գիտական ձեռնարկներում T_C -ն սահմանվում է որպես ջերմաստիճան, որը բաժանում է \$E\$ նյութի պարաէլեկտրիկ և \$E\$ բերոէլեկտրիկ փուլերը (\$ագերը): Այլ կերպ ասած՝ T_C -ն \$E\$ բերոէլեկտրիկ փուլի նացման ջերմաստիճանն է: Սակայն այս սահմանումն իր մեջ պարունակում է որոշակի մոտարկում, քանի որ, իրականում, որոշ \$E\$ նյութերում (incipient) մինչև իսկ $T=0$ Կ ջերմաստիճանում առկա է ինքնակամ բևեռացման երևույթը: Բայց և այնպես, լայնորեն ընդունված է այդպիսի \$E\$-ները բնութագրել Կյուրիի ջերմաստիճանով (օրինակ, $SrTiO_3$ -ի համար $T_C=37...42$ Կ): Ընդհանուր առմամբ կարելի է փաստել, որ T_C -ն ոչ թե նյութի \$E\$ բերոէլեկտրիկ փուլի նացման ջերմաստիճանն է, այլ՝ \$E\$ նյութի քանակական բնութագիրը [50]:

Նկ. 2.1.1. (ա)-ում ներկայացված է $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ կերամիկայի և միաբյուրեղի Կյուրիի ջերմաստիճանի կախվածությունը բարիումի x կոնցենտրացիայից, որը տարբեր հետազոտողների ուսումնասիրության առարկան է եղել վերջին տասնամյակներում [50]: Բարձրորակ BST միաբյուրեղների հետ մեկտեղ հաճախակի են օգտագործվում նաև BST կերամիկական նմուշները, որոնց տարբեր հետազոտություններ ցույց են տվել, որ դրանց T_C -ն փոքր ինչ ավելի մեծ է, քան բարձրորակ միաբյուրեղներինը: Կերամիկաներին բնորոշ են բաղադրության տատանումները:

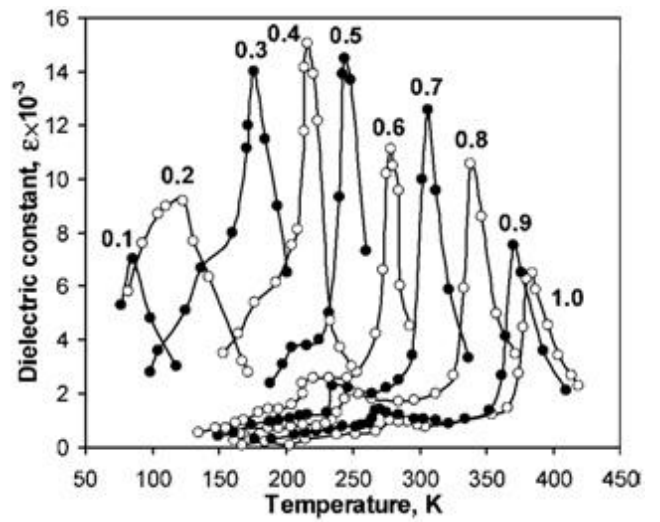
BST կերամիկայի բյուրեղները կարող են ունենալ տարբեր ստեխիոմետրիաներ, այսինքն՝ դրանում բարիումի և ստրոնցիումի իոնների բաշխվածությունն անհամասեռ է: Այդ անհամասեռությունը հիմնականում պայմանավորված է կերամիկայի ծակոտկենությունով, ինչպես նաև բյուրեղների որոշակի ձգվածությամբ: Վերջինս հանգեցնում է \$E\$ նյութի T_C -ի աճին: Նույնը կարելի է փաստել նաև մասնակի արատներ պարունակող \$E\$ բյուրեղների մասին:

Ուշադրության է արժանի այն հանգամանքը, որ բարձրորակ միաբյուրեղ $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ -ի և մասնակի արատներով կամ կերամիկական $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ նմուշի T_C -ները համընկնում են $x=0$ և $x=1$ դեպքերում, սակայն տարբերվում են, երբ $x=0,5$ (նկ. 2.1.1.ա):

$Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ -ում բարիումի x չափաբաժնից կախված ϵ դիէլեկտրիկ թափանցելիության ($\epsilon \times 10^3$ մասշտաբով) փոփոխությունը բերված է նկ. 2.1.1. (բ)-ում, իսկ բարիումի տիտանատը ($BaTiO_3$) որոշակի խառնուրդների (այդ թվում՝ ստրոնցիումի) տարբեր չափաբաժիններով հարստացնելու դեպքում T_C -ի փոփոխությունը բերված է նկ. 2.1.2-ում:

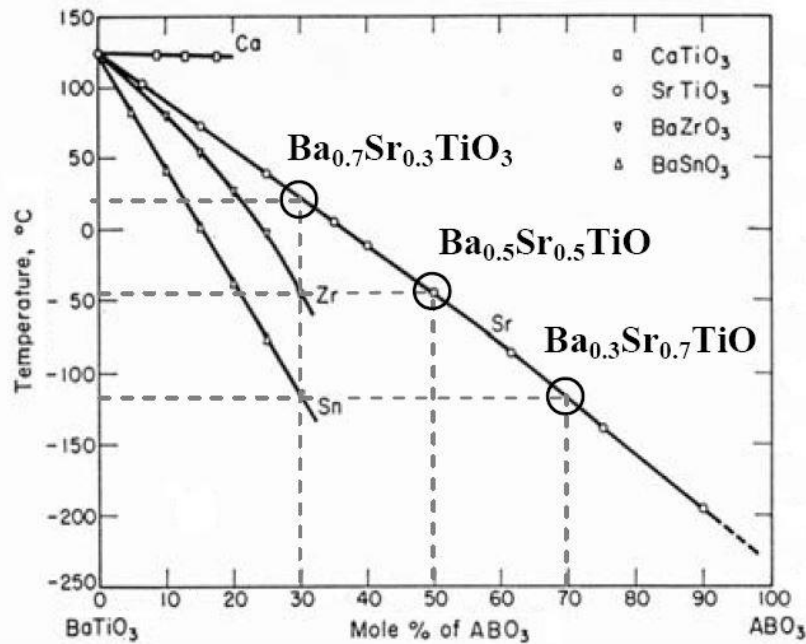


(ա)



(բ)

Նկ. 2.1.1. (ա) $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ կերամիկայի և միաբյուրեղի T_C ու ϵ ընդհանուր կախվածությունը բարիումի քոնցենտրացիայից [50];
 (բ) $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ կերամիկայի T_C հաստատունի ընդհանուր կախվածությունը բարիումի տարբեր քոնցենտրացիաների համար [44]



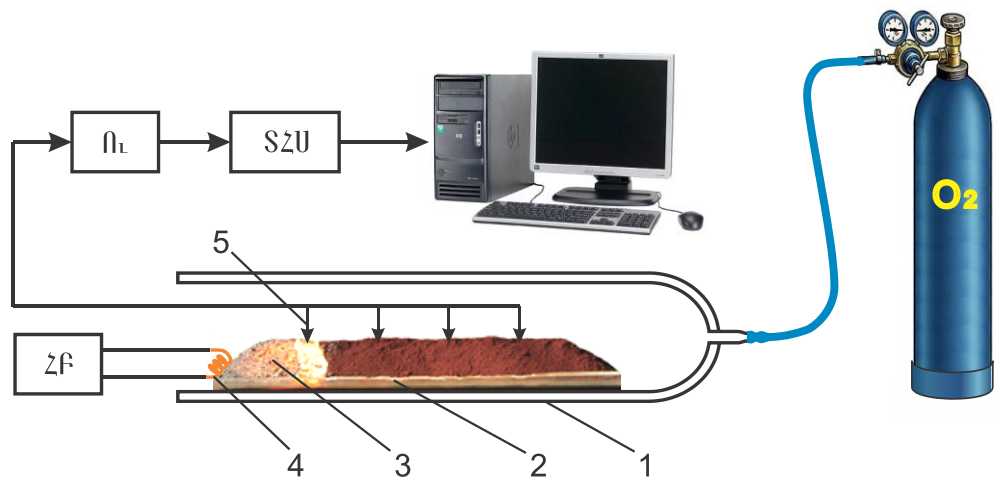
Նկ. 2.1.2. Որոշ խառնուրդների տարբեր չափաբաժիններով $BaTiO_3$ -ն հարստացնել ու դեպքում T_C -ի փոփոխությունը [51]

Դիելեկտրիկ թափանցելիություն ամապելագոյն արժեքն ու դրա դիրքը (T_C -ն) հետազոտելիս կերամիկական նմուշների դեպքում հաշվի է առնվում նմուշի բյուրեղային միկրոկառուցվածքը, իսկ նուրբ թաղանթների պարագայում՝ վերջիններիս հաստությունն ու նանոկառուցվածքը:

**§2.2. (Ba,Sr)TiO₃ փոշեկուլի ինքնատարածվող
բարձրջերմաստիճանային
սինթեզի (ԻԲՍ) մեթոդը**

Ինքնատարածման սկզբունքով իրականացվող հետերոգենայրման գործընթացները քիմիական սինթեզման բնագավառում կիրառվում են՝ անցած դարի 60-ականների վերջից սկսած: Այդպիսի սինթեզի եղանակը հայտնի է որպես ինքնատարածվող բարձրջերմաստիճանային սինթեզ (Self Propagating High Temperature Synthesis, SHS) [52, 53]: ԻԲՍ-ն բարդօքսիդային նյութերի սինթեզման նպատակով կիրառվել է 1970-ականների վերջից: Ի համեմատումս էքսանօրգանական նյութերի սինթեզի դասական մեթոդների, ԻԲՍ-ն ունի այնպիսի առավելություններ, ինչպիսիք են բարձր արտադրողականությունը, կիրառվող սարքերի պարզությունը, սինթեզի կարճատև ընթացքը, սինթեզման պրոցեսում չնչին էներգածախար, վերջնական ամիկրոկառուցվածքի և բաղադրության կարգավորման ճկունությունը, էկոլոգիականությունը և այլն [54, 55]:

Նկ.2.2.1-ում ներկայացված է ԻԲՍ-ի լաբորատոր սարքավորման սխեմատիկ տեսքը [15, 55]:



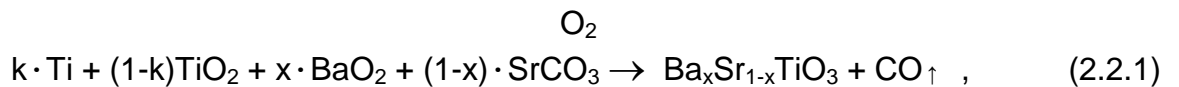
Նկ. 2.2.1. ԻԲՍ-ի լաբորատոր սարքավորումը. 1- կվարցե խողովակ, 2- կվարցե տակդիր, 3- ելանյութերի փոշեխառնուրդ, 4- այրման հարուցիչ, 5- ջերմազույգերի շարք, ՌԼ - ուժեղարար, ՏՀՍ - տվյալների հավաքման սարք, ՀԲ- հարուցման բլոկ

ԻԲՍ մեթոդով BST-ի սինթեզման համար օգտագործված ելանյութերը ներկայացված են աղյուսակ 2.2.1-ում: Որպես վառելիք՝ օգտագործվել է տիտանի փոշի, իսկ որպես օքսիդիչ՝ թթվածին (տե՛ս 2.2.1 բանաձևը):

Աղյուսակ 2.2.1.

ՆՅՈՒԹ ԱՆՎԱՆՈՒՄԸ	ՔԻՄԻԱԿԱՆ ՆՇԱՆԱԿՈՒՄԸ	ՄԱՔՐՈՒԹՅԱՆ ԱՍԻՃԱՆԸ
բարիոլմի պերօքսիդ	BaO ₂	99.8%
տիտանի օքսիդ	TiO ₂	99.7%
ստրոնցիոլմի կարբոնատ	SrCO ₃	99.8%
տիտան	Ti	99%

Ba_xSr_{1-x}TiO₃-ի ԻԲՍ-ն ընթանում է ըստ հետևյալ քիմիական ռեակցիայի բանաձևի.

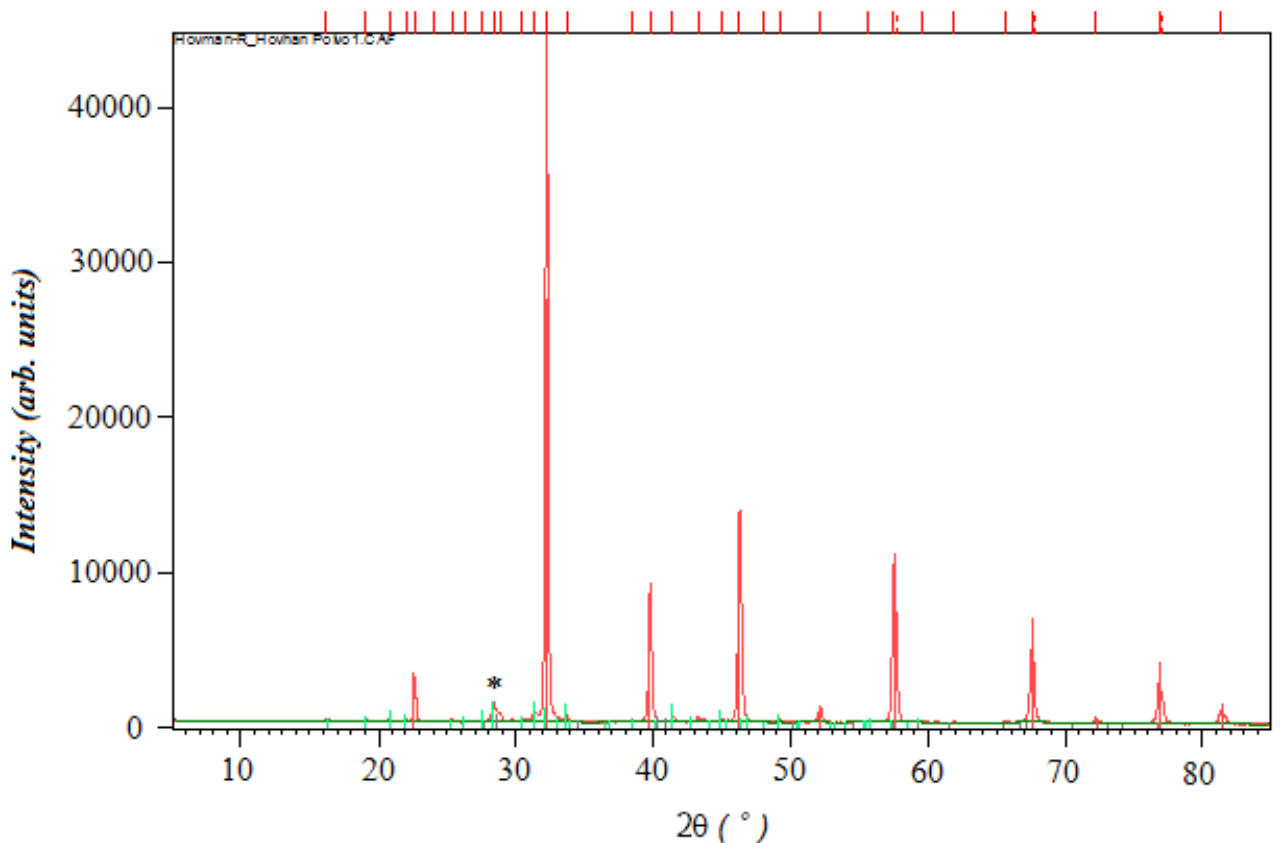


ուր k գործակիցը կատարում է ռեակցիայի էկզոթերմիայի կարգավորման գործառնություն:

ԻԲՍ-ի հիմնական բնորոշիչներն են՝ այրման ճակատի տարածման արագությունն ու ջերմաստիճանը: Վերջիններս պայմանավորված են էկզոթերմիկ ռեակցիայի ընթացքում ջերմության անջատմամբ և բոցավառվող շիկացած գոտուց դեպի ելանյութերի փոշեխառնուրդի հարևան շերտեր ջերմության փոխադրմամբ: Մեր իրականացրած ԻԲՍ-ի մեկնարկի և ընթացքի ապահովման համար անհրաժեշտ ջերմանջատումը տեղի է ունենում որպես վառելիք ծառայող մետաղի (Ti) օքսիդացման արդյունքում, իսկ SrCO₃-ի քայքայումից անջատվում է CO գազը: Որքան մեծ է ինի ելանյութերի խառնուրդում վառելիքի քանակությունը, այսինքն՝ k -ն, այնքան մեծ կլինի ելանյութերի փոշեխառնուրդի այրման ջերմաստիճանն ու այրման տարածման արագությունը:

Չամաձայն փորձարարական տվյալների, 2.2.1 բանաձևով ԻԲՄ-ի քիմիական ռեակցիայի մեկնարկի, պահպանման և արդյունքում BST-ի հնարավորինս մաքուր ֆազի ստացման համար անհրաժեշտ է ընտրել տիտանի փոշու $\sim 16\text{-}22\%$ չափաբաժինը ($k \approx 0,7 \dots 0,93$): Տիտանի փոշու 22%-ից ավելի պարունակության դեպքում ռեակցիայի ընթացքում այրման ջերմաստիճանը և տարածման արագությունը միանգամից աճում են, ինչը հանգեցնում է անցանկալի երևույթների ի հայտ գալուն [55–57]:

XRD հետազոտություններով բացահայտվել է, որ այրման ցածր ջերմաստիճանների դեպքում ԻԲՄ-ի արդյունքում ունենում ենք Ti-ի փոշու օքսիդացում, որի հետևանքով սինթեզված BST վերջնական թիբադադրության մեջ առաջանում են անցանկալի խառնուրդներ, որոնց կարելի է կոչել նաև աղտոտվածություններ, ինչպես օրինակ՝ TiO_2 -ն ($2\theta \approx 28,5^\circ$) և BaO -ն ($2\theta \approx 29^\circ$) (նկ.2.2.2):

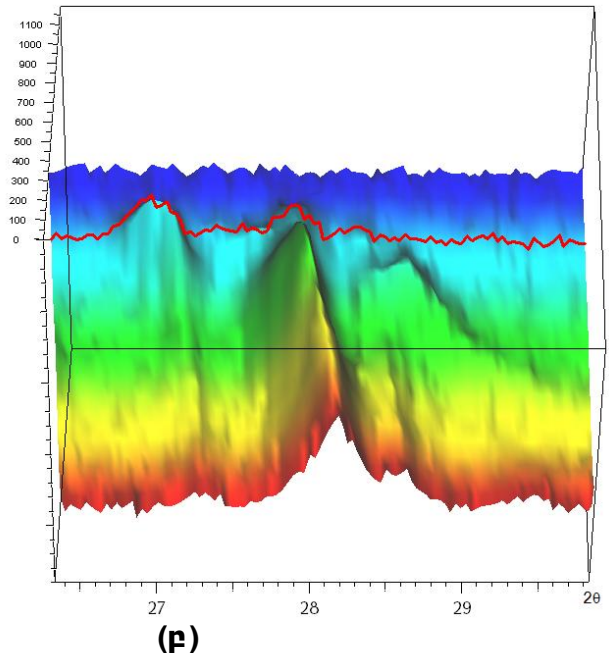
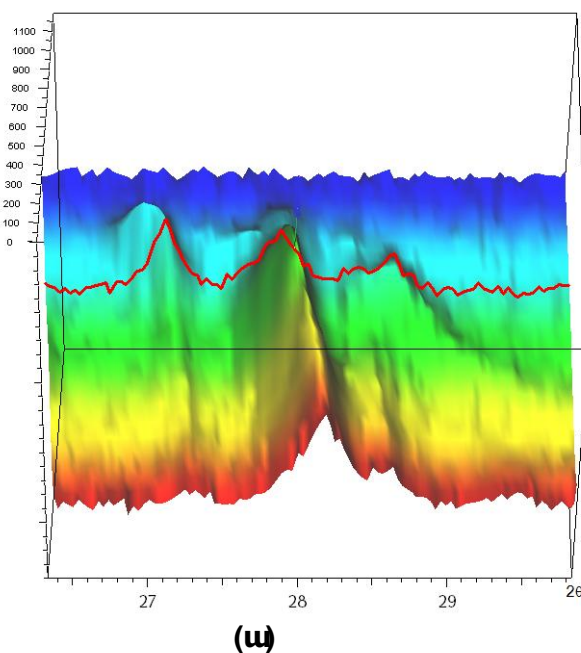


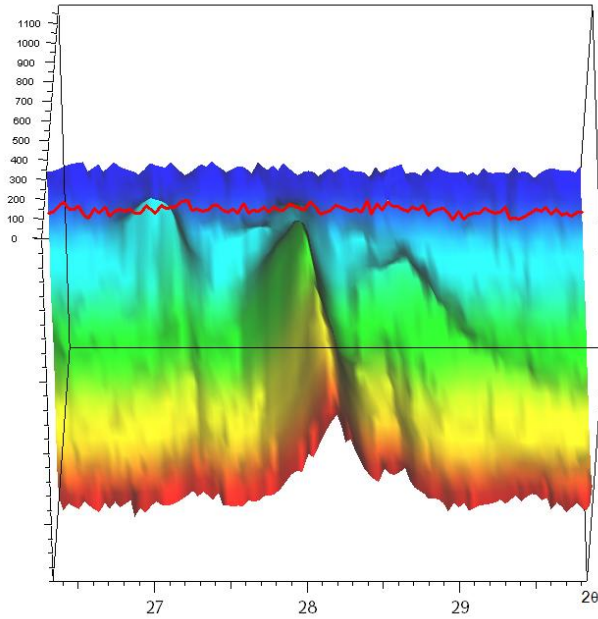
Նկ.2.2.2. 18% վառելիքի (Ti) օգտագործմամբ ԻԲՄ-ով ստացված $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{TiO}_3$ -ի XRD պատկերը. $2\theta \approx 28,5^\circ$ դեպքում հանդես է գալիս TiO_2 -ը, $2\theta \approx 29^\circ$ դեպքում՝ BaO -ն.

այս երկուսն էլ նկարում նշված են աստղանիշով (*)

ԻԲՄ-ով ստացված փորձանմուշների ռենտգեն-դիֆրակցիոն պատկերները (XRD) ստացվել են ոչ միայն սենյակային ջերմաստիճանում, այլև շատ ավելի բարձր ջերմաստիճաններում, այսինքն՝ իրականացվել է թերմոգրավիմետրիկ ռենտգենյան վերլուծություն (thermogravimetric X-ray analysis), որն առավել հայտնի է TDX հապավմամբ: Վերլուծության այս մեթոդը թույլ է տալիս հետազոտել փորձանմուշների ֆիզիկական և քիմիական հատկությունները՝ որպես ֆունկցիա աճող կամ նվազող ջերմաստիճանից, մասնավորապես ստանալ XRD-ները ջերմաստիճանների ամենալայն միջակայքում:

ԻԲՄ-ով սինթեզված BST-ի TDX վերլուծությունն իրականացվել է 600...1200°C-ում ջերմաստիճանի փոփոխման 25°C քայլով: BST-ում որպես անցանկալի խառնուրդներ հանդես եկող TiO_2 -ը և BaO -ն, որոնք գտնվում են 2θ -ի $\sim 27...29^\circ$ միջակայքում՝ 1075°C-ում ներկայանում են առավել փոքր ինտենսիվությամբ պիկերով (նկ.2.2.3, բ), իսկ 1125°C-ից բարձր ջերմաստիճաններում պրակտիկորեն անհետանում են (նկ.2.2.3, գ):





(գ)

Նկ.2.2.3. 18% վառելիքի (Ti) օգտագործմամբ ԻԲՄ-ով ստացված $Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO_3$ փոշենյութի

XRD պատկերների եռաչափ տեսքը 600...1200°C ջերմաստիճանային տիրույթում:

Կարմիր գծով ցույց են տրված 2θ-ի ~27...29° միջակայքում հանդես եկող պիկերը

(ա) 1000°C-ում, (բ) 1075°C-ում և (գ) 1125°C-ում

§2.3. (Ba,Sr)TiO₃ նանոփոշենյութի ցիտրատ-գել սինթեզի (ՑԳՍ) մեթոդը

Ցիտրատ-գել սինթեզման (Citrate-gel synthesis, CGS) մեթոդը պատկանում է այսպես կոչված «Սոլ-գել պրոցես»-ի դասին, որը լայն կիրառություն է գտել պերովսկիտների սինթեզման բնագավառում [58, 59]:

ՑԳՍ-ն, ինչպես և ԻԲՄ-ն, տնտեսապես շահավետ, պարզ սինթեզման մեթոդ է: Այն կարելի է ներկայացնել հետևյալ փուլային հաջորդականությամբ [60].

ԵԼԱՆՅՈՒԹԵՐ (հիմնականում՝ նիտրատներ) ⇒ **ՍՈԼ** ⇒ **ԳԵԼ** ⇒ **ՕՔՍԻԴ**

Ելանյութերից վերջնական փուլային անցումն ապահովվում է Նկ. 2.3.1-ում բերված ընթացակարգով: ՑԳՍ մեթոդով BST-ի սինթեզման համար օգտագործված ամերիկյան “Aldrich” ընկերության (Aldrich Chemistry Co., USA) ելանյութերը ներկայացված են աղյուսակ 2.3.1-ում: Որպես լուծիչ օգտագործվել է իսպանական արտադրության (Panreac Química S.A.U, Spain) ցիտրիկ թթու (Citric Acid anhydrous, 99%):

Աղյուսակ 2.3.1.

ՆՅՈՒԹ ԱՆՎԱՆՈՒՄԸ	ՔԻՄԻԱԿԱՆ ՆՇԱՆԱԿՈՒՄԸ	ՄԱՔՐՈՒԹՅԱՆ ԱՍՏԻՃԱՆԸ
բարիոլմի նիտրատ	Ba(NO ₃) ₂	99.98%
ստրոնցիոլմի նիտրատ	Sr(NO ₃) ₂	99+%
տիտանի բոլտոքսիդ	Ti(OCH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃) ₄	97%

ՑԳՍ-ի մեթոդով 900°C-ում ջերմամշակված BST փոշենյութը մանրացվել է ազաթե հավանգով (արդյունքում ստացվում է նանոհատիկային փոշենյութ), որից հետո փոշենյութը 5...10 տոննա կշռի ազդեցության տակ մեկուկես րոպե տևողությամբ ենթարկվել է չոր մամլման: Մամլման համար օգտագործվել է “Specac” ընկերության

10 մմ և 13 մմ տրամագիծ ունեցող պողպատյա կաղապարներ և մինչև 15 տոննա կշռով ազդելու հնարավորությամբ “Graseby Specac” յուղային հիդրավլիկ մամլիչ:

ՑԳՍ-ի մեթոդով ստացված BST փոշենյութերի XRD վերլուծությունը՝ սենյակային ջերմաստիճանում XRD-ի հետ մեկտեղ, ինչպես ԻԲՍ-ի դեպքում, կատարվել է TDX մոտեցմամբ: TDX-ն իրականացվել է ջերմաստիճանային 900...1250°C տիրույթում:

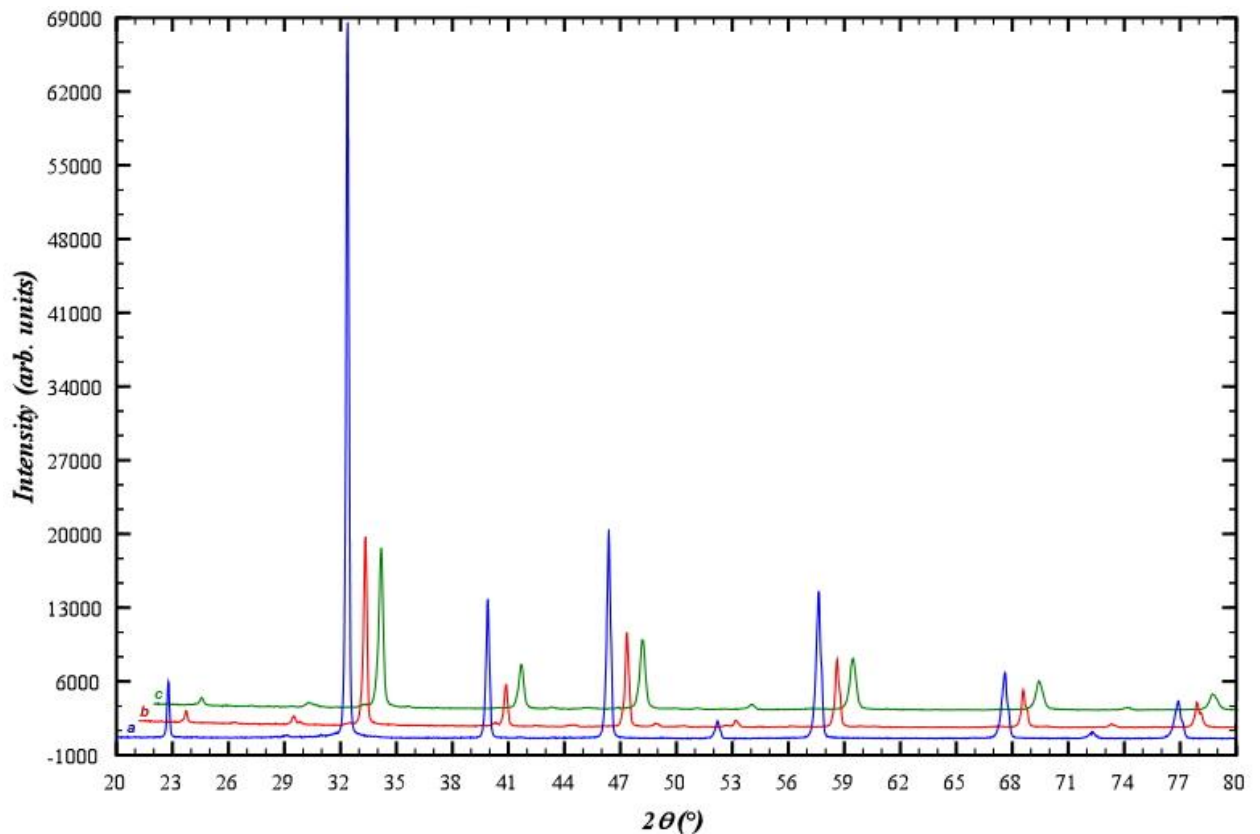
Թրծումներն իրականացվել են “CARBOLITE” ընկերության “RHF 1500” բարձր ջերմաստիճանային թրծման վառարանի միջոցով (ապահովում է մինչև 1500°C ջերմաստիճան): Հիմնականում BST կերամիկաները թրծվել են 1000...1450°C ջերմաստիճանային միջակայքում:



Նկ. 2.3.1. Ցիտրատ-գել սինթեզի ընթացակարգը

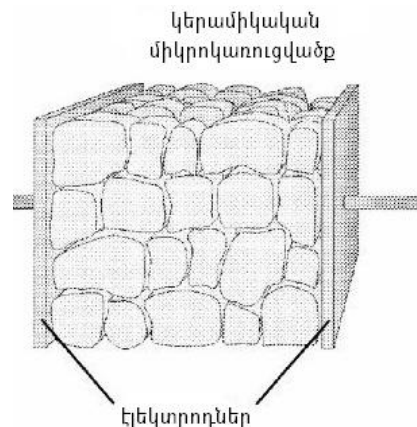
Իրականացվել է նաև վերոնշյալ երկու մեթոդներով ստացված BST-ի XRD-ների համեմատություն (Նկ. 2.3.2), որից պարզվել է, որ ՑԳՍ-ով ստացված BST-ն գերծ է TiO_2 ($2\theta \approx 28,5^\circ$) և BaO ($2\theta \approx 29^\circ$) խառնուրդներից:

Չուգահեռ շրջադիրներով կերամիկական կոնդենսատորները լինում են միաշերտ և բազմաշերտ: Առենախոսության շրջանակներում BST հիմքով կերամիկական կոնդենսատորների պատրաստման նպատակը վերոնշյալ երկու տարբեր մեթոդներով սինթեզված BST-ի դիէլեկտրիկ հատկությունների հետազոտությունն է, այդ պատճառով ստացվել են միաշերտ, պարզ կոնդենսատորային կառուցվածքներ: Վերջիններիս պատրաստման համար ստացվել են 9...9.5 մմ տրամագծով և 0,7...1 մմ բարձրությամբ գլանաձև հաբեր, որոնք թրծվել են 4 ժամ տևողությամբ, օդի միջավայրում, 1300°C -ում՝ $5^\circ\text{C}/\text{րոպե}$ քայլով սենյակային ջերմաստիճանից հասցնելով մինչև 1300°C , և՛ հակառակը:



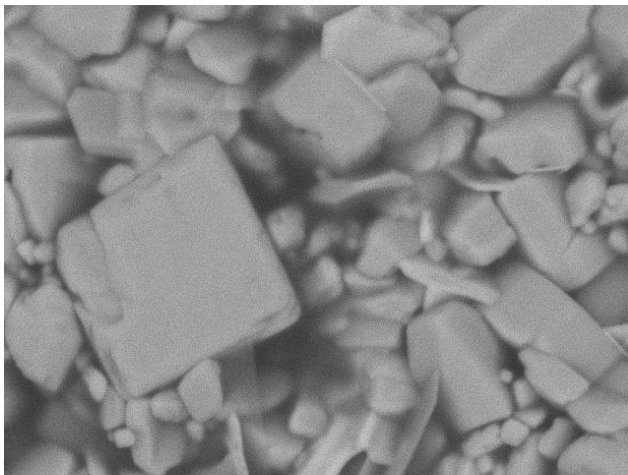
Նկ. 2.3.2. a) ՑԳՍ-ով ստացված BST նանոփոշուց պատրաստված կերամիկայի (թրծված օդի միջավայրում, 1300°C-ում՝ 4 ժամ տևողությամբ) XRD պատկերը (30°C-ում), **b)** ԻԲՍ-ով ստացված BST փոշենյութից պատրաստված կերամիկայի (թրծված օդի միջավայրում, 1300°C-ում՝ 4 ժամ տևողությամբ) XRD պատկերը (30°C-ում); **c)** ԻԲՍ-ով ստացված BST նանոփոշուց պատրաստված կերամիկայի (թրծված $4 \cdot 10^{-4}$ mbar վակուումում, 1150°C-ում՝ 30 րոպե տևողությամբ) XRD պատկերը (30°C-ում)

ՑԳՍ և ԻԲՍ մեթոդներով ստացված կերամիկական BST հաբերի ամբողջ վերին և ստորին մակերևույթները ծածկվել են ոսկյա (Au) կոնտակտներով “Quorum” ֆիրմայի Q150T S մակնիշի բարձր թույլ ատրոդուսակությամբ տուրբոմոլեկուլային պոմպով ալազմային փոշենստեցման համակարգի միջոցով (Նկ. 2.3.3):



Նկ. 2.3.3. Կերամիկական ծավալային կոնդենսատորի միջէլեկտրոդային շերտի միկրոկառուցվածքը

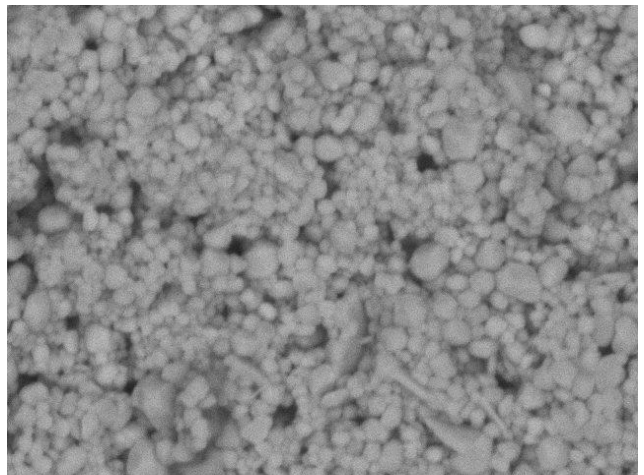
Կերամիկական կոնդենսատորների դիէլեկտրիկական հատկությունների վրա շատ մեծ ազդեցություն ունի դրա միջէլեկտրոդային շերտի միկրոկառուցվածքը՝ բյուրեղային հատիկների չափերը և դրանց խտությունը [61]: Այս հանգամանքը հաշվի առնելով՝ նախքան ստացված կերամիկական կոնդենսատորների դիէլեկտրիկական բնութագրերի չափումը, իրականացվել է միջէլեկտրոդային BST հիմքով կերամիկաների միկրոկառուցվածքի տեսածրող էլեկտրոնային մանրազննում (Scanning electron microscopy, SEM) (Նկ. 2.3.4): Սամի եղանակ է, որի միջոցով ստացվում է հետազոտվող փորձանմուշի մակերևույթի պատկերը, երբ այդ մակերևույթով տեղի է ունենում մեծ էներգիա ունեցող էլեկտրոնների փնջի տեսածրում, որի ընթացքում էլեկտրոնները, փոխազդելով փորձանմուշի մակերևույթի ատոմների հետ, կամ անդրադառնում են, կամ էլ առաջացնում երկրորդային էլեկտրոնների հոսք: Երկու դեպքում էլ գրանցելով այդ էլեկտրոնները՝ հնարավորություն ենք ունենում հանգամանալից տեղեկատվություն ստանալ փորձանմուշի մակերևույթի վերաբերյալ [15, 62]: Եթե փորձանմուշի մակերևույթը հաղորդիչ նյութով է ծածկված, ապա SEM եղանակով հնարավոր է մեծ ճշգրտությամբ ստանալ այդ մակերևույթի պատկերը:



GMMM1579

2016/04/19 11:48 NL D8,5 x7,0k 10 um

(ա)



GMMM1582

2016/04/19 13:07 NL D8,5 x7,0k 10 um

(բ)

Նկ. 2.3.4. “HITACHI TM3000 Tabletop Microscope” տեսածրող էլեկտրոնային մանրադիտակով ստացված **(ա)** ԻԲՍ BST և **(բ)** ՑԳՍ BST կերամիկաների մակերևույթների միկրոկառուցվածքը

Պատրաստված ՖԷ կերամիկական հաբերի մակերևույթների մորֆոլոգիայի (SEM) և բաղադրության (EDS) հետազոտումն իրականացվել է “HITACHI TM3000 Tabletop Microscope” տեսածրող էլեկտրոնային մանրադիտակով (Նկ.2.3.5):



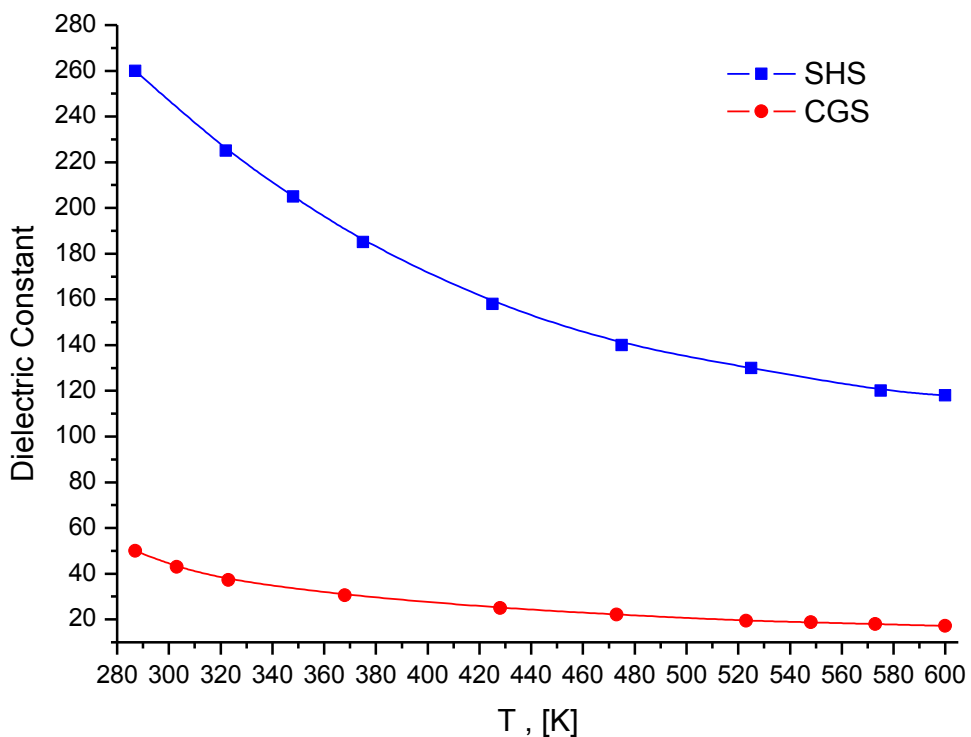
Նկ.2.3.5. SEM և EDS հետազոտության նկարների համար նախատեսված “HITACHI TM3000 Tabletop Microscope” սարքի լուսանկարները

Նկ.2.3.4-ից ակնհայտ երևում է՝ ԻԲՍ BST կերամիկանունի առավել խոշոր բյուրեղային հատիկներ, քան՝ ՑԳՍ BST-ն, հետևապես, ԻԲՍ BST հիմքով կերամիկական կոնդենսատորի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը միևնույն արտաքին պայմաններում պետք է ավելի մեծ լինի քան ՑԳՍ BST-ինը [61], ինչը և հաստատվել է ատենախոսության շրջանակներում իրականացված չափումներում: Իրականացվել են պատրաստված Au/BST/Au կերամիկական կոնդենսատորի ունակաչերմաստիճանային C(T) բնութագրերի չափումներ 285÷600 Կ ջերմաստիճանային միջակայքում, տարբեր հաճախություններում (20 Հց-ից մինչև 2 ՄՀց)՝ օգտագործելով “KEYSIGHT” ընկերության “Agilent E4980A Precision LCR Meter” ճշգրիտ չափիչ սարքը, որը հնարավորություն է ընձեռում բարձր

ճշգրտությամբ տարատեսակ չափումներ անել 20 Յգ-ից մինչև 2 ՄՅգ հաճախային միջակայքում:

C ունակության և ε դիէլեկտրիկ թափանցելիության $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$

կախվածության միջոցով ստացվել են դիէլեկտրիկ թափանցելիության և հաճախության կախումները ջերմաստիճանից՝ ε (T), ԻԲՍ (SHS) և ՑԳՍ (CGS) մեթոդներով ստացված կերամիկական կոնդենսատորների համար (նկ.2.3.6):

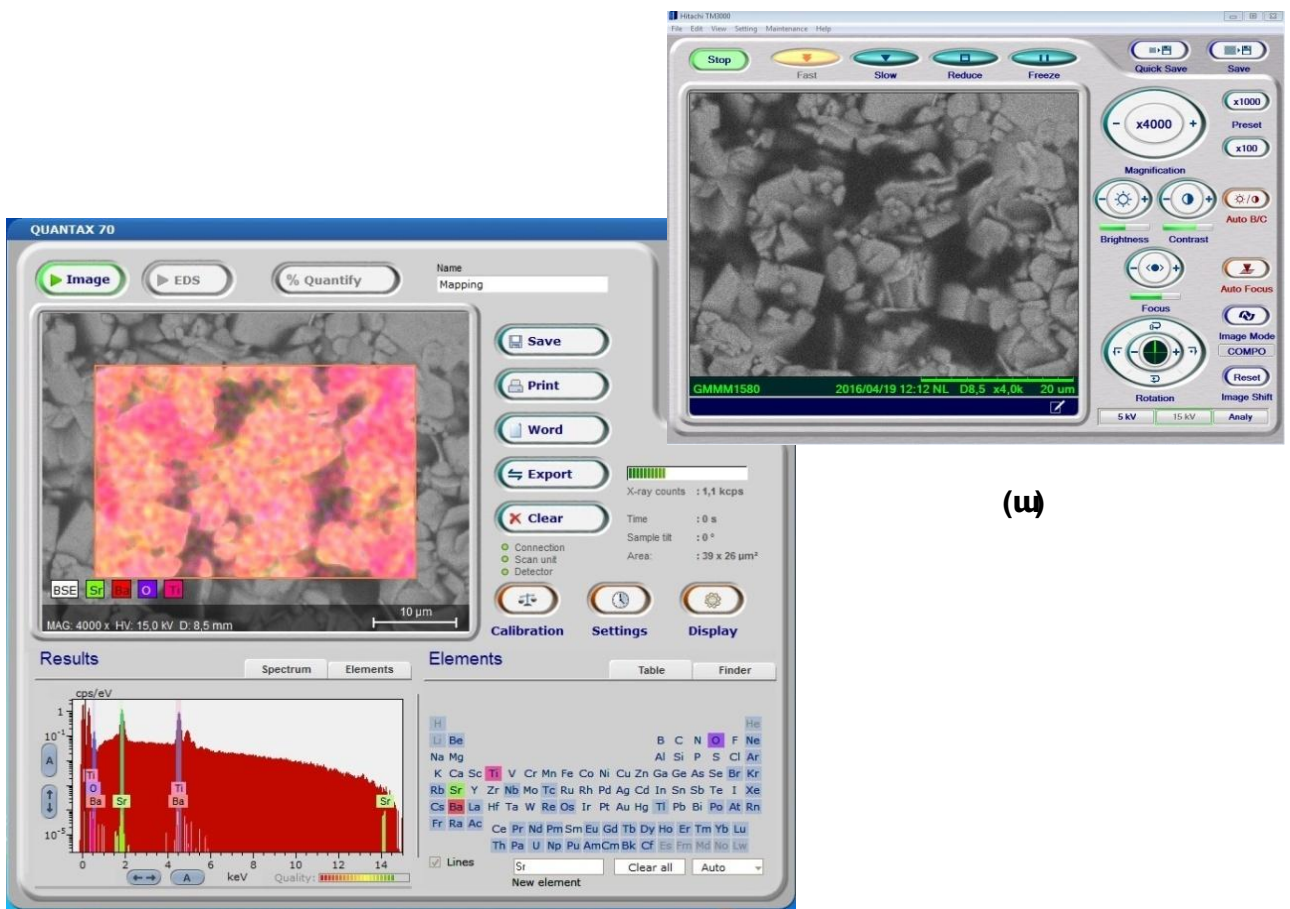


Նկ.2.3.6. ԻԲՍ (SHS) և ՑԳՍ (CGS) մեթոդներով սինթեզված $Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO_3$ փոշենյունից պատրաստված $\sim 5,1$ գ/սմ³ փորձնական խտությամբ գլանաձև կերամիկական կոնդենսատորների ε (T) բնութագրերը 1 ՄՅգ հաճախության դեպքում

Պատրաստված BST կերամիկաների բաղադրությունը և նաև կառուցվածքը, բացի XRD-ից և SEM-ից, հետազոտվել է նաև էներգոդիսպերսիվ ռենտգենյան սպեկտրոսկոպիայի (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS կամ EDX) եղանակով, որով հնարավոր է իրականացնել հետազոտվող նյութի բաղադրության որակական և

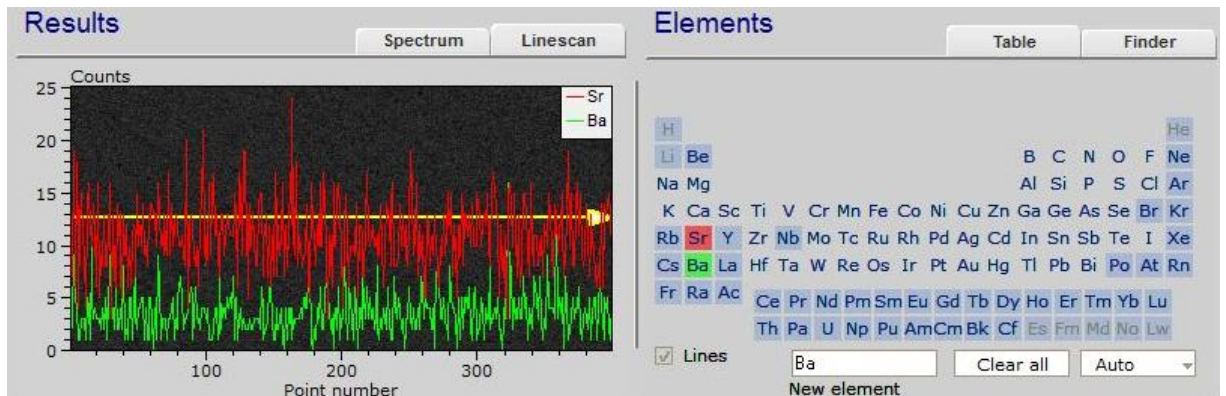
քանակական վերլուծություն, ըստ այդ նյութից անդրադարձող ռենտգենյան ճառագայթման սպեկտրի [62, 63]:

Ինչպես արդեն նշվել է, EDS-ն իրականացվել է միևնույն «HITACHI TM3000 Tabletop Microscope» տեսածրող էլեկտրոնային մանրադիտակով, ինչով որ՝ SEM-ը (նկ.2.3.5): SEM-ի դեպքում տվյալները մշակվել են համակարգչային «Hitachi TM3000» ծրագրային փաթեթով, իսկ EDS-ի դեպքում՝ «QUANTAX 70»-ով (նկ.2.3.7 ա, բ): Այս երկու ծրագրերը թույլ են տալիս մակերևույթի միևնույն տեղամասի համար կատարել թե՛ SEM և թե՛ EDS հետազոտություններ:



Նկ.2.3.7. Համապատասխան արար SEM և EDS հետազոտությունների համար նախատեսված (ա) «Hitachi TM3000» և (բ) «QUANTAX 70» համակարգչային ծրագրային փաթեթների աշխատանքային պատուհանները

ԻԲՍ և ՑԳՍ մեթոդներով պատրաստված $Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO_3$ կերամիկաների քաղադրության Ba/Sr ատոմար 0,25/0,75 հարաբերակցությունը հետազոտվել է EDS-ով կերամիկայի մակերևույթի մի քանի տեղամասերում (նկ.2.3.8):



Նկ.2.3.8. BST կերամիկայի EDS հետազոտության համար նախատեսված «QUANTAX 70» ծրագրի աշխատանքային պատուհանը, ուր ցուցադրված է 0...400 մկմ գծի երկայնքով Ba/Sr հարաբերակցության գրեթե հավասարաչափ 0,25/0,75 բաշխվածությունը Պարզվել է, որ Ba/Sr հարաբերակցությունը շեղվում է չնչին չափով՝ տատանվելով $Ba_{0.26}Sr_{0.74}TiO_3$ -ի և $Ba_{0.24}Sr_{0.76}TiO_3$ -ի միջև, սակայն հիմնականում ցուցաբերելով հենց սինթեզման ընթացքում ընտրված 0,25/0,75 ստեխիոմետրիան:

§2.4. (Ba,Sr)TiO₃-ի գլիցին-նիտրատայրման (ԳՆԱ) սինթեզի մեթոդը

Գլիցին-նիտրատայրման (ԳՆԱ) (Glycine-nitrate Combustion) մեթոդը քիմիական սինթեզի այրման տեխնիկա է, որը մշակվել է 1990-ականներին [64]: ԳՆԱ մեթոդը պատենտավորված է և օգտագործվում է թե՛ կոմերցիոն արտադրության մեջ, թե՛ գիտահետազոտական լաբորատորիաներում կերամիկական օքսիդներ սինթեզելու նպատակով: Այս մեթոդն իրենից ներկայացնում է պարզ, ճկուն և արագ գործընթաց, որը հիմնված է տարբեր օքսիդիչների (օր.՝ մետաղական նիտրատներ) և վառելիքի (օր.՝ գլիցին) ջրային լուծույթի գել վիճակին հասնելու, դրանից հետո այրման վրա: Այրումը հետևանք է նիտրատի իոնների և վառելիքի միջև էկզոթերմիկ օքսիդավերականգնման ռեակցիայի, որի ընթացքում մեծ ծավալով գազերի անջատումը բերում է ելանյութերի չափազանց ուռճացած գելի կազմալուծմանը՝ առաջացնելով տարբեր չափերի վերջնանյութեր: Այդ չափերը հիմնականում կախված են լինում տաքացումից (կալցինացումից) հետո առաջ եկած ռեակցիայի արագությունից:

ԳՆԱ մեթոդով օքսիդային նյութերի սինթեզման ընթացակարգը բերված է նկ.2.4.1-ում: Մեթոդը չի պահանջում թանկարժեք

Ելանյութեր և մեծ էներգածախս (այրումը տեղի է ունենում տաքացումից շատ կարճ ժամանակ անց):



Նկ.2.4.1. Գլիցին-նիտրատայրման մեթոդի նկարագրող յոլունը

Աղյուսակ 2.4.1.

ՆՅՈՒԹ ԱՆՎԱՆՈՒՄԸ	ՔԻՄԻԱԿԱՆ ՆՇԱՆԱԿՈՒՄԸ	ՄԱՔՐՈՒԹՅԱՆ ԱՄՏԻՃԱՆԸ
բարի ու մի նիտրատ	Ba(NO ₃) ₂	99.98%
ստրոնցիոլ մի նիտրատ	Sr(NO ₃) ₂	99+%
տիտանի օքսիդ	TiO ₂	99.8%
գլիցին	H ₂ NCH ₂ CO ₂ H	98%

Փորձ է արվել ԳՆԱ մեթոդով սինթեզել BST: Աղյուսակ 2.4.1-ում բերված ամերիկյան “Aldrich” ընկերության արտադրած ելանյութերը լուծվել են թորած ջրում: Ստացված լուծույթին ավելացվել է գլիցին, ապահովվել է գլիցին-նիտրատ 1,02...1,15 մոլյար հարաբերակցություն: Վերջնական լուծույթը խառնվել է և տաքացվել (կալցինացվել): Տաքացման ընթացքում ելանյութերի լուծույթը փոխարկվել է նիտրատ-գլիցին մածուցիկ խառնուրդի, որն էլ շատ չանցած բռնկվել է ու այրվել: Այրումը տևել է ընդամենը հաշված վայրկյաններ: Սինթեզը տեղի է ունեցել ըստ ռեակցիայի հետևյալ պարզեցված բանաձևի.

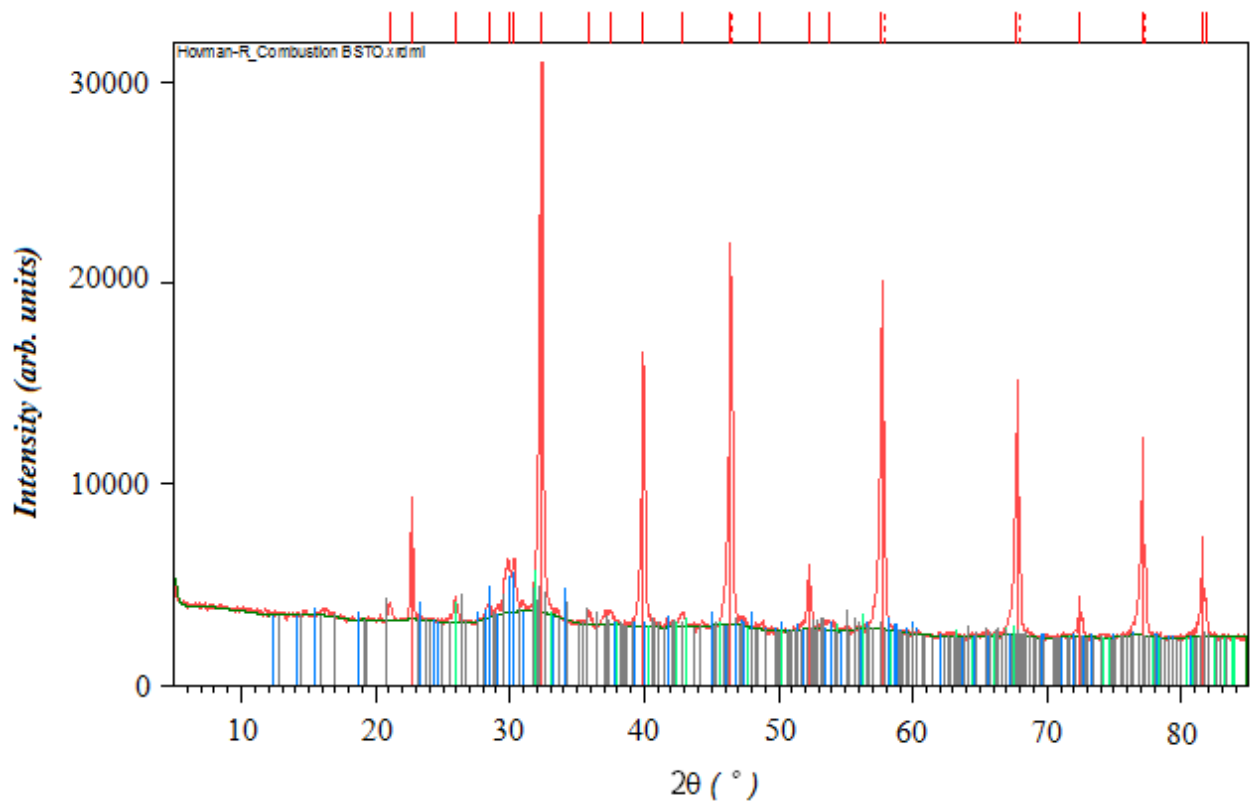


(Ba,Sr)TiO₃ ԲՕՏԷ-ի սինթեզի արգասիքը չի ստացվել այնպիսին, ինչպիսին սովորաբար լինում է ԳՆԱ մեթոդի վերջնանյութը (սովորաբար ստացվում են նանո կամ ենթամիկրոնային չափերի փոշեխառնուրդներ): Այդ արգասիքը եղել է գրեթե սև գույնի

կաշուն զանգված՝ նստած անոթի հատակին ու պատերին: Այն ամբողջությամբ քերվել է, չորացվել, ձեռքի ազաթե հավանգով մանրացվել ու ենթարկվել չոր մամլման: Մամլված գլանաձև հաբը թրծվել է 900...1350°C ջերմաստիճաններում, օդի միջավայրում:

XRD-ն իրականացվել է PHILIPS X'PERT PRO ավտոմատ դիֆրակտոմետրի միջոցով (40 kV և 40 mA), որն ունի երկրորդային $\text{Cu-K}\alpha$ ճառագայթմամբ ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) մոնոքրոմատոր և PIXcel պինդմարմնային գրանցիչից (դետեկտոր, 2θ 3.347° ակտիվ երկարությամբ): Տվյալները վերցվել են սենյակային ջերմաստիճանում՝ 2θ -ի 5° -ից մինչև 85° -ն ընկած տիրույթում (քայլի չափը 0.026, յուրաքանչյուր քայլին 600 վ պահումով՝ ընդհանուր 2 ժամ հետազոտման տևողությամբ):

XRD վերլուծությամբ պարզվել է, որ խառնուրդներից առավելագույնս զերծ հաբը ստացվել է 1300°C-ում: XRD-ով ստացված պիկերը նույնականացվել են PDF գրադարանային տվյալների հետ, պարզվել են ԳՆԱ սինթեզի վերջնանյութում առկա փուլերը: Ձևավորված անխառն BST փուլը չի արձանագրվել, այլ դիտվել են ստրոնցիումի ու բարիումի տիտանատների առանձին հանդես եկող փուլեր և տիտանի օքսիդի խառնուրդներ (TiO_2 և Ti_4O_7): ԳՆԱ մեթոդով $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ -ի սինթեզման փորձի XRD պատկերը ներկայացված է նկ.2.4.2-ում:



Նկ.2.4.2. Գլ իցիև-նիտրատայ րման մեթոդով (Ba,SrTiO_3) նյութի սինթեզման փորձի արդյունքում ստացված վերջնական նյութի XRD պատկերը

§ 2.5. Եզրակացություններ երկրորդ գլխի վերաբերյալ

1. Սինթեզման համար ընտրվել է պերովսկիտ բյուրեղային կառուցվածք ունեցող բարոքսիդային ֆերոէլեկտրիկ բարիում-ստրոնցիումի տիտանատը (BST)՝ որպես լայն կիրառություններ և ինքնատիպ առանձնահատկություններ ունեցող արդիական և հեռանկարային ֆերոէլեկտրիկ նյութ:

2. Ընտրվել և իրականացվել են BST-ի սինթեզման երեք եղանակներ՝ ինքնատարածվող բարձրջերմաստիճանային սինթեզ (ԻԲՍ), ցիտրատ-գել սինթեզ (ՑԳՍ) և գլիցին-նիտրատայ րման (ԳՆԱ) սինթեզ: XRD, TDX, SEM և EDS մեթոդներով հանգամանորեն հետազոտվել են ստացված վերջնական նյութերի կառուցվածքն ու բաղադրությունը:

3. Էներգախնայող, էկոլոգիապես մաքուր, արագ և պարզ սինթեզման եղանակով՝ ԻԲՍ-ով ստացված BST վերջնական նյութը ցուցաբերում է բարձր մաքրություն և կայուն պարամետրեր: Հալույթի ձևով հանդես եկող BST վերջնական նյութը մանրացնելու համար նպատակահարմար է օգտագործել ավտոմատ աղաց

Ենթամիկրոնային կամ նանոփոշենյուլթ ստանալու նպատակով: Ուսումնասիրվել են ստացված BST-ի որակի բարձրացման համար ԻԲՄ-ի պարամետրերի լավարկման, և սինթեզից հետո վակուումային թրծման ուղիները:

4. Էկոլոգիապես մաքուր և ճկուն սինթեզման եղանակով՝ ՑԳՄ-ով, ստացվել են գերբարձր մաքրության, սակայն ոչ այնքան կայուն պարամետրերով BST-ի նանոփոշենյուլթեր: ՑԳՄ-ի ամենակարևոր առավելությունն այն է, որ BST վերջնանյութն արդեն իսկ իրենից ներկայացնում է նանոչափային փոշեխառնուրդ, և լրացուցիչ մանրացման-աղացման անհրաժեշտություն չկա:

5. ԳՆԱ սինթեզի մեթոդն իրենից ներկայացնում է պարզ, ճկուն և արագ գործընթաց, որը հիմնված է մետաղական նիտրատների և գլիցինի ջրային լուծույթի գել վիճակին հասնելու, դրանից հետո այրման վրա: Այս ճանապարհով փորձ է արվել ստանալ մաքուր BST փուլ, սակայն արդյունքում վերջնանյութը պարունակել է ոչ թե BST փուլ, այլ՝ բարիումի տիտանատի և ստրոնցիումի տիտանատի առանձին փուլեր, նաև որոշ խառնուրդային օքսիդներ:

6. ԻԲՄ-ի և ՑԳՄ-ի եղանակներով սինթեզված BST փոշենյուլթից չոր մամլումով պատրաստվել են մեծ խտությամբ ($\sim 5,1$ գ/սմ³) կերամիկաներ (օդի միջավայրում, թրծման ջերմաստիճանը՝ $\sim 1300^\circ\text{C}$), ուսումնասիրվել է դրանց մակերևույթների միկրոկառուցվածքը: ԻԲՄ-ով սինթեզված BST-ի կերամիկան շատ ավելի խոշորահատիկ է ստացվել, քան ՑԳՄ-ով սինթեզվածը:

7. ԻԲՄ-ով և ՑԳՄ-ով պատրաստված BST կերամիկաների հիմքի վրա պատրաստվել են Au/BST/Au կերամիկական կոնդենսատորներ, հետազոտվել են դրանց դիէլեկտրիկ հատկությունները ջերմաստիճանային և հաճախականային լայն տիրույթներում:

ԳԼՈՒԽ 3

ԲԱՐԴՕՔՍԻԴՅՅԻՆ ՖԵՐՈԷԼԵԿՏՐԻԿ ՆԱՆՈՌԱՂԱՆՌԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱՆՔՆԵՐԻ ՍՏՅՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆ

§ 3.1. Լազերափմարել սային փոշենստեցումը և կիրառված տեղակայանքը

Լազերային տեխնոլոգիաները լայնորեն կիրառվում են գիտության և տեխնիկայի բազմաթիվ ոլորտներում: Բազմաթիվ տեխնոլոգիական գործընթացներ հիմնված են նյութի հետ լազերային ճառագայթման փոխազդեցության վրա: Հատկապես վերջին 25-30 տարիներին բավականին ուշագրավ արդյունքներ են գրանցվել լազերային տեխնոլոգիաների կիրառմամբ ամենատարբեր նյութերից, մասնավորապես՝ դիելեկտրիկներից նուրբ թաղանթների ստացման բնագավառում: Միկրո- և նանոէլեկտրոնիկայում լազերային տեխնոլոգիաներն օգտագործվում են հիմնականում բազմապիսի բյուրեղական կառուցվածք ունեցող դիելեկտրիկ շերտերի նստեցման, հարստացման, մակերևույթի մշակման և ինտեգրալ միկրոսխեմաների կառուցավորման համար [65, 66]:

Լազերային տեխնոլոգիաների կիրառմամբ նուրբ թաղանթների նստեցման ֆիզիկական եղանակներից գիտական շրջանակներում իր ուրույն կիրառությունն ունի լազերափմարել սային փոշենստեցումը (ԼԻՓ), որը թույլ է տալիս նստեցնել պրակտիկորեն ցանկացած տիպի նյութերի նուրբ թաղանթներ, մինչև իսկ օրգանական, ինչպես նաև բարձր ջերմաստիճաններում հալվող նյութերի:

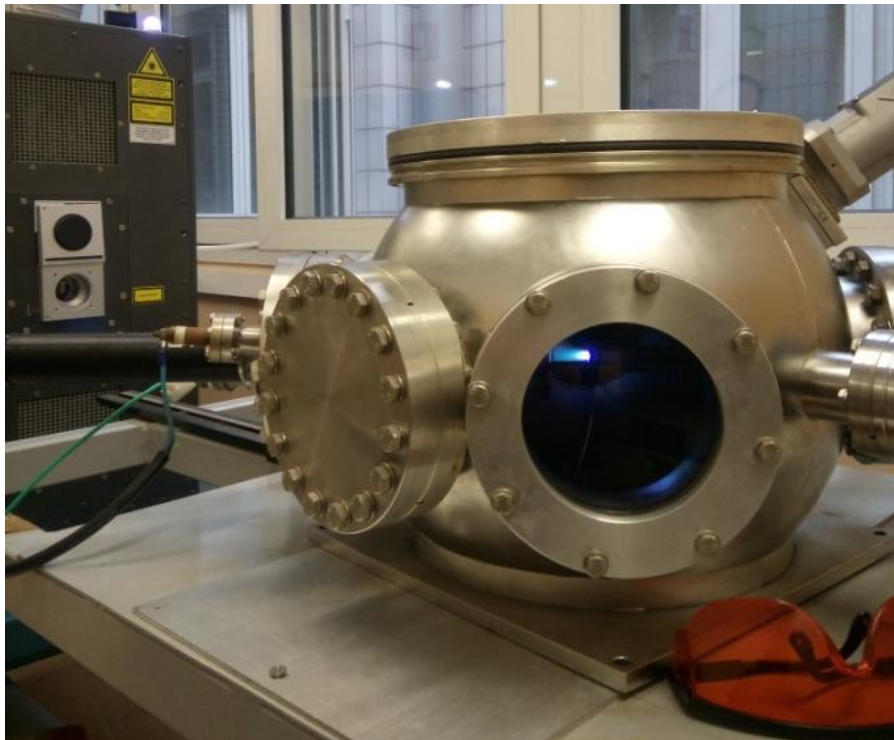
Այսպիսով, վերջին տարիներին ԼԻՓ-ը հանդես է գալիս որպես ամենաբազմազան նյութերի նուրբ թաղանթների նստեցման լայնորեն կիրառվող ըստ էության պարզ և ունիվերսալ տեխնոլոգիա [31, 67]: Գիտահետազոտական և արտադրական նպատակներով ԼԻՓ-ով նստեցվում են բարդօքսիդային նյութերի [68], համակցված օքսիդների [69, 70], կիսահաղորդիչների, պոլիմերների, նիտրիդների և շատ ուրիշ նյութերի տարբեր հաստությամբ թաղանթներ: Մասնավորապես՝ վերջին տարիներին ԼԻՓ տեխնոլոգիան բազմիցս օգտագործվել է տարբեր ՖԷ նյութերի (BST, PZT, BTO, STO և այլն) թաղանթների նստեցման նպատակով [71–73]:

ԼԻՓ-ի տեղակայանքներում սովորաբար օգտագործվում են էքսիմերային լազերներ: Աղ.3.1.1-ում ներկայացված են էքսիմերային լազերների որոշ բնութագրեր [15, 68]:

Աղյուսակ 3.1.1. ԼԻՓ-ի համար կիրառվող Էքսիմերային լազերների
նկարագրությունը

ԼԱԶԵՐ	ԱԼԻՔԻ ԵՐԿԱՐՈՒԹՅՈՒՆ	ԻՄՊՈՒԼՍԻ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅՈՒՆ
KrF	248 նմ	5...35 նվ
ArF	193 նմ	
XeF	351 նմ	

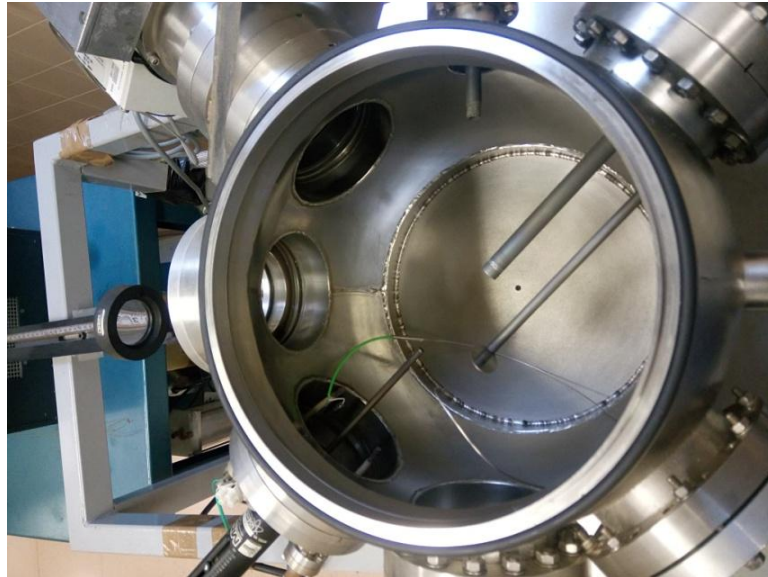
ԼԻՓ-ի տեղակայանքը բաղկացած է տուրբոմոլեկուլային պոմպով նոսրացվող խցիկից: Այն մետաղական է՝ չժանգոտող պողպատի հատուկ համաձուլվածքից, ունի հատած գնդի ձև, որի վրա առկա են բացվածքներ: Բացվածքներից երկուսում տեղակայված են քվարցե պատուհաններ, որոնցից մեկը նախատեսված է լազերային ճառագայթի դեպի ներխցիկային տարածություն ներթափանցման համար, իսկ մյուսը՝ խցիկում ընթացող գործընթացի տեսողական վերահսկողության (նկ.3.1.1):



Նկ. 3.1.1. ԼԻՓ-ի վակուումային տեղակայանքի լուսանկարը

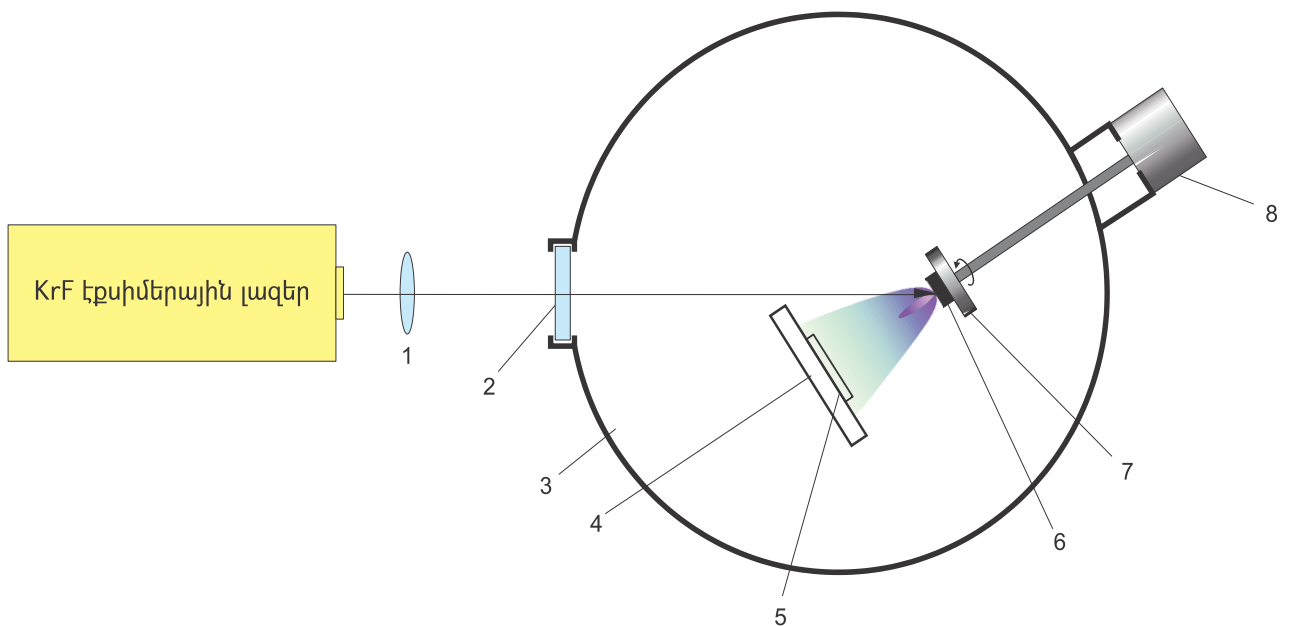
Ներխցիկային համասարքն իր մեջ ներառում է հարթակի և թիրախի հենարանները, հարթակի տաքացուցիչը (մինչև 900°C),

թիրախը պտտող հանգույցը (նկ.3.1.2 և նկ.3.1.3): Յարթակի հենարանը մետաղական սկավառակ է, որի վրա հարթակն ամրացվում է դրա դիմային կողմում: Յարթակի ջերմաստիճանի կարգավորումը կատարվում է ջերմազույգի միջոցով:



Նկ. 3.1.2. ԼԻՓ տեղակայանքի ներխցիկային համասարքի լուսանկարը

Տեղակայանքի բարձր վակուումային համակարգն աշխատում է տուրբոմոլեկուլային պոմպի և վերջինիս կցված մեխանիկական պոմպի համատեղ գործարկմամբ, որով խցիկը կարող է նոսրացվել մինչև մնացորդային ճնշման $5 \cdot 10^{-5}$ Պարսեքը:



Նկ. 3.1.3. ԼԻՓ-ի տեղակայանքի պարզեցված կառուցվածքային սխեման.

1- կիզակետող քվարցե ոսպնյակ, 2- քվարցե պատուհան, 3-վակուումային խցիկ,
 4-հարթակների տաքացվող հենարան, 5 - հարթակ, 6-թիրախ,
 7- թիրախի պտտվող (0...20 Յգ) հենարան, 8- թիրախը պտտող էլեկտրաշարժիչ
 Տեղակայանքն ունի ավտոմատ ղեկավարման ժամանակակից համակարգ, որը հնարավորություն է տալիս աշխատանքային տվյալներ ստանալ ճնշման տվիչներից, ապահովել գազային ներհոսիչի գործարկումը, ինչպես նաև հեշտությամբ կարգավորել էլեկտրամագնիսական փականների աշխատանքը՝ ապահովելով վակուումային համակարգի հանգույցների միջանկյալ փոխմիացումները:

ԼԻՓ-ի տեղակայանքում օգտագործվել է KrF էքսիմերային լազեր (LPX200, Lambda Physik, Germany), որի բնութագրերը ներկայացված են աղյուսակ 3.1.2-ում: Այն առանձին սարքավորում է, որը հովացնելու համար օգտագործվում է սառը ջուր: Ոսպնյակի միջոցով կիզակետված լազերային ճառագայթը նորմալ ինկատմամբ 45° անկյան տակ քվարցե պատուհանի միջով ընկնում է խցիկում գտնվող թիրախի վրա: Թիրախից մինչև հարթակ ընկած հեռավորությունը հնարավոր է ընտրել 1...10 սմ միջակայքում (նկ.3.1.3):

Աղյուսակ 3.1.2. KrF էքսիմերային լազերի բնութագրերը

Ալիքի երկարությունը	248 նմ
Իմպուլսի տևողությունը	20...30 նվ
Իմպուլսի էներգիան	150 մՋ
Իմպուլսների կրկնման հաճախությունը	1...10 Յգ

Տեղակայանքը, որպես այդպիսին, չունի օպտիկական կիզակետման հատուկ համակարգ, դրա ֆունկցիան կատարում է կիզակետող քվարցե ոսպնյակը: Լազերային ճառագայթի ինտենսիվությունը որոշվում է լազերի մղման մակարդակով:

Աղյուսակ 3.1.3. ԼԻՓ տեղակայանքի տեխնոլոգիական բնութագրերի արժեքները

ԲՆՈՒԹԱԳԻՐ	ԱՐՃԵՔՆԵՐ
------------------	-----------------

Թիրախի մակերեսին ճառագայթման ինտենսիվություն	1...10 Ջ/սմ ²
Յարթակի ջերմաստիճան	20...900°C
Խցիկում մնացորդային ճնշում	5·10 ⁻⁵ ...10 ⁻² Պա
Թիրախ-հարթակ հեռավորություն	1...10 սմ
Թիրախի պտտման հաճախություն	0,1...3 Յց

ԼԻՓ-ի այս տեղակայանքի հիմնական առավելություններն են՝ ավտոմատ ղեկավարումը, լազերային ճառագայթի հաճախության ու ինտենսիվության փոփոխման, հարթակի տաքացման, նստեցման ընթացքում աշխատանքային գազերի օգտագործման լայն հնարավորությունները և այլն: Տեղակայանքը հնարավորություն է ընձեռում բարձր վակուումի կամ աշխատանքային տարբեր գազերի միջավայրում

~1 սմ² մակերեսի վրա նստեցնել ԲՕՖԷ նյութերի համասեռ նուրբ թաղանթներ, որոնց հաստության անհավասարաչափությունը եզրերին 3%-ից պակաս է:

§3.2. ԼԻՓ-ով BST-ի նանոթաղանթների ստացումը

ԼԻՓ-ի տեխնոլոգիայով BST-ի նուրբ թաղանթների նստեցման տեխնոլոգիական ռեժիմները մշակվել են բազմաթիվ փորձնական հետազոտությունների արդյունքում՝ համադրելով տեխնոլոգիական արոցեսի մասկավող հիմնական բնութագրիչների (աղ.3.2.1) ամենատարբեր կոմբինացիաներ, ինչպես օրինակ, ընտրվել և իրար հետ համադրվել են հարթակի ջերմաստիճանի, թիրախ-հարթակ հեռավորության, լազերային ճառագայթի հաճախության և ինտենսիվության տարբեր արժեքներ, ինչպես նաև ներխցիկային աշխատանքային գազերի բաղադրությունն ու մասնակային ճնշումը, տարբեր հարթակները: Չափվել է BST-ի նստեցված թաղանթների հաստությունը, ուսումնասիրվել դրանց բաղադրությունը, մակերևույթի միկրոկառուցվածքը: Յիմնվելով թվարկված ուսումնասիրությունների արդյունքների վրա՝ մշակվել են BST-ի նստեցման նախընտրելի տեխնոլոգիական ռեժիմներ [74–76]:

Թաղանթները նստեցվել են ապակե, սիլիցիոնե (p-Si, $\rho=5 \text{ Օմ}\cdot\text{սմ}$), YSZ (իտրիոն մոլ կայունացված ցիրկոնիոն մի երկօքսիդ, yttria-stabilized zirconia)-ի կերամիկական, ITO (ինդիոն մանագի օքսիդ, indium tin oxide)-ի ~ 180 նմ հաստությամբ շերտով պատված ապակե (ITO-ԱՊԱԿԻ) հարթակների վրա: Նստեցումից առաջ p-Si և YSZ հարթակները մաքրվել են մաքուր ացետոնով և լվացվել թորված ջրով: ITO-ԱՊԱԿԻ հարթակները մաքրման ենթարկելու անհրաժեշտությունն չի եղել, որովհետև դրանք գտնվել են գործարանային հերմետիկ փաթեթավորման մեջ: Հարթակը խցիկում տեղակայելուց հետո բարձրվակուռումի պայմաններում դրա ջերմաստիճանը $\sim 20^\circ\text{C}$ /րոպե արագությամբ հասցվել է մինչև նստեցման համար ընտրված բարձր ջերմաստիճանին (350°C կամ 700°C)՝ այդ ընթացքում փաստացի ապահովվելով նաև հարթակի ջերմամշակումը վակուումի պայմաններում, որը ծառայում է հարթակի լրացուցիչ մաքրման նպատակին: Փորձնականորեն պարզվել է, որ թիրախ-հարթակ 3 սմ հեռավորության պարագայում ստացվում են համասեռ, խիտ և փոքրաթիվ արատներով թաղանթներ:

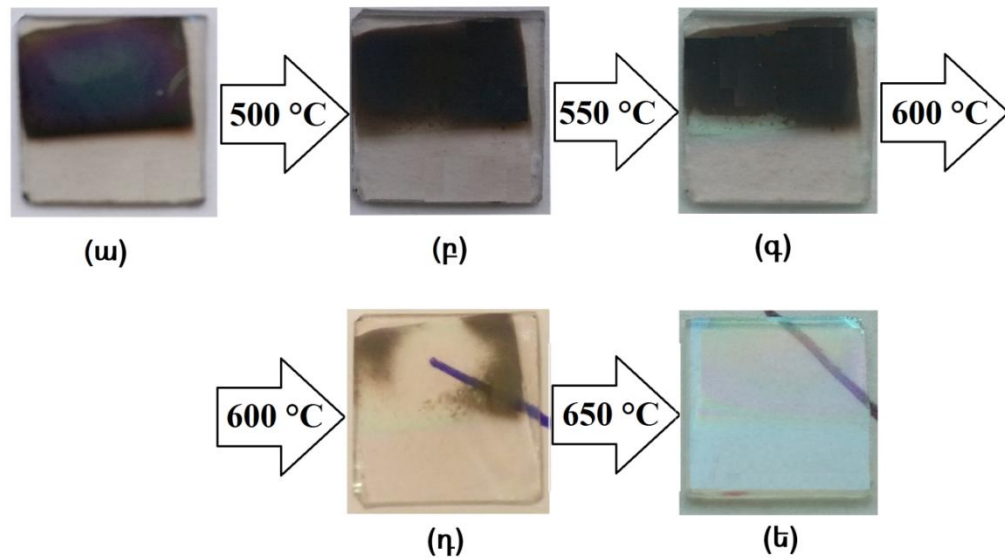
Աղյուսակ 3.2.1-ում բերված են $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ նյութի նանոթաղանթների ստացման մշակված տեխնոլոգիական ռեժիմները:

Աղյուսակ 3.2.1. $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ -ի LԻՓ-ի մշակված տեխնոլոգիական ռեժիմները

ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐ	ԱՐԺԵՔՆԵՐ
Ճառագայթման ինտենսիվություն	$5 \text{ Ջ}/\text{սմ}^2$
Իմպուլսների կրկնման հաճախությունը	10 Հց
Ճառագայթի անկման անկյուն թիրախի վրա	45°
Ճառագայթի կիզակետման մակերեսը թիրախի վրա	1 սմ^2
Հարթակի ջերմաստիճան	$25^\circ\text{C}, 350^\circ\text{C}, 700^\circ\text{C}$
Խցիկում մնացորդային ճնշում	10^{-4} Պա
Աշխատանքային գազի (Ar կամ O_2) ճնշում	20 Պա
Թիրախ-հարթակ հեռավորություն	3 սմ
Թիրախի պտտման հաճախություն	0.4 Հց

Այս ատենախոսության շրջանակներում խնդիր չի դրվել նստեցնել էպիտաքսային թաղանթներ, այլ նպատակ ենք ունեցել ստանալ ամորֆ և բազմաբյուրեղային ԲՕՖԷ նանոթաղանթներ: Վերջիններիս ընտրությունը պայմանավորված է նախ այն հանգամանքով, որ դրանք էլեկտրոնիկայում լայն կիրառություններ և հեռանկարներ ունեն, և երկրորդը՝ չնայած էպիտաքսային (միաբյուրեղային) թաղանթներն ունեն խիստ կայուն բնութագրեր, բայց դրանց ստացումը բավականաչափ բարդ գործընթաց է, որը պահանջում է նստեցվող թաղանթի նյութի բյուրեղական կառուցվածքին մոտ բյուրեղացանցով հարթակի ընտրություն, հաճախ նաև անհրաժեշտ է լինում հարթակի և նստեցվող թաղանթի միջև միջանկյալ (բուֆերային) բարակ շերտերի ստացում [27]:

Նույնիսկ թթվածնի միջավայրում նստեցված թաղանթները նստեցումից հետո ենթարկվում են թրծման թթվածնի պակասորդը վերականգնելու և թաղանթների միկրոկառուցվածքը բարելավելու նպատակով [77]: Օրինակ՝ վակուումի պայմաններում ITO-ԱՊԱԿԻ հարթակի վրա նստեցված BST թաղանթն ունի թթվածնի խիստ պակասորդ, որի մասին է վկայում թաղանթի մուգ գույնը (նկ.3.2.1 ա): Այս նմուշներում թթվածնի պակասը լրացնելու համար նստեցման ավարտից հետո կատարված թրծումների դինամիկան բերված է նկ.3.2.1-ում: Թրծումը կատարվել է օդի միջավայրում, 500...650°C ջերմաստիճաններում: Թաղանթների բաղադրության և կառուցվածքի վրա թրծման ռեժիմների ազդեցության հետազոտությունը ցույց է տվել, որ ITO-ԱՊԱԿԻ հարթակների վրա ստացված թաղանթների թրծման լավագույն ջերմաստիճանը 650°C-ն է, տևողությունը՝ երեք ժամ:



Նկ.3.2.1. BST թաղանթի վակուումում LԻՓ-ից հետո օդի միջավայրում, 500...650°C-ում (25°C փոփոխման քայլով) կատարված թրծումների դինամիկան

Հարթակի ջերմաստիճանը մեծ ազդեցություն է գործում նստեցվող թաղանթների հատկությունների վրա: YSZ հարթակների վրա որակական լավ տվյալներով թաղանթներ են ստացվել 700°C հարթակի տաքացման դեպքում, երբ ունեցել ենք BST-ի բազմաբյուրեղային թաղանթներ՝ փոքր մակերևութային անհարթություններով

(< 3 նմ): Այսպիսով, BST-ի թաղանթների հատկությունները հետազոտվել են հարթակի 700°C ջերմաստիճանի դեպքում YSZ հարթակների վրա նստեցված 50...700 նմ հաստություններով նուրբ թաղանթային նմուշների համար:

p-Si հարթակների վրա նստեցված BST-ի թաղանթների համար թրծման նախընտրելի ջերմաստիճանը 600°C-ն է՝ 2,5...3 ժամ տևողությամբ: Արդյունքում ունենում ենք 3 նմ միջին-քառակուսային անհարթությամբ BST-ի ամորֆ և բազմաբյուրեղային թաղանթներ: 600°C-ից բարձր թրծման ջերմաստիճաններում նկատվել է թաղանթի նյութերի դիֆուզիադեպի հարթակը [74, 76]:

§3.3. BST-ի նանոթաղանթների բաղադրության ու կառուցվածքի հետազոտումը

Նստեցված թաղանթների հաստությունը, բաղադրությունը, մակերևույթն ու միկրոկառուցվածքը փորձնականորեն հետազոտվել են աղյուսակ 3.3.1-ում բերված եղանակներով.

Աղյուսակ 3.3.1.

ՉԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿԸ	ԻՆՉ ՆՊԱՏԱԿՈՎ Է ԿԻՐԱՌԿԵԼ
պրոֆիլոմետրիա	թաղանթի հաստության չափում
ռենտգենյան դիֆրակտոգրամ (GIXRD)	թաղանթի բաղադրության և բյուրեղական կառուցվածքի հետազոտում
Էներգադիսպերսիոն ռենտգենյան սպեկտրոսկոպիա (EDS)	թաղանթի բաղադրության և համատեղության հետազոտում
ռենտգենյան միկրոֆլուորեսցենցիա (μ XRF)	
ռենտգենյան ֆոտոէլեկտրոնային սպեկտրոսկոպիա (XPS)	
տեսածրող էլեկտրոնային մանրազննում (SEM)	թաղանթի մակերևույթի հետազոտում

Ստորև հերթականությամբ հանգամանալից անդրադառնանք թվարկված մեթոդներին և ստացված արդյունքներին:

BST նանոթաղանթների հաստությունները չափվել են “KLA-Tencor Alpha-Step D-100” նանոմետրական թույլատրող ունակությամբ պրոֆիլոմետրով (նկ 3.3.1): Այս սարքը հնարավորություն է ընձեռում գերբարձր ճշգրտությամբ չափել 10Å-ից մինչև 1մմ հաստությամբ նմուշների հաստությունները:

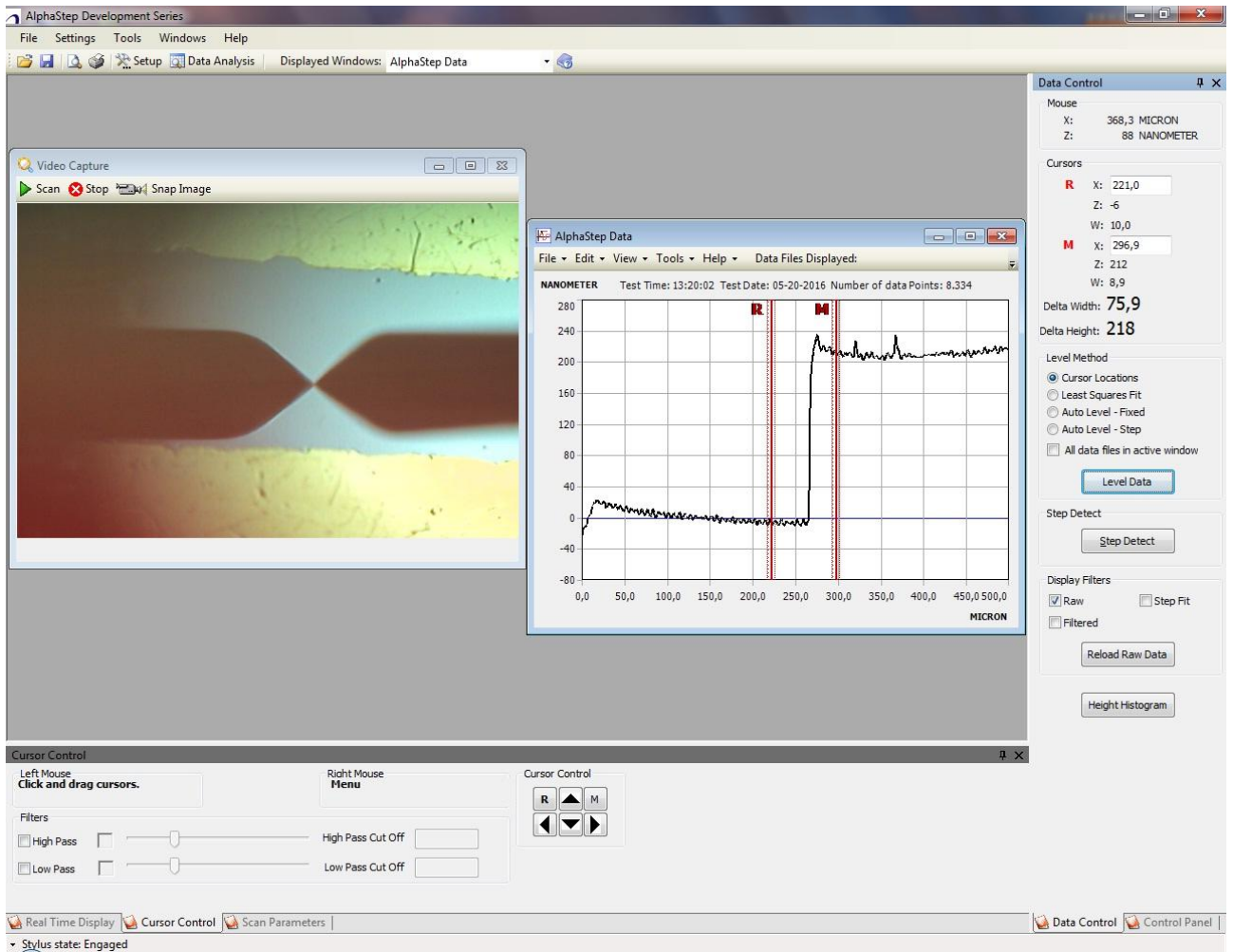


Նկ.3.3.1. KLA-Tencor Alpha-Step D-100 պրոֆիլոմետրի լուսանկարները

Պրոֆիլոմետրն անմիջականորեն միացված է անհատական համակարգչին (PC): “AlphaStep Development Series, Software Version 2.0” համակարգչային ծրագիրն օգտագործելով՝ կարելի է հեշտությամբ կարգավորել չափման պարամետրերը, այնուհետև մշակել չափման արդյունքները, ինչպես նաև հնարավոր է չափումից առաջ և դրանք նթացքում համակարգչի էկրանին տեսնել հետազոտվող նմուշի և պրոֆիլոմետրի միասին փոխդասավորության տեսապատկերը (վիդեո ռեժիմով), ինչը չափազանց պարզ է դարձնում չափման գործընթացը (նկ.3.3.2): Յուրաքանչյուր չափումից հետո չափիչ միասնը վերադառնում է իր նախնական դիրքին՝ հնարավորություն տալով հետազոտվող նմուշի միևնույն հատվածում չափումը կրկնել մի քանի անգամ, ինչը նպաստում է չափման առավելագույն ճշտության և ապահովելու:

“AlphaStep Development Series” ծրագիրը, կախված հետազոտվող նմուշի չափերից, թույլ է տալիս ընտրել տարբեր չափման միջակայքեր (ռեժիմներ): Նվազագույն և առավելագույն չափման միջակայքերն են, համապատասխանաբար, 2,5 մկմ-ը և 1,2 մմ-ը:

2,5 մկմ ռեժիմի ընտրման դեպքում հաստության չափման թույլատրող նակությունն ավելի քան 1 անգամ տեմ (Å) է, իսկ 1,2 մմ-ի դեպքում՝ 100 նմ: Իհարկե ճշգրիտ չափումներ հնարավոր է իրականացնել հետազոտվող թաղանթի լավորակ եզրի (ուղղահայաց աստիճանի՝ պրոֆիլի) առկայության, ինչպես նաև միշտ քարտափն պայմանների առկայության դեպքում՝ հետազոտվող նմուշի հորիզոնականություն, հարթ մակերևույթ, մաքուր և արտադրամիջավայր, ցնցումներից առավելագույնս զերծ աշխատատեղան և այլն:



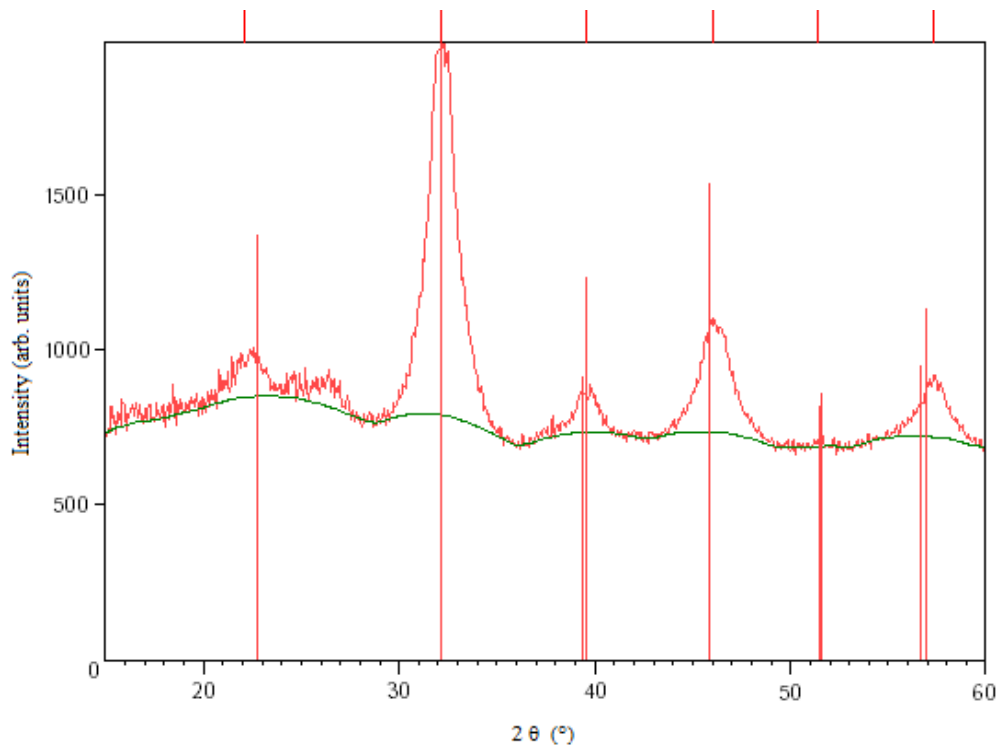
Նկ.3.3.2. “AlphaStep Development Series, Software Version 2.0” համակարգչային ծրագրային փաթեթի աշխատանքային պատուհանը

BST նանոթաղանթների փուլային բաղադրության (BST ֆազ) մասին փորձնական տեղեկություններից որոշները ստացվել են նուրբ թաղանթների հետազոտման համար նախատեսված Grazing incident X-ray diffraction (GIXRD) մեթոդով, որը թույլ է տալիս տեղեկություններ ստանալ միմիայն նստեցված նուրբ թաղանթի մասին առանց գրանցելու հարթակի ազդանշանները [10, 78]: Այս հանգամանքը թույլ է տալիս առանց կասկածի պարզել, թե ինչ բաղադրություն ու կառուցվածք ունի հենց նստեցված նուրբ թաղանթը, ինչը և փաստացի տվյալ դեպքում հանդիսանում է մեր հետազոտության առարկան:

GIXRD մեթոդով չափումներն իրականացվել են “Bruker D8 Advance” դիֆրակտոմետրի միջոցով, որը բաղկացած է Cu-ի խողովակից, ընկնող ճառագայթի Ge (111) մոնոքրոմատորից ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) (2 մմ տրամագծով ֆիքսված անցքով) և Sol-X էներգոդիսպերսիվ դետեկտորից (0,6 մմ

տրամագծով ֆիքսված անցքով): Տվյալները ստացվել են 2θ -ի $15\text{--}60^\circ$ արժեքների միջակայքում 450 վայրկյանում $0,05^\circ$ քայլով: Օգտագործվել են ընկնող ճառագայթի՝ հարթակի նկատմամբ տարբեր անկյուններ՝ $0,2^\circ$; $0,5^\circ$; 1° և $1,5^\circ$, որպեսզի պարզվի, թե որ անկյան դեպքում է, որ ինտենսիվ տվյալներ են ստացվում հենց միայն BST թաղանթից, այլ ոչ թե թաղանթից ու հարթակից:

BST-ITO-ԱՊԱԿԻ նուրբթաղանթային հետերոկառուցվածքի BST նանոթաղանթից GIXRD մեթոդով ստացված ռենտգենյան դիֆրակցիոն պատկերը ներկայացված է նկ.3.3.3-ում:



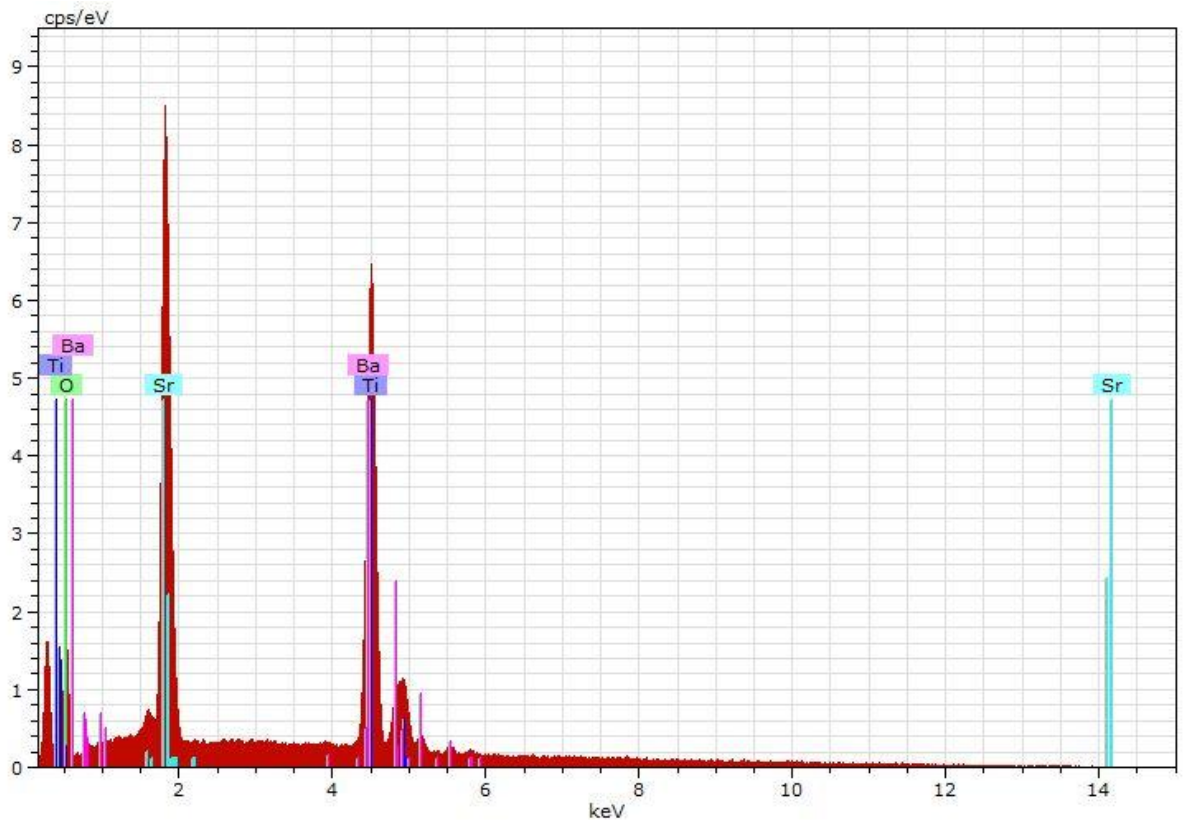
Նկ.3.3.3. ITO-ԱՊԱԿԻ հարթակի վրա L հոֆ-ով ստացված BST նանոթաղանթից GIXRD մեթոդով ստացված ռենտգենյան դիֆրակցիոն պատկերը

Ստացված պիկերը լավ համապատասխանության մեջ են BST բարոքսիդային ՖԷ նյութը բնութագրող PDF 00-039-1395 գրադարանային ֆայլի հետ, հետևապես կարելի է փաստել, որ հետազոտվող նմուշում գործ ունենք ձևավորված BST փուլով բազմաբյուրեղային նանոթաղանթի հետ:

L հոֆ-ով ստացված BST նանոթաղանթների մորֆոլոգիայի (SEM) և բաղադրության հետազոտումը (EDS), ինչպես նաև պրոֆիլոմետրով չափված հաստության ստուգումն իրականացվել են “HITACHI TM3000 Tabletop Microscope” տեսածրող էլեկտրոնային մանրադիտակով (նկ.2.3.5):

Այս սարքով հետազոտություններ կատարելիս, կախված էլեկտրոնների էներգիայից՝ փոխվում է թափանցման խորությունը, հետևապես ռենտգենյան ալիքների ճառագայթող տիրույթի խորությունը: Էլեկտրոնների էներգիայի մեծացումը հանգեցնում է թափանցման խորության մեծացմանը: Նուրբ թաղանթների հետազոտման ժամանակ էլեկտրոնների էներգիայի տարբեր արժեքների դեպքում ստացվում են տարբեր բաղադրություններ: Այդ տվյալերի վերլուծությամբ հնարավոր է ստանալ թաղանթի և հարթակի նյութերի առանձին բաղադրությունները:

Բաղադրության EDS հետազոտությունները կատարվել են արագացնող 15 կՎ լարման դեպքում: Լարման այս արժեքն ավտոմատ կերպով առաջարկվում է Hitachi TM3000 ծրագրային փաթեթի կողմից: Նկ. 3.3.4-ում բերված է թաղանթի EDS սպեկտրը: Արդյունքների մշակումը կատարվել է թաղանթների հետազոտական STRATAGEM ծրագրով: Թաղանթների բաղադրության հետ կապված տվյալներն ստացվել են նյութերի էտալոնային սպեկտրների հետ համակարգչային համեմատության միջոցով: Թաղանթի բաղադրությունն առանձնացնելու նպատակով մինչև L α -ն առանձին հետազոտվել է հարթակի բաղադրությունը, որի բաղադրատարրերն անտեսվել են թաղանթի բաղադրության վերլուծության ընթացքում:



Նկ. 3.3.4. BST նանոթաղանթի ռենտգենյան ճառագայթման սպեկտրը

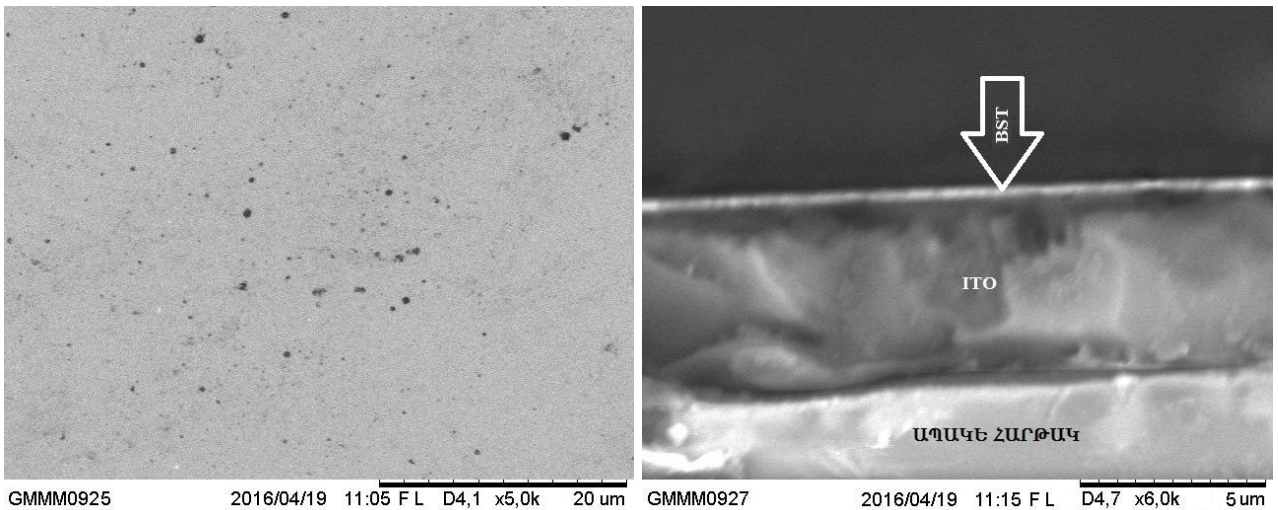
BST-ի կերամիկական թիրախի ու թաղանթի բաղադրության ուսումնասիրության արդյունքների հիման վրա պարզվել է, որ թիրախներն ու թաղանթներն ունեն նույնական բաղադրություններ. BST փուլից Ba-ի, O-ի չնչին շեղումներ են հիմնականում առկա: Դրանք կազմում են ~1% թիրախի և ~1.5% թաղանթի դեպքում: BST թաղանթի 300 նմ հաստության դեպքում թաղանթի խտությունը կազմել է ~5 գ/սմ³:

Չնայած նյութերի բաղադրության հետազոտման EDS մեթոդի և “HITACHI TM3000 Tabletop Microscope” սարքավորման ճշգրիտ լինելուն, ամեն դեպքում, EDS-ի միջոցով ստացված արդյունքները համեմատվել են ռենտգենյան միկրոֆլուորեսցենցիայի (μ XRF) մեթոդով ստացված արդյունքների հետ: μ XRF մեթոդով չափումներն իրականացվել են “FISCHERSCOPE X-RAY SYSTEM XDAL” սարքի միջոցով, որը թեև որոշ նյութերի (օրինակ՝ Ba-ի, O-ի) նկատմամբ բավարարողականություն չի ցուցաբերում, սակայն BST-ի մյուս բաղադրատարրերի (Sr, Ti) հետազոտման համար լավ գործիք է: μ XRF մեթոդով չափումների տվյալները փաստել են EDS մեթոդով չափման արդյունքների ճշգրտությունը:

Թաղանթների մակերևույթների միկրոկառուցվածքը հետազոտվել է արագացնող 5 կՎ լարման ռեժիմում: Ըստ կատարված ուսումնասիրությունների, մինչև թրծվելը թաղանթներն ունեն ամորֆ կամ ամորֆ+բազմաբյուրեղային կառուցվածք: Մշակված ռեժիմներով թրծումից հետո դրանք ձեռք են բերում բազմաբյուրեղային կառուցվածք: Ստացված թաղանթները ԴԷ են, այդ է պատճառը, որ SEM-ով դրանց հետազոտման ժամանակ բարդություններ են առաջանում, մասնավորապես՝ լիցքի կուտակումը խոչընդոտում է էլեկտրոնների դիֆրակցիոն պատկերների ճշգրիտ վերարտադրությանը, հետևաբար ստացված պատկերները ոչ մեծ շեղումներ են պարունակում:

Նկ.3.3.5-ում բերված են ITO-ԱՊԱԿԻ հարթակի վրա փոշենստեցված BST նանոթաղանթի մակերևույթի (ա) և լայնական հատույթի (բ) տեսածրող էլեկտրոնային մանրադիտակով ստացված պատկերները, որոնցից երևում է, որ թաղանթների մակերևույթին առկա են որոշակի քանակությամբ ~0,1 մկմ չափերի հատիկներ (բլրակներ), որոնք առանձնանում են ընդհանուր թաղանթից:

Այդպիսի խոշոր մասնիկների առկայությունը հետևանք է ԼԻՓ-ի գործընթացի յուրահատկության: Դրանք կարող են վերացվել ֆիլտրերի կիրառմամբ:



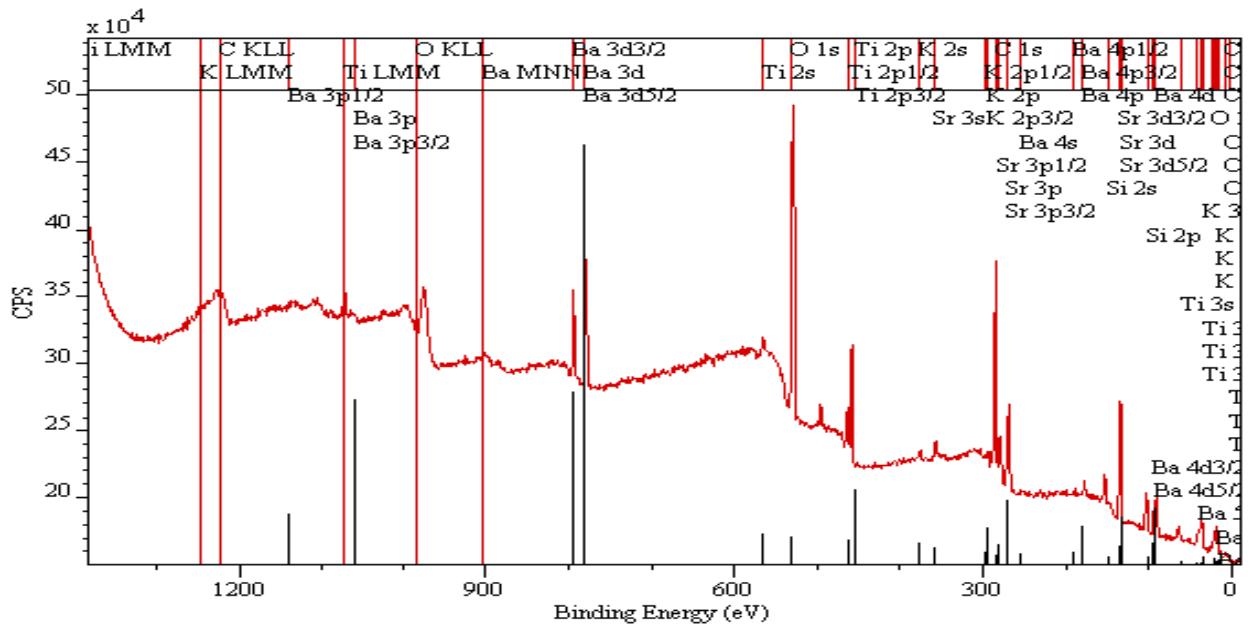
(ա)

(բ)

Նկ.3.3.5. BST-ITO-ԱՊԱԿԻ նուրբթաղանթային հետերոկառուցվածքի (ա) մակերևույթի և (բ) լայնական հատույթի SEՄ պատկերները

Ստացված թաղանթների մակերևույթի մոնիթորինգային հետազոտությունները ցույց են տվել, որ դրա վրա մեծ ազդեցություն է թողնում նստեցման պրոցեսում հարթակի ջերմաստիճանը և թրծման ջերմաստիճանը:

Նկ.3.3.6-ում ստացված տվյալների վերլուծությամբ պարզվել է, որ BST-ի թաղանթի մակերևույթի (~40...50 նմ խորության վրա) ստեխիոմետրիան չնչին չափով է շեղված (~1...3%) ԼԻՓ-ում օգտագործված $Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO_3$ կերամիկական թիրախի ստեխիոմետրիայից:



Նկ.3.3.6. $Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO_3$ բաղադրությունը թիրախից ITO-ԱՊԱԿԻ հարթակի վրա ԼԻՓ-ով ստացված թաղանթի (~400 նմ) մակերևույթի XPS հետազոտության քննարկումը և քանակաչափերը

XPS-ն իրականացվել է թաղանթի մակերևույթի տարբեր հատվածներում: Գնահատվել է, որ 600°C-ում, օդի միջավայրում թրծված BST-ITO-ԱՊԱԿԻ նմուշի BST թաղանթը մակերևույթի մինչև 50 նմ խորության վրա պրակտիկորեն համասեռ է:

§ 3.4. Եզրակացություններ երրորդ գլխի վերաբերյալ

1. Մշակվել են BST բարոքսիդային ՖԷ նյութի թաղանթների ստացման ԼԻՓ-ի տեխնոլոգիական ռեժիմները: Թաղանթները նստեցվել են սիլիցիոնումե (p-Si), կերամիկական YSZ, ITO-ապակի հարթակների վրա, ստացվել են ամորֆ և բազմաբյուրեղային 50-ից 700 նմ հաստությամբ թաղանթներ: Հետազոտվել են տեխնոլոգիական

ռեժիմների ազդեցությունը ստացված թաղանթների բաղադրության, միկրոկառուցվածքի և մակերևույթի մորֆոլոգիայի վրա:

2. Թաղանթները նստեցվել են լազերային ճառագայթի $\sim 5 \text{ Զ/սմ}^2$ ինտենսիվությամբ, 10^{-4} Պա մնացորդային ճնշման պայմաններում՝ վակուումում, արգոնի և թթվածնի միջավայրերում: Թաղանթի նստեցման միջին արագությունը $\sim 0.4 \text{ նմ/վ է}$:

3. ITO-ապակի հարթակների վրա լավագույն ստեխիոմետրիայով և միկրոկառուցվածքով թաղանթներ ստացվում են հարթակի ջերմաստիճանի 300°C -ի դեպքում, արգոնի միջավայրում: 650°C -ում թրծելուց հետո թաղանթները ունեցել են 4 նմ միջին քառակուսային անհարթություն:

4. Սիլիցիումե հարթակների վրա թթվածնի միջավայրում, 200°C -ում ստացված և 600°C -ում թրծված թաղանթներն ունեն 3 նմ միջին քառակուսային անհարթություն: Այսպիսի թաղանթները կարող են օգտագործվել կոնդենսատորային կառուցվածքների ստացման համար:

5. Գտնվել են LiF -ի օպտիմալ տեխնոլոգիական ռեժիմները ցանկալի ստեխիոմետրիայով և միկրոկառուցվածքով թաղանթների ստացման համար, որոնք համատեղելի են կիսահաղորդչային TiO_2 -ների ստացման տեխնոլոգիայի հետ:

6. LiF տեխնոլոգիան արդյունավետորեն կիրառվել է BST բարդօքսիդային ՖԷՆյութից տարբեր հարթակների վրա թաղանթների ստացման համար, որոնք օգտագործվել են մետաղ-ՖԷ-մետաղ նանոթաղանթային կառուցվածքների ստացման համար:

ԳԼՈՒԽ 4

Մ-ՖԷ-Մ ՆԱՆՈԹԱՂԱՆԹԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՆԵՐԻ

ՍՏՍՏԻԿ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ

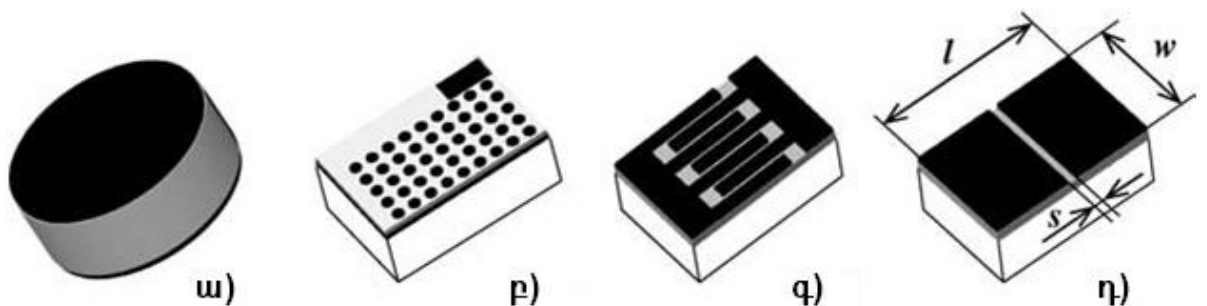
§ 4.1. Մ-ՖԷ-Մ նանոթաղանթային կառուցվածքների ստացումը

Մետաղ-ՖԷ-մետաղ (ինչպես նաև առհասարակ հաղորդիչ-ՖԷ-հաղորդիչ) նուրբ թաղանթային հետերոկառուցվածքները, սովորաբար, կիրառվում են ոչ միայն որպես կոնդենսատորներ (վարակտորներ) [26, 79], մեմրիստորներ [10,

80], տարաբևույթ տվիչներ [81], այլ նաև համալարելի (tunable) ԴԵ նյութերի բնութագրերի չափման նպատակով:

Հայտնի են մետաղ-Ֆերոէլեկտրիկ-մետաղ (Մ-ՖԷ-Մ) կոնդենսատորային կառուցվածքների տարբեր տեսակներ, որոնցից մի քանիսը բերված են նկ.4.1.1-ում: Այդ կառուցվածքները կարող են պատրաստվել՝ ՖԷ հիմնանյութի (bulk material) վերին և ստորին մակերեսները զուգահեռ էլեկտրոդներով ծածկելով (նկ.4.1.1.ա) կամ նստեցնելով փոքրաչափ վերին էլեկտրոդներ այնպիսի ՖԷ թաղանթի վրա, որն իր ողջ մակերեսով նստած է ստորին ընդհանուր էլեկտրոդի վրա (նկ.4.1.1.բ): Ցածր ունակությամբ կոնդենսատորները, որոնք ավելի հարմար են բարձր հաճախականային չափումների համար, կարող են պատրաստվել հաստ կամ նուրբ ՖԷ թաղանթների վրա սանրած և (նկ.4.1.1.գ) կամ օդային շերտով առանձնացված ուղղանկյունաձև (նկ.4.1.1.դ) էլեկտրոդներ նստեցնելով: Վերջին երկու տեսակի կոնդենսատորները (հաճախ կոչվում են «*սլանար կոնդենսատորներ*») պատրաստվում են ՖԷ թաղանթի միայն վերին մակերեսի վրա մետաղական էլեկտրոդներ նստեցնելով:

Ցածր հաճախությունների դեպքում զուգահեռ շրջադիրներով ՖԷ կոնդենսատորը (նկ.4.1.1. ա, բ) նկարագրվում է էլեկտրական պարզ համարժեք սխեմայով, որը բաղկացած է իրար զուգահեռաբար միացված ունակությունից (C_p) ու հաճախությունից կախված դիմադրությունից (R_p) և հաջորդական դիմադրությունից, որը պայմանավորված է էլեկտրոդներում հաղորդական կորուստներով [82–84]: Մինչև մի քանի ՄՀց հաճախական տիրույթում չափումները կարող են իրականացվել իմպեդանսային անալիզատորով, որն ուղղակիորեն չափում է ունակության և կորստյան անկյան տանգենսի արժեքները:



Նկ.4.1.1 ՖԷ կոնդենսատորների տարբեր տեսակներ.

(ա) գուգահեռ շրջադիրներով կերամիկական, (բ) գուգահեռ բազմակի շրջադիրներով թաղանթային, (գ) սանրածև շրջադիրներով թաղանթային և (դ) միջէլեկտրոդային օդային բացակով ալևանար թաղանթային (սևով ներկայացված են հաղորդիչ էլեկտրոդները, մոխրագույնով ՖԷ նյութը, իսկ սպիտակով՝ հարթակը) [44]

Առավել բարձր հաճախություները պահանջում են շղթայական անալիզատորի կիրառում, որպեսզի հնարավոր լինի չափել կոմպլեքս անդրադարձման գործակիցը (S_{11}): Այս դեպքում կորստյան անկյան տանգենսը և ունակություները հաշվարկվում են ըստ հետևյալ բանաձևի.

$$\tan \delta \cdot \omega C + j\omega C = \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{1-S_{11}}{1+S_{11}},$$

որտեղ ω -ն փոփոխական դաշտի անկյունային հաճախություներն է, C -ը՝ չափված ունակություները, $\tan \delta$ -ն՝ կորստյան անկյան տանգենսը, $Z_0=50$ Օ:

Անհրաժեշտ է հաշվի առնել կորուստներն էլեկտրոդներում (R_S), որն իրականացվում է՝ հանելով հաղորդական կորուստների բաղադրիչն ըստ հետևյալ բանաձևի.

$$\varepsilon''/\varepsilon = \tan \delta_{\text{ՖԷ}} = \tan \delta_{\text{չափ}} - \omega R_S C_p,$$

որտեղ $\tan \delta_{\text{ՖԷ}}$ -ն ՖԷ նյութի կորստյան անկյան տանգենսն է, $\tan \delta_{\text{չափ}}$ -ը՝ կոնդենսատորի չափված կորստյան անկյան տանգենսը: R_S պարամետրը կարող է հաշվարկվել անալիտիկորեն [82, 83] կամ էլ՝ որոշվել փորձնականորեն [84]:

Չուգահեռ շրջադիրներով կոնդենսատորի հարաբերական դիէլեկտրիկ թափանցելիություները ՖԷ նյութի համար կարելի է դուրս բերել չափված ունակության արժեքից՝ օգտագործելով հետևյալ պարզ բանաձևը.

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot S},$$

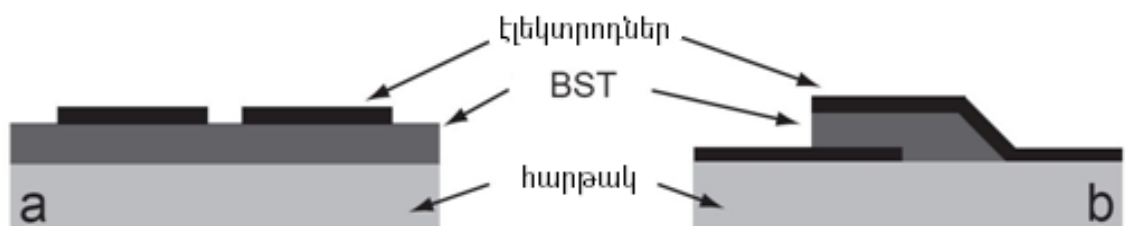
ուր C-ն չափված ունակությունն է, d-ն՝ չափանմուշի հաստությունը, S-ը՝ էլեկտրոդի մակերեսը:

Պլանար կոնդենսատորային կառուցվածքների (նկ.4.1.1. գ, դ) մոդելավորումն առավել բարդ է: Դրանում անհրաժեշտ է հաշվի առնել էլեկտրական դաշտի բաշխվածությունը ՖԷ շերտում, հարթակում և օդում: Այսպես կոչված կոնֆորմալ արտապատկերման մոտեցման (conformal mapping technique) հիման վրա մշակված են մաթեմատիկական մոդելներ սանրածև [85] և օդային բացակով առանձնացված [86] էլեկտրոդներով կոնդենսատորների համար:

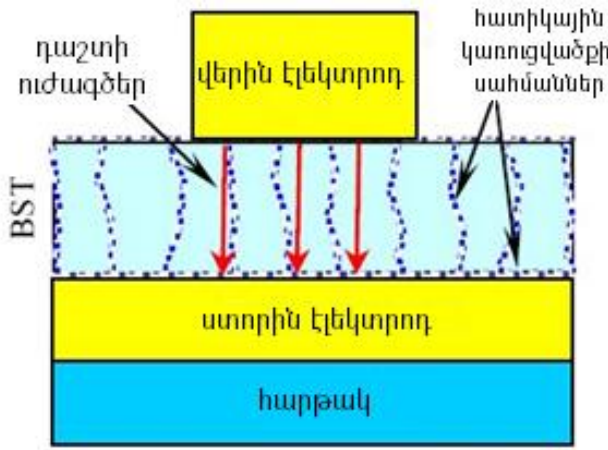
Չուգահեռ շրջադիրներով (ՉԾ) և պլանար ՖԷ կոնդենսատորների (վարակտորների) (նկ. 4.1.2. ա) բնութագրերը մեծապես կախված են դրանցում հանդես եկող ՖԷ թաղանթների միկրոկառուցվածքից: Օրինակի համար միևնույն ՖԷ թաղանթի վրակառուցված ՉԾ և պլանար վարակտորների բնութագրերը կարող են տարբերվել ոչ միայն դրանց չափերի տարբերության, այլ նաև՝ ՖԷ թաղանթի սյունածև միկրոկառուցվածք ունենալու պատճառով (նկ. 4.1.2. բ):

ՉԾ վարակտորների դեպքում էլեկտրական դաշտի ուժագծերը գուգահեռ են ՖԷ նյութի միկրոկառուցվածքային սյուների, այնինչ վերջիններիս ուղղահայաց են պլանարի դեպքում՝ փաստացի հատելով միջսյունային տարածությունները, որոնք էլ իրենց ունակությամբ փաստացի ազդում են ընդհանուր դիէլեկտրիկ բնութագրերի վրա:

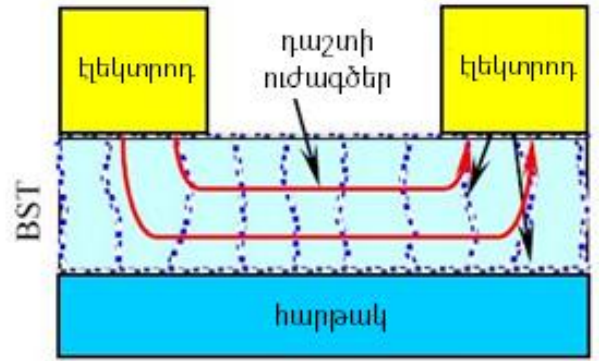
Ստացվում է, որ բարդօքսիդային ՖԷ թաղանթների որակը կախված է ոչ միայն քիմիական բաղադրությունից և ստեխիոմետրիայից (օրինակ, x-ը $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ -ի մեջ), այլև դրա բյուրեղական կառուցվածքից, ինչն էլ մեծապես կախված է թաղանթների ստացման տեխնոլոգիայից: Վերջինից է կախված, թե թաղանթներում ինչ չափով արտահայտված կլինեն միջբյուրեղական շերտերը և լարվածությունները դրանց միջև:



(ա)



(a)

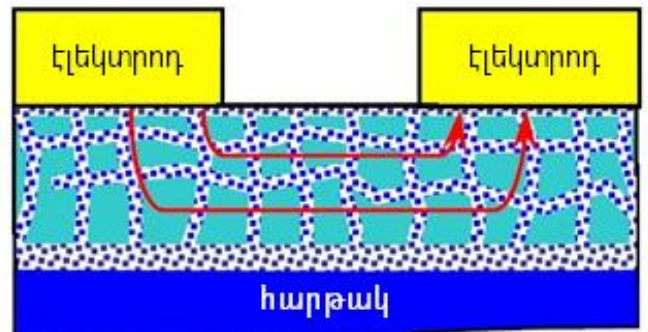
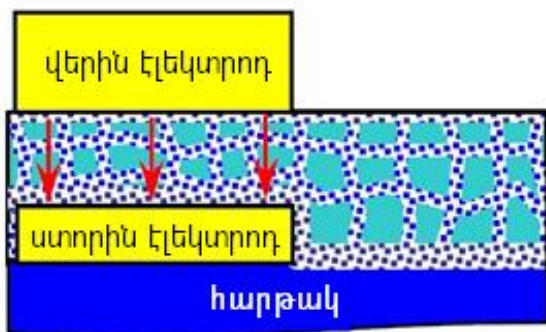


(b)

(բ)

Նկ. 4.1.2. (ա) BST թաղանթի վրակառուցված (a) գուգահեռ շրջադիրներով և (b) պլանար վարակտորների սխեմատիկ ներկայացումը; **(բ)** միևնույն (ա) սխեման՝ սյունաձև միկրոկառուցվածք ունեցող BST թաղանթի պարագայում

Եթե ՖԷ թաղանթն ունի հատիկային միկրոկառուցվածք, ապա մեծ հաշվով էական է՝ գործ ունենք ՉԾ, թե պլանար կոնդենսատորային կառուցվածքների հետ, քանի որ արտաքին դաշտի ուժագծերը հանդիարում են հավասարազոր արգելքների [79], ինչպես որ ցույց է տրված նկ. 4.1.3-ում:



Նկ. 4.1.3. Հատիկային միկրոկառուցվածքով ՖԷ թաղանթները **(ա)** գուգահեռ շրջադիրներով և **(բ)** պլանար վարակտորներում (էլեկտրական դաշտի ուժագծերը ցույց են տրված սլաքներով)

Մ-ՖԷ-Մ նանոթաղանթային կառուցվածքների ստացման համար օգտագործել ենք նուրբթաղանթների նստեցման հետևյալ տեխնոլոգիաները՝

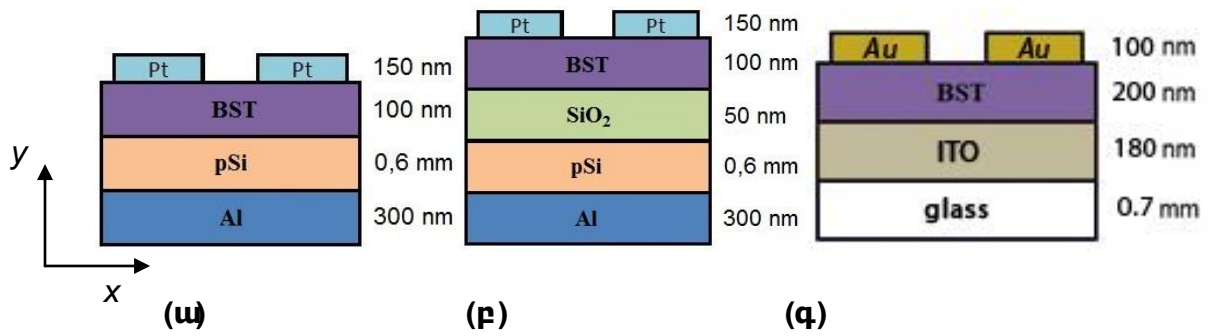
- Լ ազերափմաբուլ սային փոշենստեցում (ԼԻՓ),
- պլազմային փոշենստեցում (ՊՓ):

Որպես ՖԷ նյութ ընտրվել է բարիում-ստրոնցիումի տիտանատը (BST) (տե՛ս Գլուխ 2-ը), որի նանոթաղանթները ստացվել են ԼԻՓ-ով (տե՛ս Գլուխ 3-ը): Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի մետաղական (Pt, Au) էլեկտրոդների պատրաստման համար, հենվելով ՅԱՊՅ ՄԿԲՍ ամբիոնի Լաբորատորիաներում մեր իրականացրած փորձարարական հետազոտությունների վրա [87–89], ընտրվել է ՊՓ-ի մեթոդը: Կոնտակտները ստացվել են՝ օգտագործելով «Quorum» Ֆիրմայի «Q150T S» պլազմային փոշենստեցման համակարգը (նկ.4.1.4): Այս սարքի միջոցով մեկ տեխնոլոգիական ցիկլի ընթացքում հնարավոր է նստեցնել ֆիքսված հաստություններիով (մոտավորապես 20նմ, 40նմ և 100նմ) մետաղական (Au, Ag, Pt և այլն) թաղանթներ՝ փոփոխելով կատոդի շղթայով հոսող հոսանքի արժեքները: Նստեցվող թաղանթի հաստությունը հնարավոր է կարգավորել՝ փոփոխելով նակվակուումային խցիկ բաց թողնվող ռեակտիվ գազի (N₂) հոսքը:



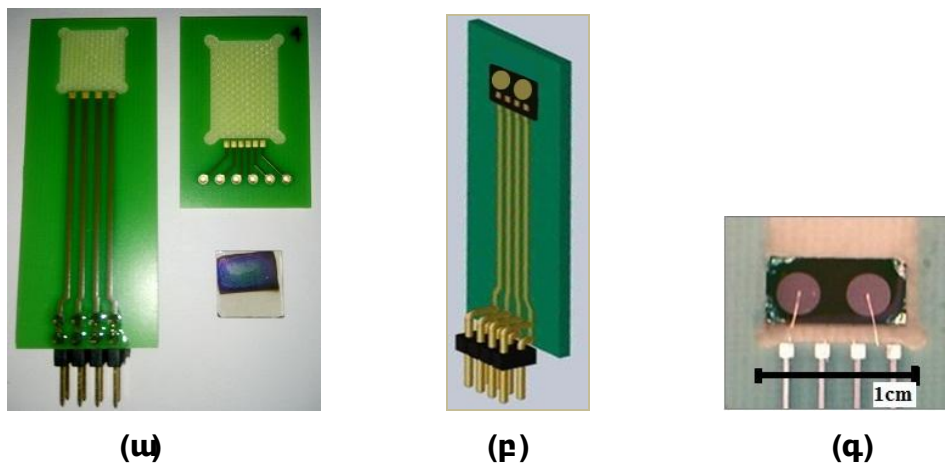
Նկ. 4.1.4. «Quorum» Ֆիրմայի «Q150T S» մակնիշի բարձր թույլ ատրոդունակությամբ տերբոմոլեկուլային արմարով պլազմային փոշենստեցման սարքի և նստակարները

Մ-ՖԷ-Մ նանոթաղանթային կառուցվածքներ ստանալու նպատակով մեր կողմից ՊՓ-ով նստեցվել են 100...150նմ հաստությամբ և տարբեր տրամագծերով ոսկյա ու պլատինե շրջանաձև էլեկտրոդներ (նկ. 4.1.5):



Նկ. 4.1.5. Լ ԻՓ-ի մեթոդով պատրաստված **(ա)** Pt – $Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO_3$ – pSi – Al, **(բ)** Pt – $Ba_{0,31}Sr_{0,69}TiO_3$ – SiO_2 – pSi – Al և **(գ)** Au – $Ba_{0,2}Sr_{0,8}TiO_3$ – ITO – glass նանոթաղանթային կառուցվածքների կտրվածքների տեսքերը կողքից

Էլեկտրական չափումներ իրականացնելու համար հետազոտվող նմուշներն ամրացվել են տպասալիկի վրա, որից հետո միկրոզոդման միջոցով ստացվել են անհրաժեշտ էլեկտրական միացումները (ոսկյաբարակ լարերով) նկ.4.1.6:

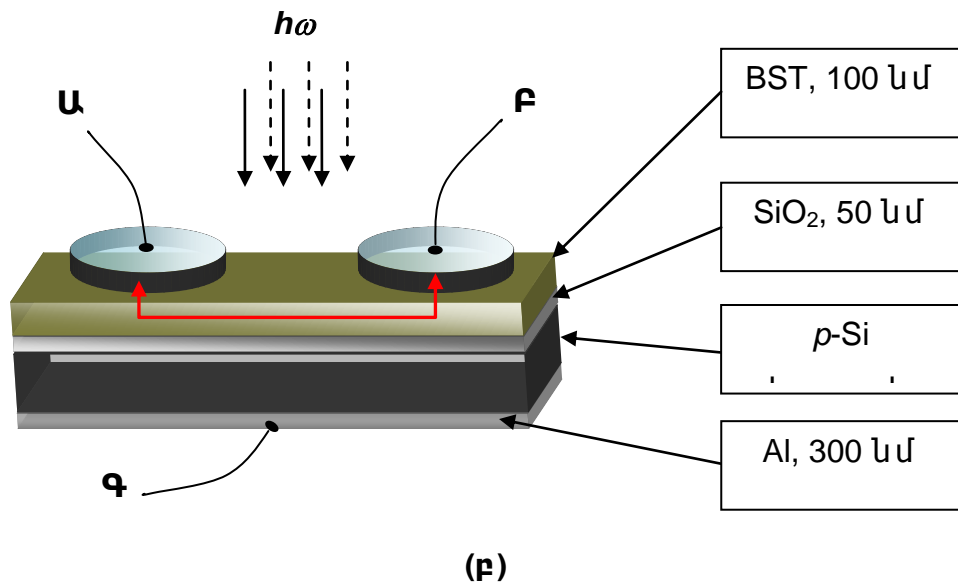
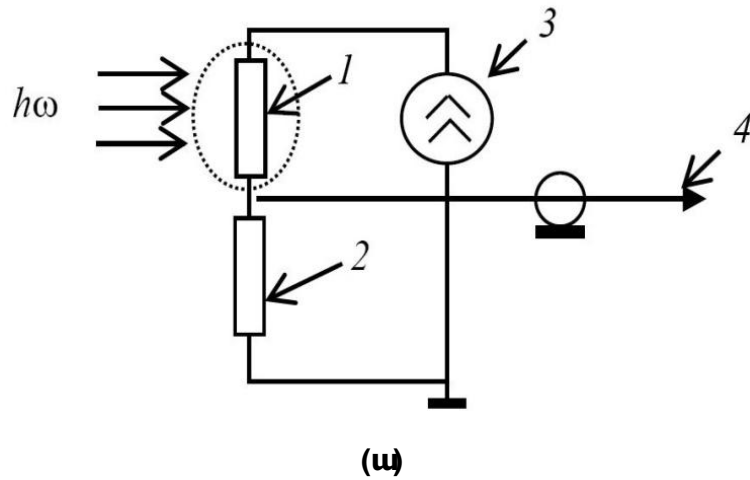


Նկ. 4.1.6. **(ա)** նանոթաղանթային նմուշը և տպասալիկների երկու տարբեր չափերի ու կառուցվածքների լուսանկարը, **(բ)** տպասալիկի վրա ամրացված նմուշի կառուցվածքային պատկերը, **(գ)** նմուշի լուսանկարը, որում մտեսանելի են նաև էլեկտրական միացումները

§ 4.2. Ստացված U-Sէ-U նանոթաղանթային կառուցվածքների ստաբիլ բնութագրերի հետազոտությունը

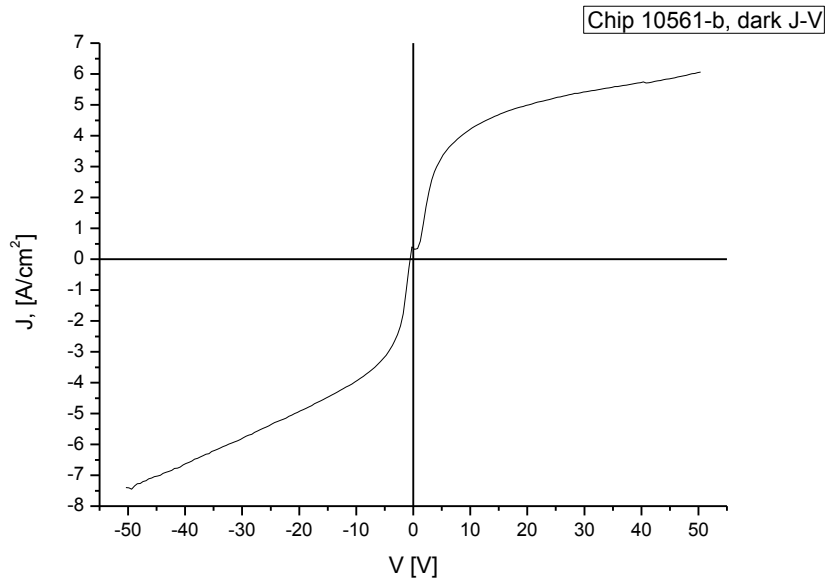
Վոլտ-ամպերային բնութագրերի (ՎԱԲ) չափումներն իրականացվել են KEITHLEY 6430 Sub-Femtoamp SourceMeter և NI DAQ SC 2040 սարքերի միջոցով: Նկ.4.2.1 (ա)-ում բերված է $SiO_2/p-Si/Al$ հարթակի վրա կառուցված Pt/BST/Pt պլանար կոնդենստորային նմուշի ՎԱԲ-երի հետազոտման համար օգտագործված էլեկտրական սխեման: Նկ.4.2.1 (բ)-

ուժ բերված է լուսային ՎԱԲ-երի ստացման կառուցվածքային սխեման:



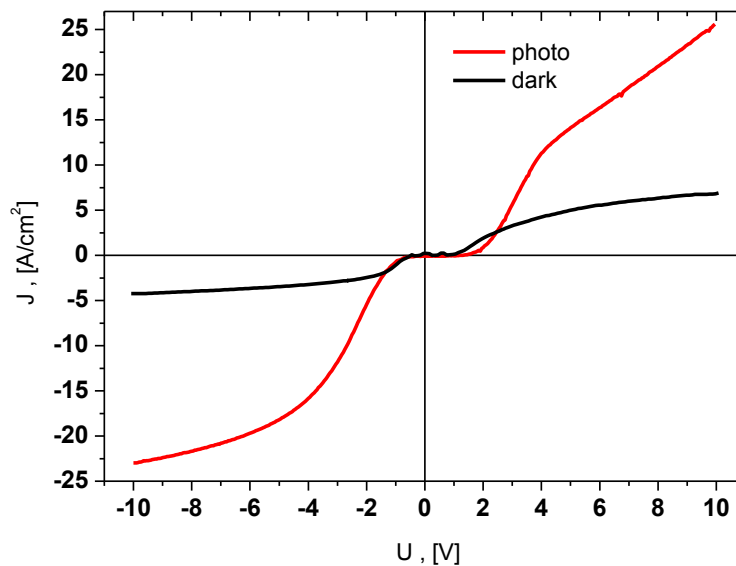
Նկ.4.2.1. (ա) Կոնդենսատորային նմուշի հետազոտման էլեկտրական սխեման. 1– ուսումնասիրվող նմուշը, 2– էտալոնային դիմադրություն (12 կՕհմ), 3 – լարման գեներատոր, 4– էլեկտրի գրանցումը: **(բ)** նմուշի BST նանոթաղանթի մակերեսի ճառագայթման սխեման (պատին էլեկտրոդների միջև տարված սլաքները ցույց են տալիս նկ. 4.1.5-ի x ուղղություները)

Նկ.4.2.1 (ա)-ուժ բերված (1) նմուշի միջով անցնող հոսանքը չափվել է ըստ նմուշին հաջորդաբար միացված էտալոնային (2) դիմադրության վրա ընկած լարման անկման: Հաստատուն լարման անկումը նմուշի վրա փոփոխվել է 0...200 Վ տիրույթում “National Instruments” AT-MIO-16E10 հարթակի միջոցով, որի կառավարումն ու տվյալների փոխանցումը համակարգչի կենտրոնական պրոցեսորին իրականացվել է LabVIEW7.0 ծրագրային փաթեթի և DAQ 6.7-ի օգնությամբ:



Նկ.4.2.2. Pt – Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃ – pSi – Al նմուշի մթնային J(V) կախվածությունը և ուղղությունը (Pt/BST/Pt) կիրառված -50...50 [Վ] հաստատուն լարման դեպքում

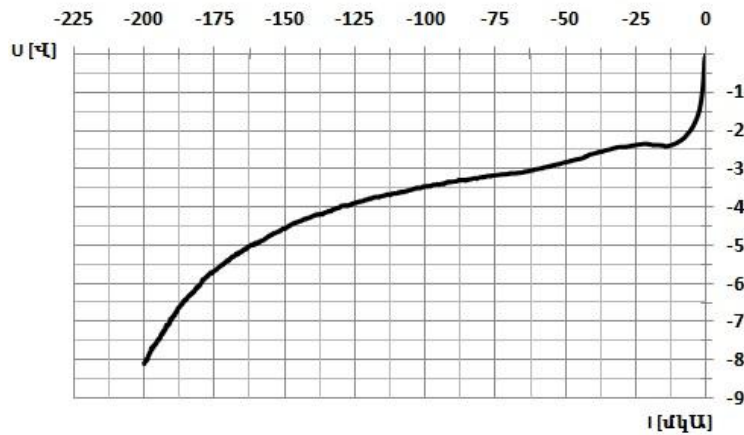
Որպես լույսի աղբյուր ծառայել են շիկացման լամպը (արևի իմիտատոր), տարբեր ալիքի երկարությամբ (262 նմ, 395 նմ, 655 նմ) լուսադիոդները: Կիրառված հաստատուն լարման -10...10 Վ-ով տռեժիմում լուսային ճառագայթման ալիքի տարբեր երկարությունների նկատմամբ հետազոտվող նմուշը ցուցաբերել է նույնական զգայունություն (նկ.4.2.3):



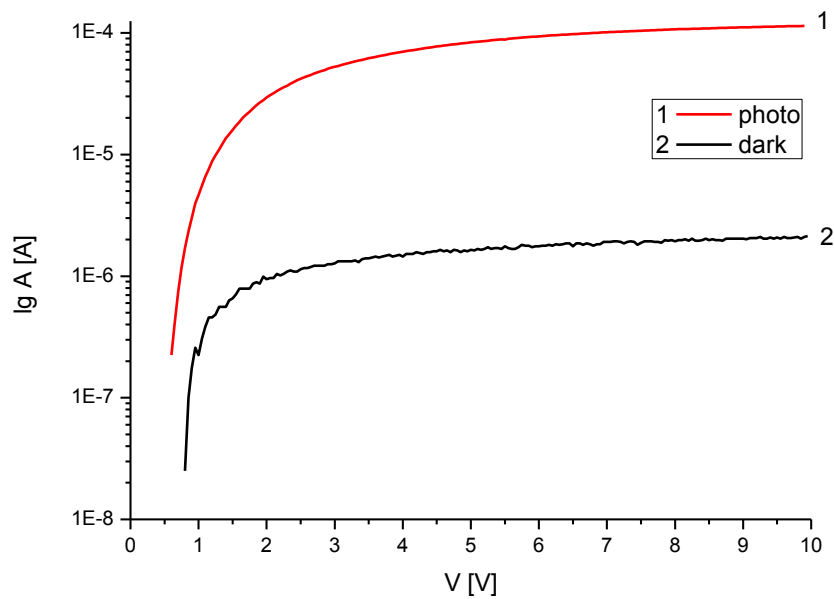
Նկ.4.2.3. Pt – Ba_{0,31}Sr_{0,69}TiO₃ – SiO₂ – pSi – Al նմուշի J(V) կախվածությունը և ուղղությունը (Pt/BST/Pt) -10...10 [Վ] կիրառված հաստատուն լարման դեպքում՝

մթու թյ ան և լ ու ս այ ի ն ճ առ ա գ այ թ ի (ա ր ն այ ի ն ի մ ի տ ա տ ո թ ի) կ ի թ առ մ ան
պ այ մ ան ն ե թ ու մ

յ ու ղ ղ ու թ յ ամբ կ ի թ առ վ ած հ ա կ առ ա կ հ ա ս տ ա տ ու ն լ ար մ ան ~170 Վ
ա ր ժ ե ք ի ց ս կ ս ած՝ Pt-Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃-pSi-Al ն մ ու շ ը դ թ ս ն ո թ ու մ է
Է լ ե կ տր ա կ ան ծ ա կ մ ան մ ի տ վ ած ու թ յ ու ն (ն կ .4.2.4):



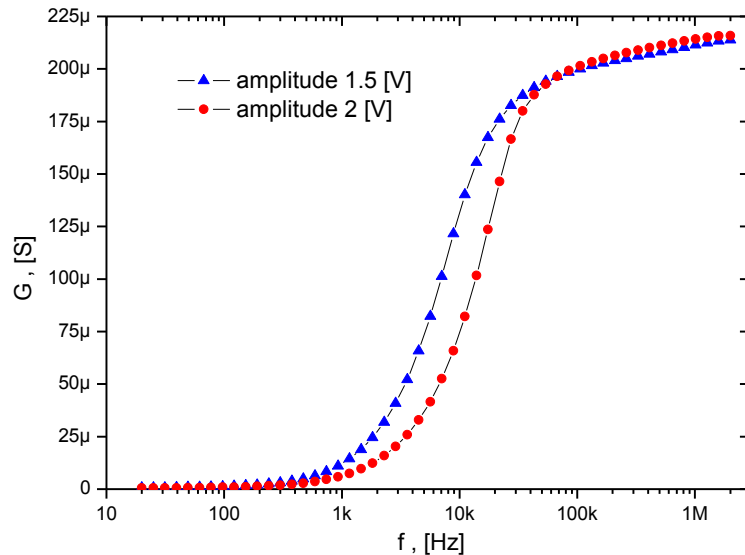
Նկ.4.2.4. Pt - Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃- pSi - Al կ առ ու ց վ ած ք ի յ ու ղ ղ ու թ յ ամբ (Pt/BST/pSi/Al)
ս տ ա ց վ ած մ թ ն այ ի ն Վ Ա Բ-ի հ ա կ առ ա կ ճ յ ու ղ ը



Նկ.4.2.5. Pt - Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃- pSi - Al կ առ ու ց վ ած ք ի յ ու ղ ղ ու թ յ ամբ (Pt/BST/pSi/Al)
ս տ ա ց վ ած մ թ ն այ ի ն Վ Ա Բ-ի հ ա կ առ ա կ ճ յ ու ղ ը՝ -10...10 [Վ] կ ի թ առ վ ած
հ ա ս տ ա տ ու ն լ ար մ ան դ ե պ թ ու մ՝ մ թ ու թ յ ան (2) և լ ու ս այ ի ն ճ առ ա գ այ թ ի
(ա ր ն այ ի ն ի մ ի տ ա տ ո թ ի) կ ի թ առ մ ան (1) պ այ մ ան ն ե թ ու մ

Յ ա ղ ո թ դ ա կ ան ա հ ա ճ ա խ ա կ ան ա յ ի ն $G(f)$ բ ն ու թ ա գ թ ե թ ի չ ա ի ու մ ն ե թ ը
(ն կ .4.2.6) ի թ ա կ ան ա ց վ ե լ ե ն “KEYSIGHT” ը ն կ ե թ ու թ յ ան “Agilent E4980A
Precision LCR Meter” չ ա ի ի չ ս ա թ ք ի մ ի ջ ո ճ ո վ, ո թ ը հ ն ա թ ա վ ո թ ու թ յ ու ն է

ընձեռում բարձր ճշգրտությամբ տարատեսակ չափումներ անել 20 Յգ-ից մինչև 2 ՄՅգ հաճախային միջակայքում: Չափումների տվյալները մշակվել են “OriginPro 8” համակարգչային ծրագրով:



Նկ.4.2.6. Pt – Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃ – pSi – Al կառուցվածքի ցուղղությամբ (Pt-BST-Pt) ստացված G(f) մթնային բնութագիրը 20 Յգ-ից մինչև 2 ՄՅգ տիրույթում, սենյակային ջերմաստիճանում

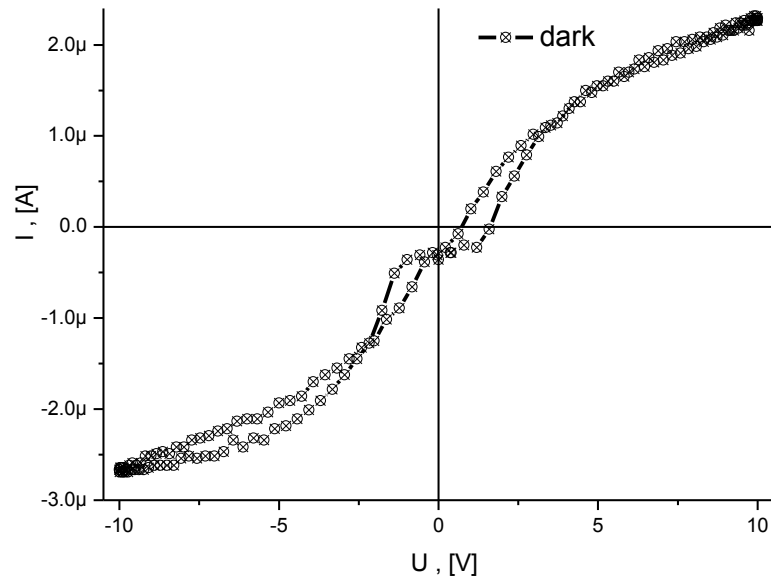
Մեմրիստիվ երևույթը միավորում է էլեկտրական դիմադրության և տվյալների հիշման գործառնությունները պինդմարմնային այնպիսի տարրերում, որոնք էլեկտրական ազդակի հետևանքով եներգոանկախ կերպով ունակ են փոխելու իրենց դիմադրությունը: Նանուէլեկտրոնիկայում այս երևույթը կարող է օգտագործվել տեղեկատվության կուտակման, ինչպես նաև նեվրոմորֆ համակարգման (neuromorphic computing) համար, որի նպատակն է կրկնօրինակել մարդկային ուղեղի աշխատանքը:

Մեմրիստիվ երևույթը չափազանց գրավիչ է դարձել հատկապես անցած երկու տասնամյակների ընթացքում: Այս երևույթը, որպես կանոն, ի հայտ է գալիս օքսիդներում և քալկոգեններում: Ներկայումս պինդմարմնային հետազոտությունների բնագավառում այն ամենաարդիական երևույթներից մեկն է:

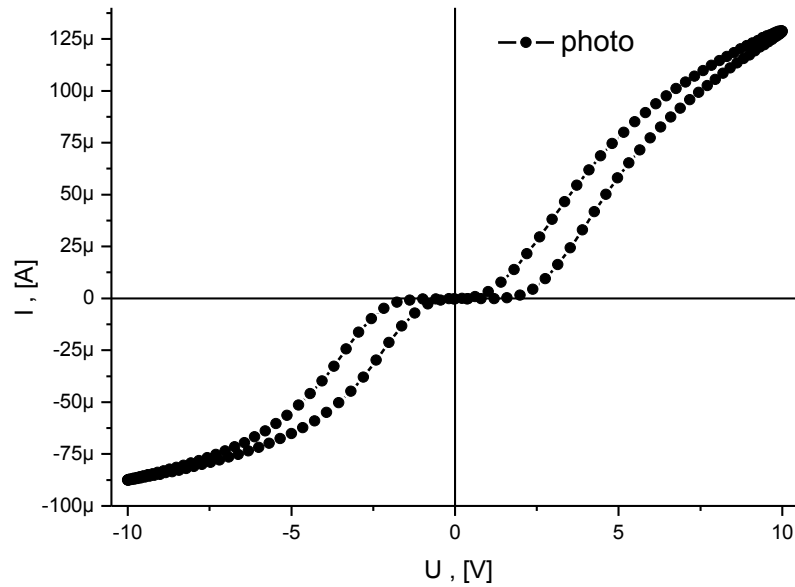
Մեմրիստիվ եզրույթը հիմնականում օգտագործվում է որակական իմաստով ցույց տալու համար այն երևույթն ու սարքերը, որոնցում դիմադրության վիճակը կայուն է պահվում այնքան

Ժամանակ, մինչև որ չի կիրառվել հաջորդ ազդակը (գրելու իմպուլս՝ WRITE), որը բավարար կլինի փոփոխելու այդ կայուն վիճակը [80]:

Որոշ ամսագրերում ընդունված է նմանատիպ էներգոանկախ դիմադրության փոխանջատմամբ սարքերը նկարագրել 1971-ին Chua-ի կողմից սահմանված մեմրիստորների [90] և նույնպես նրա կողմից 1976-ին ներկայացված մեմրիստիվ համակարգերի շրջանակներում [91]:



Նկ.4.2.7. Pt – Ba_{0,31}Sr_{0,69}TiO₃ – SiO₂ – pSi – Al նմուշի մթնային I(V) հիստերեզիսային կախվածությունը x ուղղությամբ՝ կիրառված $-10...10$ Վոլտի աստատուն ցիկլիկ արման դեպքում



Նկ.4.2.8. Pt – Ba_{0,31}Sr_{0,69}TiO₃ – SiO₂ – pSi – Al նմուշի լուսային I(V) հիստերեզիսային կախվածությունը x ուղղությամբ (Pt/BST/Pt)՝ կիրառված 10...10 Վ ու տիաստառուն ցիկլիկ լարման դեպքում, BST թաղանթը արևային իմիտատորով ճառագայթման ենթարկելիս

§ 4.3. Թվածնային վականսիաներ պարունակող U-ՖԷ-U թաղանթային կառուցվածքների վրա էլեկտրոնային ճառագայթման ու սումնասիրությունը

Ներկայումս առկա են լուրջ նախագծային և տեխնոլոգիական դժվարություններ՝ կապված կառավարելի և վերարտադրելի բնութագրերով ֆերոէլեկտրկ նուրբ թաղանթների վրա հիմնված սարքերի իրականացման հետ: Չնայած այդ բարդություններին, արագորեն կատարելագործվող ժամանակակից տեխնոլոգիաները թույլ են տալիս ստանալ ատոմական միջանի շերտով կառավարելի կառուցվածքներ, որոնք ցուցաբերում են ծավալայինի համեմատությամբ էապես տարբեր հատկություններ:

ՖԷ թաղանթի պատրաստման ընթացքում հարթակի մակերևույթին այդ թաղանթի ինքնակազմակերպումը կարող է հանգեցնել անկանխատեսելի նոր հատկություններով օժտված միաչափ կամ «կետային» կառուցվածքների: Հաստատված է, որ ֆերոէլեկտրիկների և դրանց վրա հիմնված սարքերի հիմնական պարամետրերը խստորեն կախված են տեխնոլոգիական ռեժիմներից ու պայմաններից, ինչպես նաև

ստացման մեթոդներից: Ֆերոէլեկտրական մետաղ-օքսիդային կոմպոզիցիոն տիտանատների բնական և հիմնական անխուսափելի անկարգավորությունները (արատները) թթվածնի վականսիաներն են (ԹՎ՝ V_o^-) [92–94], որոնք ՖԷ թաղանթում առաջանում և տեղաշարժվում են՝ դրա ստացման մեթոդներից և տեխնոլոգիական ռեժիմներից կախված: Անցումային խմբի խառնուրդները նույնպես առաջացնում են ԹՎ:

ԹՎ-ները ամենաշարժունակ արատներն են ՖԷ-ում: Դրանք անխուսափելիորեն առկա են միաբյուրեղներում, հատկապես՝ կերամիկայում և հաստթաղանթներում: Բարձր ջերմաստիճաններում և էլեկտրական դաշտերում ԹՎ-ները կրկնակի իոնացված են. յուրաքանչյուրը հաղորդական գոտուն «մատակարարում» է երկու էլեկտրոն՝ $O_o^- \rightleftharpoons V_o^- + 2e^- + \frac{1}{2}O_2(gas)$:

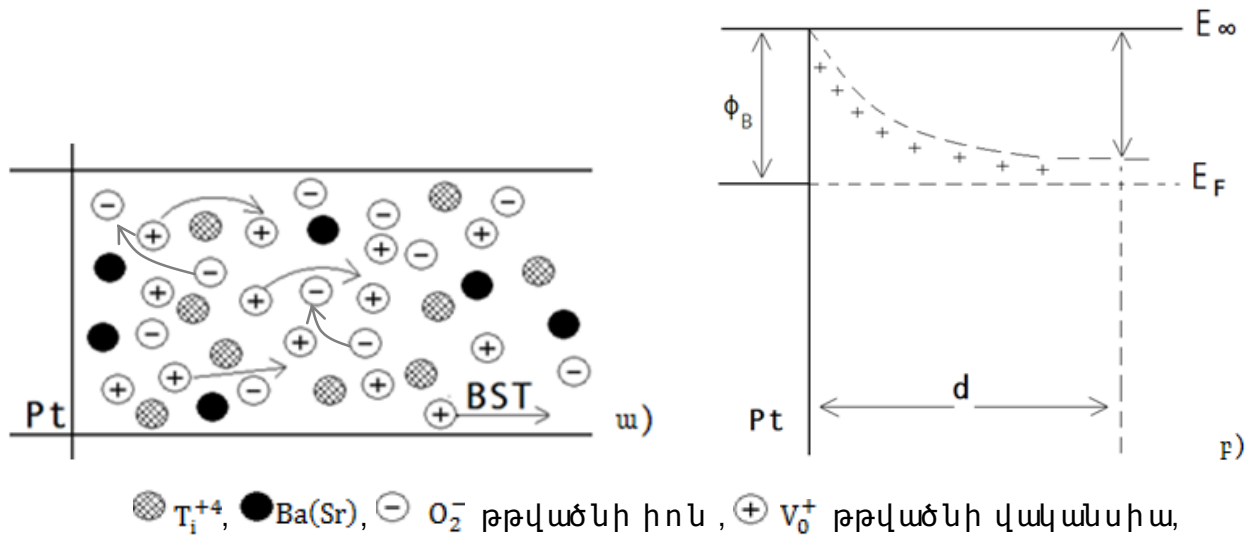
Միջհանգուցային (միջբջջային) թթվածնի ատոմը կարող է ձևավորել երեք տեսակի դեֆեկտ՝ $x = O^0; O^-; O^{2-}$, որոնց արգելման գոտում կհամապատասխանեն տարբեր էներգիական մակարդակներ (էլեկտրոնային վիճակներ): Մետաղօքսիդային քիմիական վակուումային նստեցման եղանակով ստացված $SrTiO_3$ -ի խորը էներգիական մակարդակների էլեկտրական և օպտիկական հատկությունների հետազոտություններով [92, 93] հաստատվել է, որ առաջանում են խորը թակարդային մակարդակներ՝ $E_v+2,4$ էՎ մինչև $E_v+3,15$ էՎ ակտիվացման էներգիայով և ծանծաղ մակարդակներ՝ $E_c-E_m=0.03...0.4$ էՎ էներգիաներով: Ընդ որում, արատների խտությունը փոփոխվում է՝ $10^{14}...10^{19}$ սմ³, ինչպես նաև նկատվել են ավելի մեծ խտություններ ($10^{20}...10^{21}$ սմ³): Ակտիվացման էներգիաները և դեֆեկտների (թակարդների) բնույթն ու խտությունները խիստ կախված են տեխնոլոգիական ռեժիմներից, մշակման եղանակներից: ԹՎ-ները արտաքին էլեկտրական դաշտի ազդեցության տակ ամենաշարժունակն են ՖԷ-ում [95] և արդյունքում առաջացնում են էլեկտրական դիպոլներ գերազանցապես մետաղական էլեկտրոդների մոտ ենթամակերևութային շերտում: Էլեկտրոդների մոտ ԹՎ-ի խտությունը կարող է 50%-ով գերազանցել խորքում եղածներին՝ ձևավորելով էլեկտրոդի մոտ մինչև $3 \cdot 10^{16}$ թթվածին/սմ²

մակերևութային խտություն: ԹՎ-ի խտության այս վերադասավորումը մեծացնում է լարման անկումը ենթամակերևութային շերտի վրա և հանգեցնում թաղանթի ներսում (խորքում) էլեկտրական դաշտի նվազման, ինչպես նաև էներգիական գոտիների ծռման ու պրտենցիալ արգելքի փոփոխման: ԹՎ-ը հանդես են գալիս որպես դոնորներ՝ օժտելով տվյալ տիրույթը ո-տիպի հաղորդականությամբ: Կախված ԹՎ-ների խտությունից և դրանց բաշխման բնույթից, ինչպես նաև հարթակի էլեգիրման բնույթից՝ հաղորդականությունը կարող է փոփոխվել ո-ից p-տիպի [92, 93]: Մոտակա տիտանի իոնի շուրջ տեղայնացված դոնորային մակարդակներից (վիճակներից) ոչ բոլորն են զբաղված: Չեզոք դոնորային վիճակը կրկնակի զբաղված է և նվազեցնում է վականսիայի և հարևան կատիոնի միջև վանողական փոխազդեցությունը: Արդյունքում միջհանգուցային վականսիան «դեֆորմացնում» է բյուրեղական ցանցը, և բևեռացնող դաշտը վականսիայի շրջակայքում մեծանում է, որը մակարդակին դարձնում է խորը թակարդային մակարդակ: Այս թակարդներով (ԹՎ-ով) «պայմանավորված» ներկառուցված էլեկտրական դաշտը հանգեցնում է թաղանթի միջբջջային տիրույթների դիէլեկտրիկ թափանցելիության փոփոխման:

Չաշվի առնելով ֆերոէլեկտրական թաղանթների բնութագրերի վրա թթվածնի վականսիաների ունեցած էական ազդեցությունը, էլեկտրոնների փնջով ֆերոէլեկտրիկների (կիսահաղորդիչների, դիէլեկտրիկների ու դրանց հիման վրա սարքային կառուցվածքների) բնութագրերի հետազոտման արդյունքները, ինչպես նաև տարբեր ճառագայթների օգնությամբ սիլիցիումային բյուրեղների պարամետրերի բարելավման արդեն հաստատված և կիրառվող եղանակները՝ սույն աշխատանքում առաջին անգամ քննարկվել է նաև էլեկտրոնային փնջով ֆերոէլեկտրիկ թաղանթների ռմբակոծման հետևանքով թթվածնային վականսիաների և թթվածնի բացասական իոնների միգրացիայի հնարավոր երևույթներն ու դրանց ազդեցությունը բյուրեղի էլեկտրաֆիզիկական բնութագրերի վրա:

Մեր կողմից առաջարկվող մոդելում ենթադրվում է, որ եթե էլեկտրոնային փնջից BST-ի բյուրեղական ցանցի իոնների կլանման

Էներգիան բավարար է դրանց միգրացիայի, մասնավորապես՝ ֆրենկելյան տեսակի դեֆեկտների առաջացման, չեզոքացման, բաշխման բնույթի փոփոխման համար, ապա ճառագայթման արդյունքում կփոփոխվեն թաղանթի հիմնական էլեկտրաֆիզիկական բնութագրերը:



Նկ. 4.3.1. Pt-BST կոնտակտի (ա) և նական կտրվածքը և (բ) էներգիական գոտիական կառուցվածքը

Քննարկենք էլեկտրոնային փնջի ճառագայթման հետևանքով առաջացող նոր երևույթները և դրանց ազդեցությունը մետաղ-ֆերոէլեկտրիկ կառուցվածքի (կոնտակտի) էլեկտրաֆիզիկական բնութագրերի վրա: Ընդունենք, որ էլեկտրոնային փնջից կլանած էներգիան բավարարում է V_0^+ թթվածնի վականսիայի և O_2^- թթվածնի իոնի միգրացիայի շեմային ֆրենկելյան դեֆեկտի ակտիվացիայի առաջացման $E_{2ndV_0^+}$ և $E_{2ndO_2^-}$ պայմաններին:

Ճառագայթման ազդեցության արդյունքում թթվածնի V_0^+ վականսիաները (որոնց խտությունը մետաղի հետ կոնտակտի ենթամակերևութային շերտում անհամեմատ մեծ էր) կդիֆուզվեն դեպի BST-ի խորքը, իսկ թթվածնի O_2^- իոնները խորքից կդիֆուզվեն դեպի մետաղ-BST բաժանման սահման (նկ. 4.3.1): Արդյունքում կմեծանա (կլայնանա) ծավալային լիցքի տիրույթի ժհաստությունը: Թթվածնի O_2^- իոնների տեղաշարժը կարող է չեզոքացնել ենթամակերևութային վականսիաներին՝ վականսիա առաջացնելով BST-ի խորքային մա-

սուժ՝ նորից նպաստելով ծավալային լիցքի տիրույթի ընդարձակմանը դեպի BST-ի խորքը: Բացի իոնային այս տեղաշարժերից (միգրացիայից), կարող են տեղի ունենալ նաև էլեկտրոնային անցումներ և դեֆեկտների լրացուցիչ վերադասավորում: Մասնավորապես՝ կախված էլեկտրոնային փնջի թափանցման խորուխից՝ թթվածնի վականսիաներով պայմանավորված թակարդային մակարդակներում գրավված էլեկտրոնները Պուլլ-Ֆրենկելյան իոնացման մեխանիզմով կանցնեն BST-ի հաղորդական գոտի և կշարժվեն դեպի Pt-BST բաժանման սահման՝ ձգտելով չեզոքացնել այդ սահմանում կուտակված թթվածնի վականսիաները, կրկին վականսիա առաջացնելով BST-ի խորքային մասում: Այսպիսով, ճառագայթման ազդեցության տակ՝ եթե էլեկտրոնային փնջից կլանած էներգիան մեծ է թթվածնի O_2^- իոնի ակտիվացիայի շեմային էներգիայից և պուլլ-ֆրենկելյան իոնացման էներգիայից, ապա “վականսիաների դաշտը” կթափանցի դեպի BST-ի խորքը [96–98]:

Թթվածնի սկզբնական վականսիաների և O_2^- իոնների միգրացիան կուլենա դիֆուզիոն բնույթ, մինչդեռ էլեկտրոնների տեղաշարժը դեպի Pt-BST կուլենա դրեյֆային բնույթ: Եթե կառուցվածքի վրա արտաքին էլեկտրական դաշտը բացակայում է, ապա ճառագայթման ազդեցության ռեժիմում կփոփոխվի Pt-ի և BST-ի մակերևութային $\varphi_x(x)$ պոտենցիալի մեծությունը, որը կախված կլինի x-կոորդինատից:

Արտաքին էլեկտրական դաշտի առկայության դեպքում թակարդներից արձակված էլեկտրոնները կբերեն կորստյան հոսանքների աճին և, կախված կիրառված լարման բևեռականությունից, կամ կնպաստեն ծավալային լիցքի ընդարձակմանը՝ ($\varphi_x(x)$ -ի աճին), կամ որոշ չափով կթուլացնեն այն:

Սույն քննարկման շրջանակում, առայժմ, անտեսենք ճառագայթման ազդեցության տակ էլեկտրոնների պուլլ-ֆրենկելյան իոնացման մեխանիզմը և դիտարկենք միայն O_2^- անիոնների և V կատիոնների միգրացիան:

Այսպիսով, էլեկտրոնային փնջով Pt-BST կուտակող ճառագայթելիս, կախված փնջի թափանցման խորուխից, լրացուցիչ SLS կամ այդ տիրույթի էլեկտրաֆիզիկական

բնութագրերի փոփոխություն կարող է տեղի ունենալ հետևյալ ռեակցիաների՝

ա) Pt-BST անցման սահմանից V_0^+ թթվածնի վականսիաները դեպի BST-ի խորքը տեղաշարժվելու,

բ) O_2^- իոնները BST-ի խորքից դեպի բաժանման սահման դիֆուզվելու և վականսիաները մասնակիորեն “չեզոքացնելու” հետևանքով:

Ֆերոէլեկտրիկի մյուս տեսակի անիոն-կատիոն իոնների տեղաշարժերը և դրանցով պայմանավորված արատների, էլեկտրաստատիկ դաշտերի ձևավորման մեխանիզմները սույն քննարկման մեջ կանտեսենք:

Իսկ այժմ դիտարկենք $SiO_2/p-Si / Al$ հարթակի վրա ստացված Pt-BST-Pt պլանար M-S-E-M նանոթաղանթային կառուցվածքը (նկ.4.1.5.բ և նկ. 4.2.1.բ) [74, 76]: Մենք ենթադրում ենք, որ մինչև BST թաղանթին դաշտ կիրառելը լիցքավորված թթվածնի վականսիաների էլեկտրական ակտիվությունը փոխհատուցվում է թակարդում գրավված էլեկտրոններով կամ թաղանթի ոչ ստեխիոմետրիայով պայմանավորված իոնացված ակցեպտորներով: Երբ կիրառվում է արտաքին էլեկտրական դաշտ և մեծացվում է դրա արժեքը, թթվածնային վականսիաների մի մասը լրացուցիչ իոնանում է Պուլ-Ֆրենկելյան էմիսիայի հետևանքով [99–101]:

Վոլտ-ամպերային բնութագրերի առաջարկվող մոդելն անտեսում է լիցքակիրների կոնցենտրացիայի գրադիենտով պայմանավորված դիֆուզիոն հոսանքները: Կառուցվածքին կիրառված լարումը մեծ է, քան թթվածնային վականսիաներից էլեկտրոնի հաղորդականության գոտի անցման (առաքման) համար անհրաժեշտ լարումը: Թակարդներից առաքված լիցքակիրները շարժվում են էլեկտրական դաշտում այնպես, որ գրավման գործոնը կարող է անտեսվել:

Ենթադրենք, որ ֆերոէլեկտրիկ թաղանթը պարունակում է էլեկտրոնների թակարդներ, որոնք հաղորդականության գոտուց ներքև ունեն E_{nt} էներգետիկ մակարդակ: Էլեկտրոնների թակարդների խտությունը N_{tn} է, ազատ էլեկտրոնների կոնցենտրացիան (ներառյալ ինժեկտվածներինը) դաշտի առկայության դեպքում՝ n_c , և թակարդները կարող են էլեկտրոններ փոխանակել միայն

հաղորդականության գոտու հետ Պուլ-Ֆրենկելի մեխանիզմով: Թակարդային մակարդակներում էլեկտրոնների n_t կոնցենտրացիայի կինետիկ հավասարումը կունենահետևյալ տեսքը.

$$\frac{\partial n_t}{\partial t} = S_n(N_t - n_t)n_c - (P_e + P_{PF})n_t, \quad (1)$$

որտեղ $S_n = \langle V_{th} \rangle \sigma$, $v_{th} = (3kT/m^*)^{1/2}$ -ն էլեկտրոնի ջերմային շարժունակությունն է, σ -ն՝ թակարդների գրավման հատույթը, n_c -ն՝ գրավված էլեկտրոնների կոնցենտրացիան, P_e -ն ու P_{PF} -ը ջերմային և Պուլ-Ֆրենկելյան առաքման հավանականություններն են:

Հավասարակշռության վիճակում՝

$$\left(\frac{\partial n_t}{\partial t}\right) = 0, \quad n_{t0} = \frac{N_t n_0}{n_0 + \gamma(E_t)}, \quad \gamma = \frac{N_c}{g} \exp(E - F_0 / KT),$$

որտեղ n_{t0} -ն թակարդային էլեկտրոնների հավասարակշռված կոնցենտրացիան է, N_c հաղորդականության գոտու վիճակների արդյունարար խտությունն է, g -ն՝ այլասերման գործակիցը ($g=2$) [99], E -ն՝ թակարդի հաղորդականության գոտու E_c -ն՝ եզրից ունեցած հեռավորությունն է ($E_c=0$), F_0 -ն՝ Ֆերմի էներգիան է:

Գծայնացնենք թաղանթով անցնող հոսանքի խտության հավասարումը.

$$j = q\mu n_0 E_0 + qD \left(\frac{dn_0}{dx} + \frac{dn_{t0}}{dx} \right) + q\mu n_{t0} E_0 e^{\frac{-E_t - \beta^* E_0^{1/2}}{kT}}, \quad (2)$$

ուր $\beta^* \equiv q \left(\frac{q\beta}{\pi\epsilon_\Gamma} \right)^{1/2}$ (β^* պարամետրի ֆիզիկական իմաստը $\log I - \log E^{3/2}$

կոորդինատներում I-V գրաֆիկի թեքությունն է, երբ էլեկտրոնների հաղորդականության մեջ գերակշռում է Պուլ-Ֆրենկելի մեխանիզմը), D -ն էլեկտրոնների դիֆուզիայի գործակիցն է, q -ն և μ -ն՝ էլեկտրոնի լիցքը և շարժունակությունը: (2) հավասարման երրորդ գումարելին Պուլ-Ֆրենկելի մեխանիզմով պայմանավորված հոսանքի խտությունն է:

Անտեսելով հոսանքի դիֆուզիոն բաղադրիչը՝ կստանանք.

$$j = q\mu n_0 E_0 + q\mu n_0 b E_0 a_1 \left(1 + \frac{E_0^{1/2} q^{3/2} (1 + A E_0^2)^{1/2}}{kT(\pi\varepsilon_\Gamma)^{1/2}} \right) \cong q\mu n_0 E_0 (1 + b a_2) \quad (3)$$

$$a_1 = \exp\left(-\frac{E_t - F_0}{kT}\right), \quad a_2 = b \exp\left(-\frac{E_t - F_0}{kT}\right) \left(1 + \frac{E_0^{1/2} q^{3/2} (1 + A E_0^2)^{1/2}}{kT(\pi\varepsilon_\Gamma)^{1/2}} \right), \quad b = \frac{N_t}{\gamma(E_t)}:$$

Դիֆերենցելով (3) հավասարումը և $\frac{dj}{dx} = 0$ պայմանից առաջին

մոտավորությամբ ընդունելով, որ $\beta^* \equiv q \left(\frac{q\beta}{\pi\varepsilon_\Gamma} \right)^{1/2} \ll 1$, կստանանք՝

$$n_0 \frac{dE_0}{dx} = -E_0 \frac{dn_0}{dx} : \quad (4)$$

Տեղադրելով $\frac{dE_0}{dx}$ արտահայտությունը $n_0 \frac{dE_0}{dx} = -E_0 \frac{dn_0}{dx}$

հավասարության մեջ՝ n_0 -ի համար կստանանք.

$$n_0 = n_{c0} \exp\left[-\frac{A \cdot j(1+b)x}{\varepsilon_\Gamma b_2}\right]:$$

Տեղադրելով n_0 - ի արտահայտությունը Պուլասոնի հետևյալ հավասարման մեջ՝

$$\varepsilon(E_0) \frac{\partial E_0}{\partial x} + E_0 \left(-\frac{2A E_0 \varepsilon_\Gamma}{\beta^2} \right) \frac{\partial E_0}{\partial x} = q(n_0 + n_{i0}), \quad \frac{dE_0}{dx} = -\frac{q n_0 (1+b) A E_0^2}{\varepsilon_\Gamma}:$$

E_0 -ի համար կստանանք՝

$$E_0 = \frac{-\alpha}{\alpha_1} (e^{\alpha x} - 1),$$

$$\text{որտեղ } \alpha = \frac{A j(1+b)}{\varepsilon_\Gamma b_2}, \quad \alpha_1 = \frac{q n_{c0} (1+b) A}{\varepsilon_\Gamma}:$$

Թույլ դաշտերի դեպքում, երբ $A E_0^2 \ll 1$, $\beta \cong A E_0^2 \cong 1$, Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի J-V բնութագրի համար ստանում ենք՝

$$V = \sqrt{\frac{8j(1+b)}{9\varepsilon_\Gamma b_2}} \left\{ \left(\frac{\varepsilon_\Gamma b_2}{2j(1+b)A} + l \right)^{3/2} - \left(\frac{\varepsilon_\Gamma b_2}{2j(1+b)A} \right)^{3/2} \right\}, \quad (5)$$

որտեղ j - ն հոսանքի խտությունն է, V - ն՝ կիրառված լարումը, $A = 3\beta[\varepsilon_0 \varepsilon(0)]^3$, $\varepsilon_\Gamma = \varepsilon_0 \varepsilon(0)$, $\varepsilon(0)$ -ն դիելեկտրիկ թափանցելիությունն է

լ արման բացակայ ու թյան դեպքում, ε_0 -ն դիէլեկտրիկ հաստատունն է, l -ը՝ ֆերոէլեկտրիկ թաղանթի հաստությունը, $b_2 = \mu(1 + b \cdot a_1)$, $a_1 = \exp\left(-\frac{E_t - F}{kT}\right)$, $b = \frac{N_t}{\gamma(E_t)}$, $\gamma(E_t) = \frac{N_c}{g} \exp(E_t - F_0 / kT)$:

Երբ $\frac{\varepsilon_\Gamma \cdot b_2}{2j(1+b)A} \ll l$, (5)-ը դառնում է հետևյալը՝ $j = \frac{9V^2 \varepsilon_\Gamma b_2}{8(1+b)l^3}$:

Եթե թթվածնային վականսիաները բացակայում են, այսինքն՝ $N_t = 0$, և դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը կախված է դաշտից, այսինքն՝ $b = 0$ և $b_2 = \mu(1 + ba_1) = \mu$, ապակատանային

$$j = \frac{9V^2 \varepsilon_\Gamma \mu}{8l^3}, \tag{6}$$

որը Մոտ-Յենրիի հայտնի օրենքն է [99]:

Մեծ էլեկտրական դաշտերի դեպքում, երբ $E_0 \geq 10^6$ Վ/սմ, $|AE_0^2| \gg 1$, $\beta \cong AE_0^2$, $1 - AE_0^2 \approx -AE_0^2$, Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի J-V բնութագրի համար ստանում ենք

$$V = \int_0^l E_0 dx = -\frac{\alpha}{\alpha_1} \int_0^l (e^{-\alpha x} - 1) dx = \frac{(\alpha l)^2}{2\alpha_1} \cong l^2 \frac{A^2 \cdot j^2 (1+b)^2 \cdot \varepsilon_\Gamma}{2\varepsilon_\Gamma^2 \cdot b_2^2 \cdot q \cdot n_{c0} \cdot (1+b)A}$$

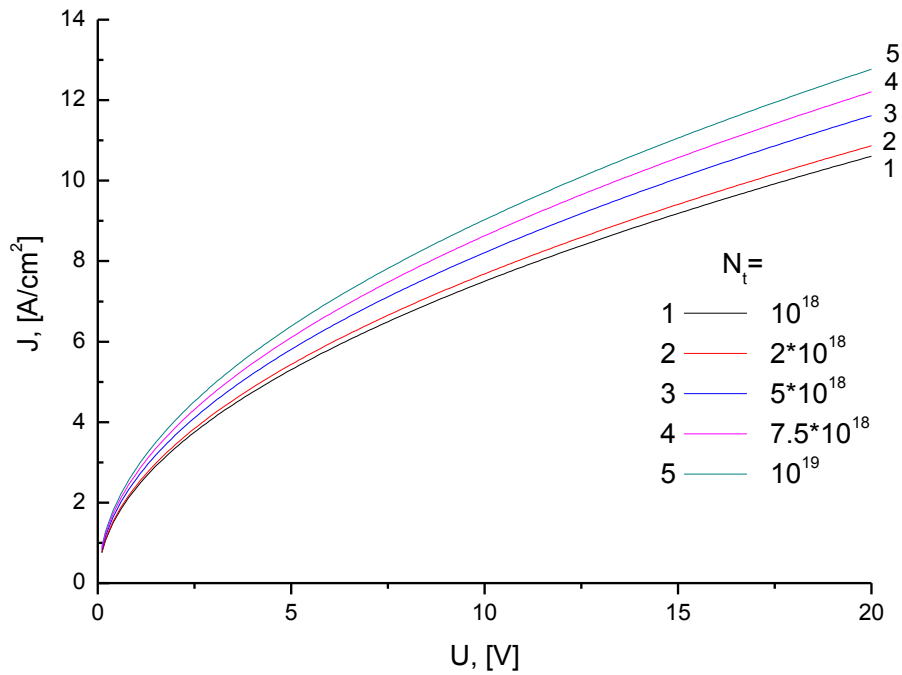
$$j = \frac{b_2}{l} \left(\frac{2V\varepsilon_\Gamma \cdot q \cdot n_{c0}}{A(1+b)} \right)^{1/2} : \tag{7}$$

հնչափս երևում է (7) հավասարումից j -ն V -ից կախված է $1/2$ -ի օրենքով ($j \sim V^{1/2}$): Այս կախվածությունը (6) հավասարումից տարբերվում է միայն գործակցով: Տարբերությունը, հնարավոր է, հավասարման լուծման ժամանակ արված մոտավորությունների հետևանք է լինի:

(7) հավասարման համար տեսական հաշվարկները կատարվել են Pt-Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO₃-Pt հետերոկառուցվածքի և ֆերոթաղանթի հետևյալ բնութագրերի համար՝ $l = 0.5$ սմ, $\varepsilon(0) = 300$, $S_0 \sim 3 \cdot 10^{-6}$ սմ², $A = 0.45 \cdot 10^{-15}$ մ/Վ², $\mu_{n0} \cong (10^{-1} \dots 6)$ սմ²/Վ·վ, $\varepsilon_f \approx (10 \div 20)$, $E_m = 0.026 \div 0.4$ էՎ, $n_{c0} \cong (10^{12} \div 10^{14})$ սմ⁻³, $N_t = 10^{16} \dots 10^{19}$ սմ⁻³, $T = 300$ Կ [26, 44, 92, 93, 102–104]: Ստացված արդյունքները

(նկ.4.3.2) համեմատվել են ստացված փորձնական տվյալների հետ(նկ.4.3.3):

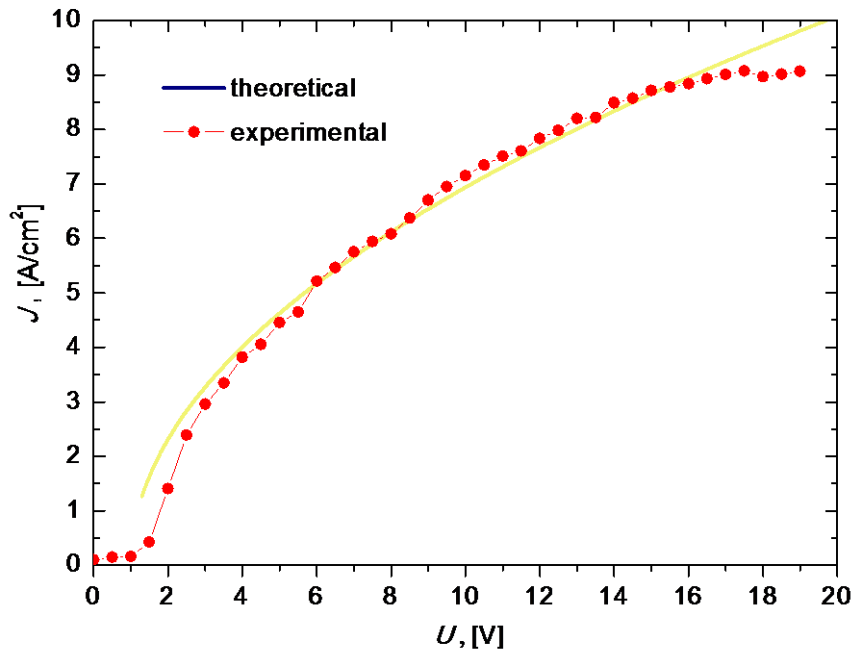
Ըստ նկ.4.3.2-ի, թթվածնային վականսիաների (այլ խոսքով՝ թակարդային մակարդակներում գրավված էլեկտրոնների) N_t կոնցենտրացիայի աճին զուգընթաց հոսանքն աճում է: Այս աճը գլխավորապես պայմանավորված է Պոլլ-Ֆրենկելյան իոնացմամբ:



Նկ.4.3.2. Pt-BST-Pt նանոթաղանթային կառուցվածքի տեսական-հաշվարկային $J(V)$ բնութագրերը թթվածնային վականսիաների $N_t=10^{18}$; 2×10^{18} ; 5×10^{18} ; $7,5 \times 10^{18}$; 10^{19} [սմ⁻³] կոնցենտրացիաների համար ($\mu_0=6$ սմ²/Վ·վ, $E_t=0,036$ էՎ, $n_0=6,6 \cdot 10^{12}$ սմ⁻³) [96]

Նկ.4.3.3-ը ցույց է տալիս, որ առաջարկված տեսական մոդելի հիման վրա ստացված արդյունքները լավ համապատասխանության մեջ են ստացված փորձնական արդյունքների հետ (նկ. 4.2.2 և նկ.4.2.3) [96]:

Եթե ընդունում ենք, որ թթվածնի վականսիաները բացակայում են, իսկ $\varepsilon(E)$ ոչ գծային կախվածությունը կարելի է անտեսել, ՎԱԲ-երի և ֆերոկառուցվածքների դիէլեկտրիկական հատկություններն արտացոլող մյուս բնութագրերի համար ստացված բոլոր տեսական առնչությունները գերազանց համաձայնության մեջ են այլ հեղինակների դուրս բերած և դասական համարվող արտահայտությունների հետ:



Նկ.4.3.3. Pt – Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃ – Pt նանոթաղանթայ ին կառուցվածքի տեսական և փորձնական մթնայ ին $J(V)$ կախվածությունները ($\mu_0=6$ սմ²/Վ·վ, $E_t=0.036$ էՎ, $n_0=6,6 \cdot 10^{12}$ սմ⁻³, $N_t = 10^{18}$ սմ⁻³)

§ 4.4. Եզրակացություններ չորրորդ գլխի վերաբերյալ

1. Պատրաստված մետաղ-Ֆերոէլեկտրիկ-մետաղ նանոթաղանթայ ին կառուցվածքների փորձնականորեն հետազոտված բնութագրերը, մասնավորապես՝ վոլտ-ամպերայ ին բնութագրերի ուղիղ և հակառակ ճյուղերի սիմետրիկությունը թույլ են տալիս եզրակացնել, որ մետաղական (Au, Pt) էլեկտրոդների ստացման պլանային փոշենստեցման տեխնոլոգիան արդյունավետորեն է ընտրված:

2. Տեսական մոդելավորման արդյունքում առաջին անգամ փաստվել է, որ թթվածնի վականսիաներով, հետևապես և արգելման գոտում՝ հաղորդական գոտու սահմանին մոտ, թակարդային մակարդակներով հագեցած Ֆեթաղանթներում մեծ արվածությունը արտաքին էլեկտրական դաշտ կիրառելիս, Պուլլ-Ֆրենկելյան առաքման ռեժիմում, որոշակի այլ պայմանների առկայության պարագայում հոսանքի խտությունը արումից կախված է 1/2 օրենքով: Տեսական այս կախվածությունը, համապատասխանության մեջ է փորձնական հետազոտությունների արդյունքների հետ:

3. Pt–Ba_{0,31}Sr_{0,69}TiO₃–SiO₂–pSi–Al և Pt–Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃–pSi–Al նմուշների էլեկտրաօպտիկական ուսումնասիրություններով պարզվել է, որ

այդ նմուշներում հանդես եկող BST նուրբ թաղանթները լուսազգայ ու նություն են ցուցաբերում լույսի տեսանելի սպեկտրում:

4. Pt-Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃-pSi-Al նմուշի y ուղղությամբ՝ Pt/BST/pSi/Al (պատրաստված նմուշների x և y ուղղություները ցույց են տրված նկ.4.1.5-ում, նաև նկ.4.2.1.(բ)-ում), իրականացված վոլտ-ամպերային բնութագրերի հակառակ ճյուղի հետազոտությամբ պարզվել է, որ այդ նմուշը, կիրառված հակառակ հաստատուն լարման ~170 Վարժեքից սկսած, դրսևորում է էլեկտրական ծակման միտվածություն:

5. Pt-Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃-pSi-Al նմուշի x ուղղությամբ (Pt/BST/Pt) հաղորդականա- հաճախականային $G(f)$ բնութագրերի հետազոտությամբ պարզվել է, որ չափման ընթացքում կիրառված փոփոխական ազդանշանի ամպլիտուդի ընտրությունը որոշակիորեն ազդում է չափման արդյունքների վրա (նկ.4.2.6):

6. Pt-Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃-pSi-Al նմուշի x ուղղությամբ (Pt/BST/Pt) մթնային և լուսային վոլտ-ամպերային բնութագրերի հետազոտությամբ բացահայտվել է վերջիններիս հիստերեզիսային բնույթը. մթնային ՎԱԲ-ի դեպքում կիրառված հաստատուն լարման -3...3 Վոլտ տիրույթում (նկ.4.2.7), իսկ լուսայինի դեպքում՝ -10...10 Վոլտ տիրույթում (նկ.4.2.8):

7. Բարդօքսիդային ՖԷ նյութերի, մասնավորապես՝ BST-ի վրա հիմնված

Մ-ՖԷ-Մ թաղանթային կառուցվածքներին բնորոշ ՎԱԲ-ի այսպես կոչված «հիստերեզիսայնություն» բացահայտումը մեր պատրաստած մետաղ-BST-մետաղ նանոթաղանթային կառուցվածքներում թույլ է տալիս ենթադրել, որ դրանք որոշակի նախազատեխնոլոգիական մշակումներից հետո կարող են կիրառություն գտնել՝ որպես դիմադրությամբ փոխանջատվող տարրեր՝ դրանով իսկ կիրառվելով մեմրիստորային հիշասարքերում:

Գ Լ ՈՒ Խ 5

Մ-ՖԷ-Մ ԿԱՌՈՒ ՑՎԱՆՔԻ ԴԻՆԱՄԻԿ (ԲԱՐՁՐՅԱՃԱԿԱԿԱՆԱՅԻՆ)

ԲՆՈՒ ԹԱԳՐԵՐԻ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄ

§ 5.1. Ներածություն

Սույն բաժնում ուսումնասիրվել են Ֆերոել եկտրական Մ-ՏԷ-Մ կոնդենսատորային կառուցվածքի բարձրիաճախականային (դինամիկ-իմպեդանսային) բնութագրերը բարձր լարվածությամբ դաշտերի կիրառման ռեժիմում:

Ֆերոել եկտրական կոնդենսատորները երկար տարիներ հաջողությամբ կիրառվում են ԳԲՀ միկրոելեկտրոնիկայում՝ որպես պասիվ, կառավարելի ոչ գծային ունակություններ (վարիկապներ): Գիտական գրականության մեջ դրանց բնութագրերի, ընթացող ֆիզիկական երևույթների, կիրառման բնագավառների, զարգացման հեռանկարների վերաբերյալ տասնյակ տարիների ընթացքում կատարվել են բազմաթիվ հետազոտություններ, որոնք վերաբերում են հիմնականում Ֆերոելեկտրիկ կոնդենսատորների ԳԲՀ բնութագրերին, կորուստների անկյան տանգենսին, կորստյան հոսանքների մեխանիզմներին, հոգնածության ու ծերացման երևույթներին, դիելեկտրիկ թափանցելիության էլեկտրական և ջերմային ոչ գծայնությանը, բևեռացմանը, էլեկտրոնային սպեկտրի մոդելավորմանը և այլն [26, 44, 102, 105]:

Վերջին տարիներին էլ ավելի աճեց հետաքրքրությունը Ֆերոելեկտրական թաղանթների և հատկապես նանոթաղանթների նկատմամբ, կապված դրանց հիման վրա (Ֆերոելեկտրիկ փականով ՄՕԿ տրանզիստորային կառուցվածքների էներգոանկախ հիշող տարրերի) խոստովանալից հեռանկարներով և ժամանակակից հիշող տարրերից շահեկանորեն տարբերվող սարքերի պատրաստման և կիրառման հետ [3, 7, 20, 106]: Ընդ որում, վերը նշված բոլոր հետազոտություններում շատ քիչ են աշխատանքները, որոնք կապված լինեն թթվածնի վականսիաների (անխուսափելի դեֆեկտներ են բոլոր պերովսկիտ կառուցվածքով բարդօքսիդային նյութերում) և հատկապես այդ դեֆեկտներին համապատասխանող էներգիական թակարդային մակարդակներից ուժեղ էլեկտրական դաշտի ազդեցության տակ Պուլ-Ֆրենկելյան էմիսիայի երևույթների նկարագրման ու բացահայտման հետ:

Համեմատաբար քիչ են աշխատանքները, որտեղ տեսականորեն հիմնավորված լինեն ինժեկցիոն հոսանքների, հիստերեզիսային, ծերացման և այլ երևույթների առաջացման էլեկտրաֆիզիկական

պատճառները, այդ երևույթների կապը դիէլեկտրիկ թափանցելիության՝ էլեկտրական դաշտից ունեցած ոչ գծային կախվածությունից, թթվածնի վականսիաներով պայմանավորված խորը «թակարդային» մակարդակների կոնցենտրացիայից, արգելման գոտում դրանց էներգիական բաշխվածությունից, Պուլլ-Ֆրենկելի մեխանիզմով լիցքակիրների իոնացման երևույթներից:

Ավելին, հենց թթվածնային վականսիաների առկայությունն ու դրանց միգրացիան են պայմանավորում բուրրովին վերջերս մեծ հետաքրքրությամբ հետազոտվող «մեմրիստիվ» երևույթներն ու սարքերը, որոնք հիմնված են պերովսկիտային բարդօքսիդային թաղանթների վրա[10]:

Բացի այդ, նշված գրեթե բոլոր հետազոտություններում չի քննարկվել ֆերոէլեկտրիկ նյութում լիցքակիրների թռիչքային շարժումը և այդ ընթացքում դրանց փոխազդեցության երևույթները ԳԲՀ դաշտի հետ:

Սույն աշխատանքում առաջին անգամ փորձ է արվում քննարկել ու Մ-ՖԷ-Մ թաղանթային կառուցվածքում միաժամանակ հաստատուն և փոփոխական ազդանշանների կիրառման ռեժիմում թթվածնի վականսիաներով պայմանավորված էլեկտրոնային թակարդային մակարդակներից արձակվող էլեկտրոնների՝ դրեյֆային տիրույթում արտաքին բարձր հաճախականային դաշտի հետփոխազդեցության երևույթները:

Մոդելում ընդունվում է, որ Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքում Մ-ՖԷ կոնտակտները ինժեկտում են շատ չնչին քանակի կամ գրեթե լիցքակիրներ չեն ինժեկտում դեպի ֆերոէլեկտրիկ թաղանթ, այսինքն՝ թաղանթում (մեկուսիչ-ֆերոէլեկտրիկ) առկա ազատ էլեկտրոնները հետևանք են ենթամակերևութային շերտի թակարդներում գրավված էլեկտրոնների դաշտային Պուլլ-Ֆրենկելյան իոնացման (առաքման) [100, 107–110], որոնք, այնուհետև շարժվելով թաղանթի երկայնքով, էլեկտրական դաշտի ազդեցության տակ կարող են փոխազդեցության մեջ մտնել ԳԲՀ փոփոխական դաշտի հետև դրսևորել համապատասխան ԳԲՀ իմպեդանսային վարք և ՎԱԲ:

Սույն մոդելում ընդունվում է որ [40, 74, 96, 104]՝

1. ինչպես հայտնի է էներգիական սպեկտրների վերլուծության ներքին ու տարբեր բնույթի այլ հետազոտության ներքին, թթվածնի վականսիաները հիմնականում կուտակվում են մետաղական կոնտակտին հարող ենթամակերևութային շերտում և ցուցաբերում են «դոնորային» խարսուրդներին բնորոշ վարք ֆերոէլեկտրիկում՝ վերջինիս օժտելով հիմնականում ոտիափ հաղորդականությամբ,

2. ուժեղ հաստատուն և փոփոխական դաշտերի ազդեցության տակ ֆերոէլեկտրիկի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը ոչ գծայնորեն է կախված արտաքին դաշտի E լարվածությունից և փոխվում է $\varepsilon(E) = \varepsilon_r(1 + AE^2)^{-1}$ օրենքով: Հաշվի է առնվում նաև ֆերոէլեկտրիկի դիէլեկտրիկ թափանցելիության կախվածությունը հաստատուն և փոփոխական դաշտի լարվածություններից, այսինքն՝ $\varepsilon(E) = \varepsilon_r(1 + AE^2)^{-1} = \varepsilon_{00} + \varepsilon_1 e^{j\omega t}$, որտեղ $\varepsilon_r = \varepsilon_0 \varepsilon(0)$, ε_0 -ն վակուումի դիէլեկտրիկ հաստատունն է, $\varepsilon(0)$ -ն ֆերոէլեկտրիկի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունն է գոյական դաշտի դեպքում, A -ն էմպիրիկ գործակից է, $A \approx 0.45 \cdot 10^{-11} \text{ սմ}^2/\text{Վ}^2$, ε_{00} -ն դիէլեկտրիկ թափանցելիության հաստատունն է, իսկ ε_1 -ը՝ փոփոխական բաղադրիչի լայնության արժեքը, ω -ն՝ ազդանշանի հաճախությունը, t -ն՝ ժամանակը,

3. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքում շերմադիսամիկ հավասարակշռության վիճակում, երբ արտաքին մեծ դաշտ չի կիրառված, ընդունվում է, որ ազատ էլեկտրոնների խտությունը անտեսելու աստիճանը փոքր է, կոնտակտները չունեն գգալի ինժեկտոր հատկություններ, և ֆերոէլեկտրիկի հաղորդական գոտում ազատ էլեկտրոնները հիմնականում առաջանում են $E = E_0 + E_1 e^{j\omega t}$ արդյունարար (հաստատուն և փոփոխական) դաշտերի վերադրման հետևանքով թթվածնի վականսիաները չեզոքացնող դեֆեկտային մակարդակներից էլեկտրոնների Պուլլ-Ֆրենկելյան առաքման արդյունքում,

4. թակարդային մակարդակներից առաքված էլեկտրոնները (մետաղի հետ ենթակոնտակտային շերտից) այնուհետև շարժվում են թաղանթի երկայնությամբ գրթե հագեցման արագությամբ և կարող են որոշակի հաճախականային (թռիչքային) ռեժիմում փոխազդեցության

մեջ մտնել կիրառված փոփոխական ԳԲՀ դաշտի հետև ձևավորել համապատասխան ոչ գծային (դինամիկ) իմպեդանսային վարք և ՎԱԲ, 5. ընդունենք, որ թթվածնի վականսիաների խտությունը N_0^+ է, որոնցից յուրաքանչյուրը արգելման գոտում ձևավորում է էլեկտրոնային թակարդային N_t մակարդակ, որի էներգիական հեռավորությունը ֆերոէլեկտրիկի հաղորդականության գոտու E_c հատակից գտնվում է E_t հեռավորության վրա: Ընդունում ենք, որ էլեկտրոնները հիմնականում փոխանակվում են հաղորդականության գոտու հետ: Եթե թակարդակների խտությունը n_t է, ապա թերնոդինամիկ հավասարակշռության ռեժիմում թակարդներում գրավված էլեկտրոնների խտությունը, կինետիկ հավասարման հիման վրա, կարտահայտվի [99],

$$n_{t0} = \frac{n_{t0} N_t}{n + \gamma(E_t)} = \frac{N_t}{1 + \gamma(E_t)/n_{t0}} = \frac{N_0^+}{1 + \gamma(E_t)/n_{c0}},$$

որտեղ n_{c0} -ն այն ազատ էլեկտրոնների խտությունն է, որոնք հետևանք են (հիմնականում) թակարդային N_t մակարդակներից էլեկտրոնների դաշտային Պուլլ-Ֆրենկելյան առաքման,

$$\gamma(E_t) = \frac{N_c}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{KT}\right),$$

ուր g -ն այլասերման գործոնն է ($g=2$ [94, 99, 102, 111, 112]), N_c -ն՝ ֆերոէլեկտրիկի հաղորդական գոտում վիճակների արդյունարար խտությունը, E_F -ը՝ Ֆերմիի քվազիմակարդակի էներգիան,

6. ազատ էլեկտրոնների խտությունը, ինչպես ֆերոէլեկտրիկի և արտաքին կիրառված դաշտը (ազդանշանը) բնութագրող մյուս պարամետրերը (շարժունակությունը, դաշտի լարվածությունը, էլեկտրոնների արագությունը, դիէլեկտրիկի թափանցելիությունը և այլն), ներկայացվում են համապատասխան հաստատուն և փոփոխական բաղադրիչների միջոցով, որը հայտնի մեթոդ է փոքր ազդանշանային վերլուծության համընդանուր ընդունված բնագավառում:

§ 5.2. Մաթեմատիկական մոդելը և տեսական առնչությունները

Մենք առաջարկում ենք \$երոուելեկտրական ԳԲՀ տարրերի վերը նշված բնութագրերի ուսումնասիրման, տեսական հաշվարկների և մաթեմատիկական մոդելավորման նոր մոտեցումներ, որտեղ հաշվի են առնված վերը նշված գործոնները:

Բացի այդ, ներկայումս կատարվող հետազոտություններում բաց է մնացել այն հարցը, թե կոնտակտից ինժեկտվելուց (կամ թակարդներից իոնացումից) հետո \$երոուելեկտրիկի դրեյֆային տիրույթում լիցքակիրներն իրենց տեղափոխման ընթացքում ինչպես կարող են փոխազդեցության մեջ մտնել փոփոխական դաշտի հետ, և դրանց վարքը ինչպիսի փոփոխություն կարող է կրել էջ 82-ի 2. կետում նշված գործոնների առկայության դեպքում: Մյուս կողմից ԳԲՀ թռիչքային երևույթների վրա հիմնված սարքերի (IMPATT, BARRITT, TUNNETT, QWTUNNETT և այլն [111, 113–120]) համար հայտնի է, որ նման սարքերում բացասական դինամիկ դիմադրության օպտիմալ արժեքներ (հետևաբար ԳԲՀ մեծ հզորություններ) ստանալու համար անհրաժեշտ է, որ դրեյֆային տիրույթի նյութը լինի բարձրօհմական և բնութագրվի լիցքակիրների փոքր շարժունակությամբ: Այս տեսակետից \$երոուելեկտրիկ նյութերը բավարարում են անհրաժեշտ պայմաններին: Եթե այս տեսական մոդելները ստանան փորձնական հաստատում, ապա դա կբացի շատ մեծ հեռանկարներ \$երոուելեկտրական նյութերի հիման վրա ինտեգրել արդեն հայտնի պասսիվ տարրերը և ակտիվ տարրերը, և միանգամայն մատչելի կդառնա \$երոուելեկտրական ինտեգրալ սխեմաների իրագործումը:

Դիտարկենք Մ-ՖԷ-Մ կոնդենսատորային կառուցվածքը, որում թթվածնի վականսիաների մեծ խտությունն առկա է մետաղական կոնտակտների մակերևութային շերտում (նկ.5.1) և կառուցվածքին կիրառված է մեծ լարվածություն՝ դաշտայնպես, որ թակարդային մակարդակներից տեղի ունենա էլեկտրոնների առաքում (թակարդի իոնացում)՝ Պուլլ-Ֆրենկելյան, թուլնելային և \$ոնոնների հետ փոխազդեցությամբ պայմանավորված (նկ. 5.2.(բ) և նկ.5.3) [100, 107–110]: Դրական լիցքավորված թթվածնի վականսիաները ձևավորում են ծանծաղ մակարդակներ հաղորդական գոտու նկատմամբ [36, 44, 92, 93,

102, 103, 105, 121–125], իսկ երբ թթվածնի ատոմները նույնացնում են *Ti*-ի ատոմների տեղակալ ման հետ, առաջանում են խորը մակարդակներ:

Ընդունվում է, որ թթվածնի յուրաքանչյուր վականսիային համարժեք (չեզոքությունը պահպանող) բացասական էլեկտրոնային լիցքը գրավվում է հիմնականում թակարդային մակարդակների կողմից և շատ չնչին քանակությամբ կարող է գտնվել ազատ վիճակում: Բացի այդ, կառուցվածքներում կորստյան հոսանքների ուսումնասիրություններով պարզվել է [26, 111], որ այդ հոսանքները, կախված կոնտակտի հատկություններից և կիրառված հաստատուն դաշտի լարվածության մեծությունից, կարող են ունենալ թուներային քվազիմեխանիկական թափանցման, թռիչքային (թակարդային մակարդակների միջոցով և միջև, *hopping*), Պուլլ-Ֆրենկելի և հիմնականում ճոտկիի արգելքով էմիսիոն բնույթ, ինչպես նաև փոքր հոսանքների տիրույթում՝ *SCL* բնույթ [105, 111]: Պուլլ-Ֆրենկելի մեխանիզմը տեղի է ունենում համեմատաբար մեծ լարվածությունների դեպքում:

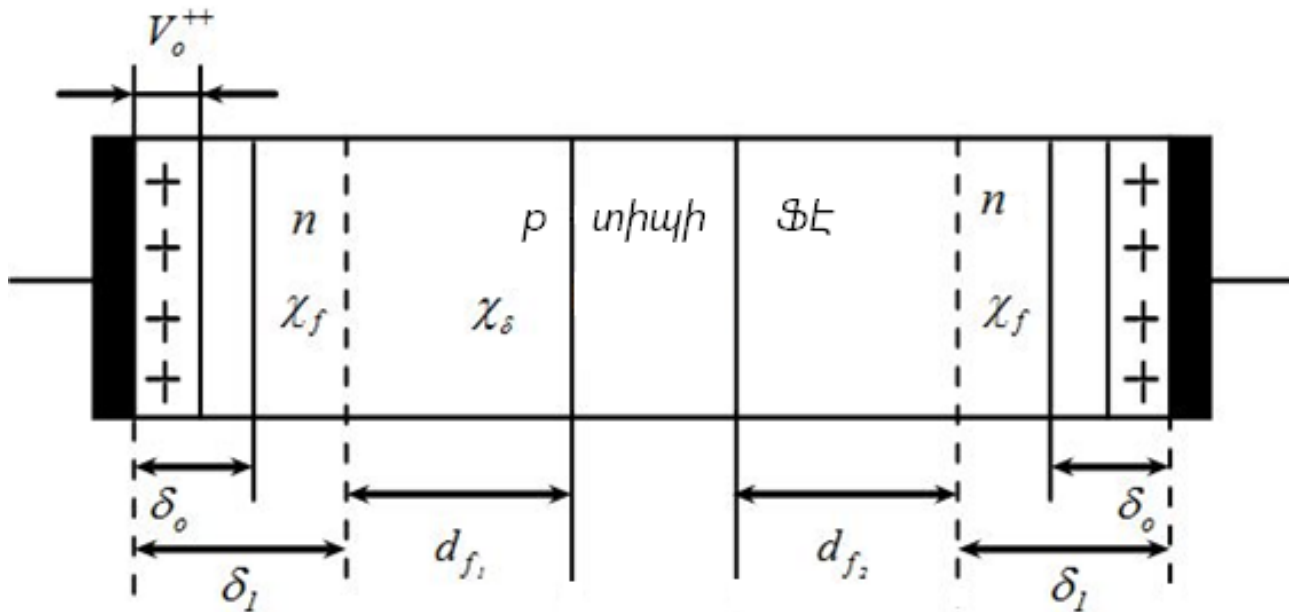
Ընդունենք, որ \$երոելեկտրիկի հաղորդման գոտում առկա են փոքր քանակությամբ ազատ էլեկտրոններ, իսկ թթվածնի վականսիաները չեզոքացնող համարժեք էլեկտրոնները գրավված են *E_c* էներգիական մակարդակներով բնութագրվող թակարդներում:

Ընդունենք նաև, որ ռեկոմբինացիոն երևույթները կարելի է անտեսել, ինչը հեշտությամբ կիրականանա, եթե մեկուսիչ (\$երոելեկտրիկի) շերտում մեծ լարվածությամբ դաշտերի դեպքում ունենանք աղքատացած շերտերի հպման ռեժիմ (*punch-through*): Նման իրավիճակում կոնտակտից ինժեկտված էլեկտրոնները կարող են գրավվել (փոխանակվել) թակարդների կողմից, և ի տարբերություն ինժեկցիոն հոսանքների վերլուծության դասական մոտեցումների [99, 112], այստեղ ընդունում ենք, որ ազատ էլեկտրոնների միջև բալանսը փոփոխվում է ոչ միայն ինժեկցիայով պայմանավորված ազատ էլեկտրոնների փոփոխման պատճառով (դասական ընդունված մոտեցում), այլև ուժեղ էլեկտրական դաշտի ազդեցության տակ, բալանսը փոփոխվում է նաև թակարդներից էլեկտրոնների Պուլլ-Ֆրենկելյան իոնացման հետևանքով: Ընդ որում, թակարդները էլեկտրոններ կփոխանակեն միայն հաղորդական գոտու հետ:

Եթե ընդունենք, որ ազատ էլեկտրոնների բաշխումը ենթարկվում է Ֆերմի-Դիրակի բաշխմանը, ապա՝

$$n = n_i + n_{pF} + n_{c0} \cong N_c \exp\left(\frac{F - E_c}{KT}\right),$$

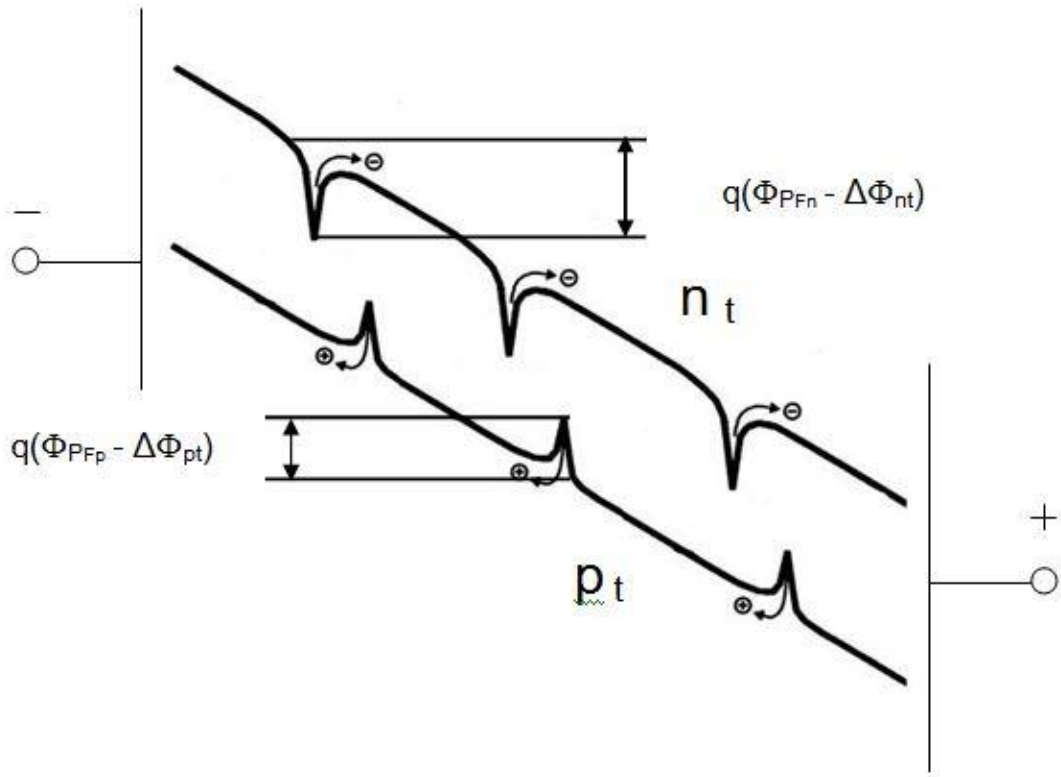
որտեղ n_{c0} -ն Ֆերմի էլեկտրիկ թերմոդինամիկ հավասարակշռության վիճակում ազատ էլեկտրոնների խտությունն է (կընդունենք այն շատ փոքր Ֆերմի էլեկտրիկ համար), n_i -ն՝ ինժեկտված էլեկտրոնների խտությունը, n_{pF} -ը՝ Պուլլ-Ֆրենկելի մեխանիզմով իոնացված էլեկտրոնների խտությունը, F -ը՝ Ֆերմիի քվազիմակարդակի էներգիան, E_c -ն՝ հաղորդականության գոտու հատակի էներգիան, k -ն՝ Բոլցմանի հաստատունը, T -ն՝ բացարձակ ջերմաստիճանը, N_c -ն՝ հաղորդականության գոտու վիճակների արդյունարար խտությունը:



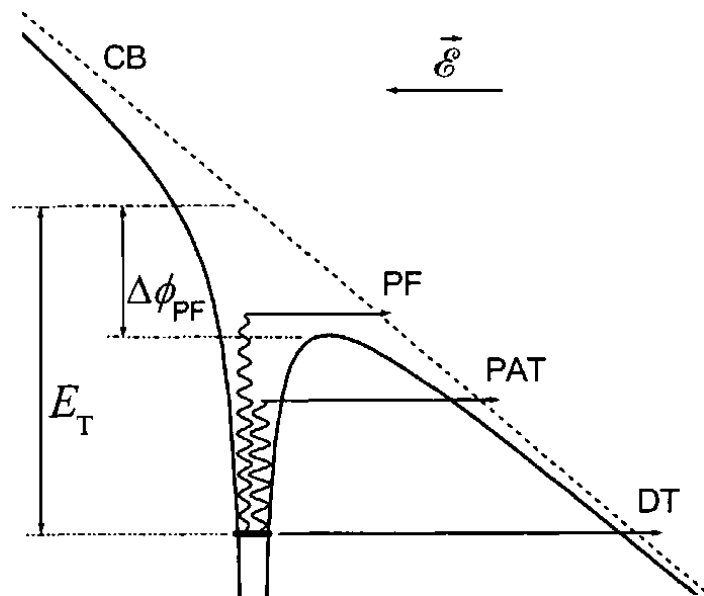
Նկ.5.1. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի լայնական կտրվածքի սխեմատիկ պատկերը

Ընդհանուր դեպքում կարող ենք ընդունել, որ մետաղական կոնտակտից դեպի Ֆերմի էլեկտրական թաղանթ տեղի է ունենում նաև Շոտկիի մեխանիզմով էլեկտրոնների առաքում, ինչն ընդամենը կբերի ազատ էլեկտրոնների կոնցենտրացիայի մեծացմանը: Դեպի Ֆերմի էլեկտրական թաղանթ ինժեկտված կամ Պուլլ-Ֆրենկելյան,

թուլնելային, ֆոնոնային մեխանիզմներով (նկ.5.2.ա,բ) առաջացած էլեկտրոնները այնուհետև թաղանթի երկայնքով կդրեյ ֆենդեպի (2)-րդ կոնտակտը՝ այդ ընթացքում փոխազդելով բարձր հաճախությամբ փոփոխական դաշտի հետ (նկ.5.3):



(ա)



(բ)

Նկ. 5.2. (ա) էլեկտրական դաշտի ազդեցության տակ էլեկտրոնային $\Delta\Phi_n$ և խոռոչային $\Delta\Phi_p$ «թակարդների» արտենցիալ արգելքների նվազման

հետևանքով լիցքակիրների Պոուլ-Ֆրենկելյան առաքման սխեմայի կառուցվածքը [107] և (բ) էլեկտրոնների էմիսիայի հնարավոր մեխանիզմները (PF- Պոուլ-Ֆրենկելյան իոնացում, DT- ուղիղ թունել անցում դեպի հաղորդականության գոտի (CB), PAT- ֆոնոնների փոխադրեցում թափ թունել անցում (phonon assisted tunneling) [100, 109, 110])

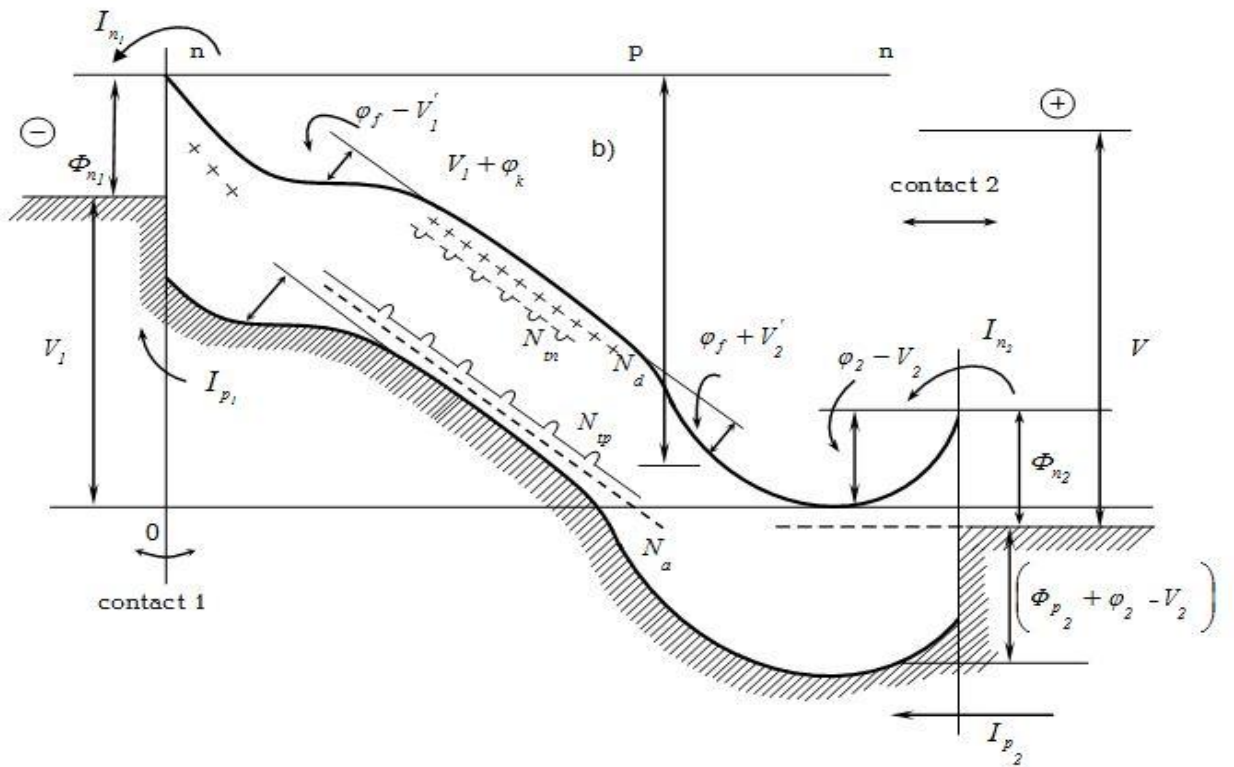
Քանի որ, ինչպես հայտնի է, թակարդների վրա գրավված լիցքակիրների կյանքի տևողությունը կարող է մեկ կարգ կամ ավելի գերազանցել ծավալային լիցքակիրների կյանքի տևողությանը և թռիչքի ժամանակին, և հաշվի առնելով, որ ֆերոէլեկտրիկում անխուսափելիորեն առկա թակարդային մակարդակները կարող են հանդես գալ որպես գրավման կենտրոններ (նկ.5.3), ապա ելնելով վերը շարադրվածից՝ և՛ տեսական, և՛ կիրառական կարևոր նշանակություն կունենա Մ-ՏԷ-Մ կառուցվածքների դինամիկ բնութագրերն ուսումնասիրելը կոնտակտի տարբեր հատկությունների և փոփոխական ազդանշանի տարբեր հաճախությունների պայմաններում:

Չայտնի է, որ մետաղ-կիսահաղորդիչ-մետաղ, p-n-p, n-p-n և այլ նմանատիպ կառուցվածքների բարձր հաճախականային բնութագրերն ուսումնասիրվել են հիմնականում լիցքակիրների արագության հագեցման ռեժիմներում, այսինքն՝ $\mu(E)$ կախվածությունն առկա է, և մյուս կողմից BARRITT-ի տեսությունն ից հայտնի է, որ ինչքան փոքր լինի μ շարժունակությունը, այնքան մեծ կլինի փոփոխական դաշտերի նկատմամբ լիցքակիրների հապաղումը (delay time), որը կբերի ԲԴԴ առաջացման և մեծության աճի նպաստման:

Ահա ելնելով դրանից՝ հեռանկարային է թվում ուսումնասիրել μ -ի ազդեցությունը ԳԲՅ հատկությունների վրա, քանի որ ֆերոէլեկտրիկներում ըստ գրականության տվյալների μ -ն շատ փոքր է և կարող է փոխվել լայն սահմաններում:

Փաստորեն, գիտական գրականության մեջ, ինչքան հայտնի է մեզ, բացակայում են այս ուղղությամբ հետազոտություններ, և առաջին անգամ փորձ է արվում ֆերոէլեկտրական թաղանթներում անխուսափելիորեն (մշտապես) գործող թթվածնի վակուսիաներն անցանկալի, թերությունն համարվող գործոնից որոշակի աշխարհ

տանքային ռեժիմների համար վերածել դրական, նպաստող գործոնի, ինչպես նաև փորձել «օգտագործել» դիելեկտրիկ թափանցելիության ոչ գծայնությունը ԲԴԴ ռեժիմները և ավարկել ու տեսակետից:



Նկ.5.3. Էլեկտրական շեղման դեպքում պոտենցիալի բաշխումը Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքում

Չե տևաքար, հետաքրքիր է քննարկել վերոնշյալ երևույթները՝ բացահայտել ու համար, թե ՖԷ թաղանթի կառուցվածքային և էլեկտրաֆիզիկական բնութագրերը, թթվածնի վականսիաների առկայությունը, դիելեկտրիկ թափանցելիության՝ դաշտից ունեցած ոչ գծային կախվածությունն ինչ բնույթի երևույթների կարող են հանգեցնել: Սույն աշխատանքը վերաբերում է այդ երևույթների քննարկմանը:

Քննարկվող կառուցվածքում Պուլասոնի հավասարման համար կուլենենսք՝

$$\frac{\partial[\varepsilon(E)E(x)]}{\partial x} = \rho(x), \quad (5.1)$$

որտեղ $\rho(x)$ -ը ֆերոթադանթու մ ծավալ այ ին և իցքի խտությունն է, որը կարող ենք ներկայացնել հետևյալ կերպ՝

$$\rho(x) = q(N_0^+ - n_{t0} - n_c),$$

որտեղ N_0^+ -ը թթվածնի վականսիայով պայմանավորված դոնորային բնույթի դրական լիցքն է, n_{t0} -ն՝ թակարդներում գրավված էլեկտրոնների լիցքը, n_c -ն՝ ազատ էլեկտրոնների խտությունը, ինչը հիմնականում պայմանավորված կլինի Պուլլ-Ֆրենկելյան իոնացման և Շոտկիի առաքման երևույթներով:

Ընդունենք, որ ֆերոէլեկտրիկ դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը n_x գծային ֆունկցիա է դաշտի լարվածությունից՝

$$\varepsilon(E) \cong \frac{\varepsilon_0 \varepsilon(0)}{1 + AE^2} = \frac{\varepsilon_r}{\beta},$$

որտեղ ε_0 -ն վակուումի դիէլեկտրիկ հաստատունն է, $\varepsilon(0)$ -ն՝ Ֆե-ի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը գրոյական էլեկտրական դաշտում, $\varepsilon_r = \varepsilon_0 \varepsilon(0)$, $\beta = 1 + AE^2$, $A \approx 0.45 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2 / \text{V}^2$ [26]:

(5.1) հավասարումը ներկայացնենք հետևյալ տեսքով՝

$$\varepsilon(E) \frac{\partial E(x)}{\partial x} + E(x) \frac{\partial \varepsilon(E)}{\partial E} \cdot \frac{\partial E}{\partial x} = \rho(x)$$

$$\frac{\partial \varepsilon(E)}{\partial E} = \frac{-2AE\varepsilon_r}{(1 + AE^2)^2}$$

$$\frac{\varepsilon_r}{\beta} \cdot \frac{\partial E}{\partial x} + E \cdot \frac{\partial E}{\partial x} \left(-\frac{2AE\varepsilon_r}{\beta^2} \right) = \rho(x)$$

$$\left(\frac{\varepsilon_r}{\beta} - \frac{2AE^2\varepsilon_r}{\beta^2} \right) \frac{\partial E}{\partial x} = \rho(x) \quad (5.2)$$

$$\frac{\varepsilon_r}{\beta} \left(1 - \frac{2AE^2}{\beta} \right) \frac{dE}{dx} = \rho(x)$$

Եթե կառուցվածքին կիրառված է հաստատուն E_0 լարվածությունը դաշտ և E_1 լայնություն ու ω անկյունային հաճախությամբ փոփոխական ազդան, ապա գծային (փոքր ազդանշանային) մոտավորությամբ, ներկայացնելով բոլոր ֆիզիկական

մեծ ու թյ ու ներքը համապատասխան հաստատու և և փոփոխական բաղադրիչների տեսքով՝

$$E = E_0 + E_1 e^{j\omega t},$$

$$U = U_0 + U_1 e^{j\omega t},$$

$$n_c = n_{c0} + n_1 e^{j\omega t},$$

$$I = I_0 + I_1 e^{j\omega t},$$

$$n_r = n_{r0} + n_{r1} e^{j\omega t} \text{ և այլն,}$$

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 e^{j\omega t}, \quad \rho = \rho_0 + \rho_1 e^{j\omega t},$$

այսինքն՝

$$\beta = 1 + A(E_0 + E_1 e^{j\omega t})^2 \cong 1 + AE_0^2 + 2AE_0 E_1 e^{j\omega t},$$

և, անտեսելով բարձր կարգի փոփոխական բաղադրիչները, ինչպես նաև հաշվի առնելով, որ $\beta_0 = 1 + AE_0^2$ ՝ Պոլասոնի (5.2) հավասարումից հաստատու (գրո ինդեքսով) և փոփոխական (մեկ ինդեքսով) բաղադրիչների համար կստանանք՝ (տե՛ս Յավելված 5.1-ը)

$$\frac{dE_0}{dx} = \frac{\rho_0 \beta_0^2}{\varepsilon_r (1 - AE_0^2)} = \frac{q(N_0^+ - n_{r0} - n_{c0})\beta_0^2}{\varepsilon_r (1 - AE_0^2)}, \quad (5.3)$$

$$\frac{dE_1}{dx} = \frac{2AE_0 E_1}{\varepsilon_r (1 - AE_0^2)} \cdot \frac{dE_0}{dx} + \frac{\beta_0 [4A\rho_0 E_0 E_1 + \beta_0 \rho_1]}{\varepsilon_r (1 - AE_0^2)}, \quad (5.4)$$

որտեղ $\rho_0 = (N_0^+ - n_{r0} - n_{c0})q$, $\rho_1 = qn_{rp1} = qn_1$:

Կառուցվածքով հոսող հոսանքի փոփոխական և հաստատու բաղադրիչների համար կստանանք՝

$$I_0 = \rho_0 V_0 = qn_{c0} V_0 \quad (5.5)$$

$$I_1 = qn_{c0} V_1 + qn_1 V_0 + \frac{\partial(\varepsilon E)}{\partial t} \quad (5.6)$$

որտեղ V_1 -ը լիցքակիրների արագության փոփոխական բաղադրիչն է, V_0 -ն՝ միջին հաստատու բաղադրիչը, n_{c0} -ն ազատ էլեկտրոնների խտության հաստատու բաղադրիչն է, n_1 -ը՝ փոփոխական, իսկ (5.6)-ի վերջին անդամը ներկայացնում է մաքսվելյան շեղման հոսանքը [111]:

$\frac{\partial(\varepsilon E)}{\partial t}$ -ի համար հաշվի առնելով վերը նշված գործոնները՝ կուներանք՝

$$\frac{\partial(\varepsilon E)}{\partial t} = E_0 \frac{\partial \varepsilon}{\partial E_0} \cdot \frac{\partial E}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E_1 \left(\frac{\varepsilon_r}{+AE_0^2} - \frac{2AE_0^2 \varepsilon_r}{(1+AE_0^2)^2} \right) = j\omega E_1 \frac{\varepsilon_r}{\beta_0} \left(1 - \frac{2AE_0^2}{\beta_0} \right)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon E)}{\partial t} = \frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2} \cdot j\omega E_1 \cdot (1 - AE_0^2):$$

Հոսանքի փոփոխական բաղադրիչի համար կստանանք՝

$$I_1 = qn_{c0}V_1 + qn_1V_0 + j\omega E_1 \cdot \frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2} (1 - AE_0^2): \quad (5.7)$$

(5.4)-ը ներկայացնենք հետևյալ տեսքով՝

$$\frac{dE_1}{dx} - \frac{2AE_0E_1}{\varepsilon_r(1-AE_0^2)} \cdot \frac{dE_0}{dx} - \frac{4A\rho_0\beta_0E_0E_1}{\varepsilon_r(1-AE_0^2)} = \frac{\beta_0^2 \cdot qn_1}{\varepsilon_r(1-AE_0^2)}$$

$$qn_1 = \frac{\varepsilon_r(1-AE_0^2)}{\beta_0^2} \cdot \frac{dE_1}{dx} - \frac{2AE_0E_1}{\beta_0^2} \cdot \frac{dE_0}{dx} - \frac{4A\rho_0E_0E_1}{\beta_0}$$

$$qn_1 = \frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2} (1 - AE_0^2) \frac{dE_1}{dx} - \frac{2AE_0E_1}{\beta_0} \left(\frac{1}{\beta_0} \frac{dE_0}{dx} - 2\rho_0 \right),$$

որտեղ $\rho_0 = g(N_0^+ - n_{i0} - n_{c0})$, N_0^+ -ն թթվածնի վականսիաների խտությունն է, n_{i0} -ն՝ թակարդներում գրավված էլեկտրոնների հավասարակշռային խտությունը, q -ն՝ էլեկտրոնի լիցքը, n_{c0} -ն՝ ազատ էլեկտրոնների խտությունը:

Հետևաբար I_1 -ի համար կստանանք՝

$$I_1 = qn_{c0}V_1 + V_0 \left\{ \frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2} (1 - AE_0^2) \frac{dE_1}{dx} - \frac{2AE_0E_1}{\beta_0} \left(\frac{1}{\beta_0} \frac{dE_0}{dx} - 2\rho_0 \right) \right\} + j\omega E_1 \frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2} (1 - AE_0^2): \quad (5.8)$$

Հաշվի առնելով, որ

$$V_1 \cong \mu E_1 = -\mu \frac{1}{V_0} \frac{dU_1}{dt}$$

$$\frac{1}{V_0} \frac{dV_0}{dt} = \mu \frac{dE_0}{dx}$$

$$V_0 \frac{dE_0}{dx} = \frac{\beta_0^2 \rho_0}{\varepsilon_r (1 - AE_0^2)} V_0$$

$$V_0 \frac{dE_1}{dx} = -\frac{1}{V_0} \left[\frac{d^2 U_1}{dt^2} - \frac{1}{V_0} \frac{dV_0}{dt} \cdot \frac{dU_1}{dt} \right] = -\frac{1}{V_0} \left[\frac{d^2 U_1}{dt^2} - \mu \frac{dE_0}{dx} \cdot \frac{dU_1}{dt} \right],$$

որտեղ U_1 -ը փոփոխական է արման էլայնույթն է, իսկ t -ն՝ ժամանակը՝ I_1 -ի համար կստանանք՝

$$I_1 = qn_{c0} \mu \left(-\frac{1}{V_0} \frac{dU_1}{dt} \right) + V_0 \frac{dE_1}{dt} \left[\frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2} (1 - AE_0^2) \right] - V_0 \frac{2AE_0}{\beta_0} \left(-\frac{1}{V_0} \frac{dU_1}{dt} \right) \left[\frac{1}{\beta_0} \cdot \frac{\beta_0^2 \rho_0}{\varepsilon_r (1 - AE_0^2)} - 2\rho_0 \right] + j\omega \left(-\frac{1}{V_0} \frac{dU_1}{dt} \right) \frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2} (1 - AE_0^2), \quad (5.9)$$

որն իրենից կներկայացնի կառուցվածքի փոփոխական ազդանշանային ՎԱԲ-ը:

(5.9) հավասարումը ներկայացնենք հետևյալ տեսքով (տե՛ս Յավելված 5.2-ը)

$$\frac{d^2 U_1}{dt^2} + (j\omega + \omega_1) \frac{dU_1}{dt} = -\frac{V_0 I_1}{\beta_2}, \quad (5.10)$$

որտեղ

$$\beta_2 = \frac{\varepsilon_r (1 - AE_0^2)}{\beta_0^2}, \quad \omega_1 = \frac{gn\omega\mu}{\beta_2} - \frac{\rho_0}{\beta_2} \left[\mu - \frac{2AE_0 V_0}{\beta_0} \left(\frac{1}{\beta_0 \beta_2} - 2 \right) \right]:$$

(5.10) հավասարումը վերոհիշյալ գործոնների վերլուծության հիման վրա կարող ենք ներկայացնել հետևյալ տեսքով (տե՛ս Յավելված 5.2-ը)

$$\frac{d^2 U_1}{dt^2} + (j\omega - \omega_2) \frac{dU_1}{dt} = -\frac{I_1 V_0}{\beta_2}, \quad (5.11)$$

որտեղ $\omega_2 = \frac{\omega_1}{\beta_0} (1 + 5AE_0^2)$:

(5.11) հավասարման լուծումն ունի հետևյալ տեսքը՝

$$-U_1 = \frac{a\tau^3}{\theta_t^2} \left\{ \frac{1}{j\theta - \beta_3 \theta_t} (1 - e^{-(j\theta - \beta_3 \theta_t)}) - \frac{e^{\theta_t}}{j\theta + \theta_t (1 - \beta_3)} + \frac{e^{-(j\theta - \beta_3 \theta_t)}}{j\theta + \theta_t (1 - \beta_3)} + \frac{\theta_t}{j\theta - \beta_3 \theta_t} \left(1 - \frac{1}{j\theta - \beta_3 \theta_t} \right) + \frac{\theta_t e^{-(j\theta - \beta_3 \theta_t)}}{j\theta - \beta_3 \theta_t} \right\}: \quad (5.12)$$

Տածր ազդանշանային իմպուլսի համար կուսենանք՝

$$Z = \frac{-U_1}{I_1},$$

որտեղ $(-U_1)$ -ը սարքի վրա փոքր ազդանշանային լարումն է, որը կարող ենք հաշվել 5.12 կամ 3.5.2.14 արտահայտություններով:

Ներկայացնենք $Z = R - jX$ տեսքով, այսինքն՝ ներկայացնենք Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքը՝ որպես համարժեք դիմադրության և համարժեք ունակության գույքահեռմիացված շղթա:

Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքում էլեկտրական դաշտի տարածական բաշխումը կստանանք՝

$$E_1 = -\frac{1}{V_0} \frac{dU_1}{dt}$$

արտահայտությունն ինչ, եթե V_0 -ի համար տեղադրենք

$$V_0 = \frac{I_0 \mu}{\beta_2 \omega t} (1 - e^{\omega t}):$$

Այնուհետև շեղման հոսանքը կարող ենք հաշվել՝

$$I_{1dis} = \frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2} j \omega E_1 (1 - A E_0^2)$$

արտահայտումբ, արագության մոդուլը և ցիայով պայմանավորված հոսանքը՝

$$I_{1v} = \mu I_0 \frac{E_1}{V_0}$$

արտահայտումբ, լիցքակիրների (էլեկտրոնների) խտության մոդուլը և ցիայով պայմանավորված հոսանքը՝

$$I_{1n} = I_1 - I_{1dis} - I_{1v}$$

արտահայտումբ:

(5.12) արտահայտության ձևափոխությունն ինչ հետո R -ի, X -ի համար համապատասխանաբար կստանանք՝

$$R = \left[\frac{a_2}{\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2} \right] \left\{ \beta_3 \theta_t (1 + \theta_t) + \theta_t (\theta - \theta_t^2 \beta_3^2) + e^{\beta_3 \theta_t} (\theta \sin \theta + \beta_3 \theta_t \cos \theta) (\theta_t - 1) + \frac{[\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2] \cdot [\theta_t e^{\theta_t} (1 - \beta_3) - e^{\beta_3 \theta_t} (\theta \sin \theta - \theta_t (1 - \beta_3) \cos \theta)]}{\theta^2 + (\theta_t (1 - \beta_3))^2} \right\}, \quad (5.13)$$

$$X = \left[\frac{a_2}{\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2} \right] \left\{ \frac{2\theta \beta_3 \theta_t^2}{\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2} - \theta (1 + \theta_t) + (1 - \theta_t) + e^{\beta_3 \theta_t} (\theta \cos \theta + \beta_3 \theta_t \sin \theta) + \right.$$

$$+ \left. \frac{[\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2] \cdot [\theta e^{\theta_t} + e^{\beta_3 \theta_t} (\theta \cos \theta + \theta_t (1 - \beta_3) \sin \theta)]}{\theta^2 + (\theta_t (1 - \beta_3))^2} \right\}, \quad (5.14)$$

որտեղ $a_2 = \frac{\mu I_0 \beta_0^2 \tau^3}{\varepsilon_r^2 (1 - AE_0^2) \theta_t^2}$, $a = \frac{I_1 \mu I_0}{\beta_2^2}$, $\beta_3 = \frac{(1 + 5AE_0^2)}{\beta_0}$, $\theta = \omega \tau$, $\omega_t = \frac{q \mu (N_0^+ - n_{t0})}{\beta_2}$,

$\theta_t = \omega_t \tau$, $\omega_2 = \frac{\omega_t}{\beta_0} (1 + 5AE_0^2)$, $\theta_2 = \omega_2 \tau$:

Մաթեմատիկական մոդելավորման գործընթացը հեշտացնելու համար ներկայացնենք R -ը և X -ը հետևյալ գումարելիների տեսքով՝

$$R = \left[\frac{a_2}{\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2} \right] \{R_1 + R_2\}, \quad (5.15)$$

$$R_1 = \beta_3 \theta_t (1 + \theta_t) + \frac{\theta_t (\theta - \theta_t^2 \beta_3^2)}{\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2} + (\theta_t - 1) e^{\beta_3 \theta_t} (\theta \sin \theta + \beta_3 \theta_t \cos \theta),$$

$$R_2 = \frac{(\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2) \cdot [\theta_t e^{\theta_t} (1 - \beta_3) - e^{\beta_3 \theta_t} (\theta \sin \theta - \theta_t (1 - \beta_3) \cos \theta)]}{\theta^2 + (\theta_t (1 - \beta_3))^2},$$

$$X = \left[\frac{a_2}{\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2} \right] \{X_1 + X_2\}, \quad (5.16)$$

$$X_1 = \frac{2\theta \beta_3 \theta_t^2}{\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2} - \theta (1 + \theta_t) + (1 - \theta_t) e^{\beta_3 \theta_t} (\theta \cos \theta - \beta_3 \theta_t \sin \theta),$$

$$X_2 = \frac{[\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2] \cdot [\theta_t e^{\theta_t} + e^{\beta_3 \theta_t} (\theta \cos \theta + \theta_t (1 - \beta_3) \sin \theta)]}{\theta^2 + (\theta_t (1 - \beta_3))^2}.$$

Պարամետրերի տեղադրումից հետո, R -ի և X -ի համար վերջնական տեսքով կունենանք

$$R = \frac{\mu I_0 (1 + AE_0^2)^2 \tau^3 \{R_1 + R_2\}}{\varepsilon_r^2 (1 - AE_0^2) \theta_t^2 [\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2] S}, \quad (5.17)$$

$$X = \frac{\mu I_0 (1 + AE_0^2)^2 \tau^3 \{X_1 + X_2\}}{\varepsilon_r^2 (1 - AE_0^2) \theta_t^2 [\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2] S}, \quad (5.18)$$

որտեղ S -ը թաղանթի (լայնական կտրվածք) մակերեսն է:

(5.17) և (5.18) արտահայտությունների հիման վրա կատարվել են կառուցվածքի իմպեդանսային բնութագրերի և կորստյան անկյան տանգենսի մեծություն՝

$$\operatorname{tg} \delta \cong \frac{1}{\omega RC},$$

հաշվարկներ՝ կառուցվածքի ու արտաքին ազդանշանի պարամետրերից ունեցած տարբեր կախվածություններ հաշվի առնելով:

(5.17) արտահայտության վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ մետաղական կոնտակտից լիցքակիրների թույլ ինժեկցիայի պարագայում R-ի բացասական արժեքը կարող է ի հայտ գալ թռիչքի այնպիսի անկյունների դեպքում, որոնց համար տեղի ունի հետևյալ անհավասարությունը՝

$$\cos \theta - \left(\frac{\theta_M \theta_T + \theta^2}{\theta_M \theta - \theta \theta_T} \right) \sin \theta > \exp(-\theta_M):$$

Անկյան համապատասխան միջակայքը մոտավորապես $3.6 < \theta < 7.2$ է՝ առավելագույն ԲԴԴ-ի համար ունենալով $\theta_{0\text{պ}} \approx 1.5\pi$ արժեքը: Երբ $\theta_{0\text{պ}} \approx 1.5\pi$, հաճախությունը որոշվում է $f_0 \approx \frac{3V_S}{4L_d}$ բանաձևով: Օրինակ՝

երբ $f=100$ ԳՀց, $L_d \sim 1.5$ մկմ, երբ $f=300$ ԳՀց, $L_d \sim 0.5$ մկմ, և երբ $f=1000$ ԳՀց, $L_d \sim 1500$ Å:

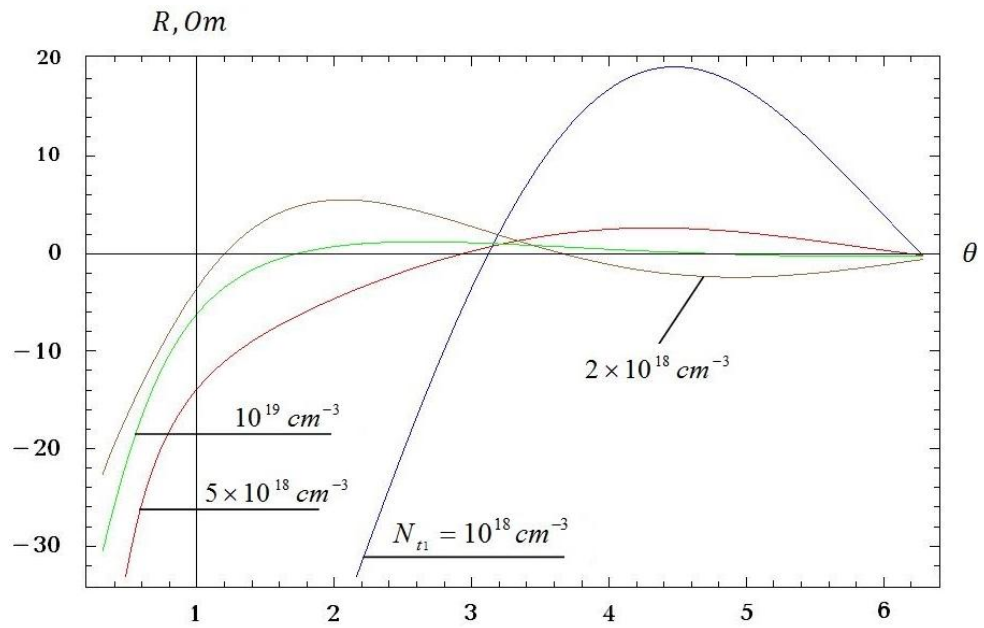
Ինչպես թռիչքային հայտնի սարքերի համար, այստեղ նույնպես կառուցվածքի դինամիկ բնութագրերի վրա էական ազդեցություն ունի դրեյֆային տիրույթի L_d երկարությունը, որը բնութագրում է ազդանշանի պարբերության և թռիչքի տևողության T/τ հարաբերակցությունը, և որը, ըստ ԳԲՀ ազդանշանի հաճախության, ինժեկտոր կոնտակտի հաղորդականության և լիցքակիրների հագեցման արագության, որոշում է առավելագույն ԲԴԴ մեծությունը:

Հաշվարկները կատարվել են ֆերոէլեկտրական թաղանթի և արտաքին ազդանշանի հետևյալ պարամետրերի համախմբի համար՝ $N_i = 10^{16} \dots 10^{19} \text{ սմ}^{-3}$, $f = 10^6 \dots 10^{11} \text{ Հց}$, $S_n = \sigma \langle V_{th} \rangle$, $V_{th} \approx 10^7 \text{ սմ/վ}$, $n_0 = 10^{10} \dots 10^{13} \text{ սմ}^{-3}$, $\mu = 0.01 \dots 30 \text{ սմ}^2/\text{վ}$, $\sigma = 10^{-14} \dots 10^{-16} \text{ սմ}^2$, $N_c \approx 10^{17} \text{ սմ}^{-3}$, $S = (2 \dots 8) \cdot 10^{-8} \text{ սմ}^2$, $I_0 = 10^2 \dots 10^3 \text{ Ա/սմ}^2$, $T \approx 10^{-11} \text{ վ}$, $\theta_0 = \frac{0.037 \mu_1 I_{01} \beta}{V_{0S1}}$, $V_{0S} \approx 10^4 \dots 10^5 \text{ սմ/վ}$,

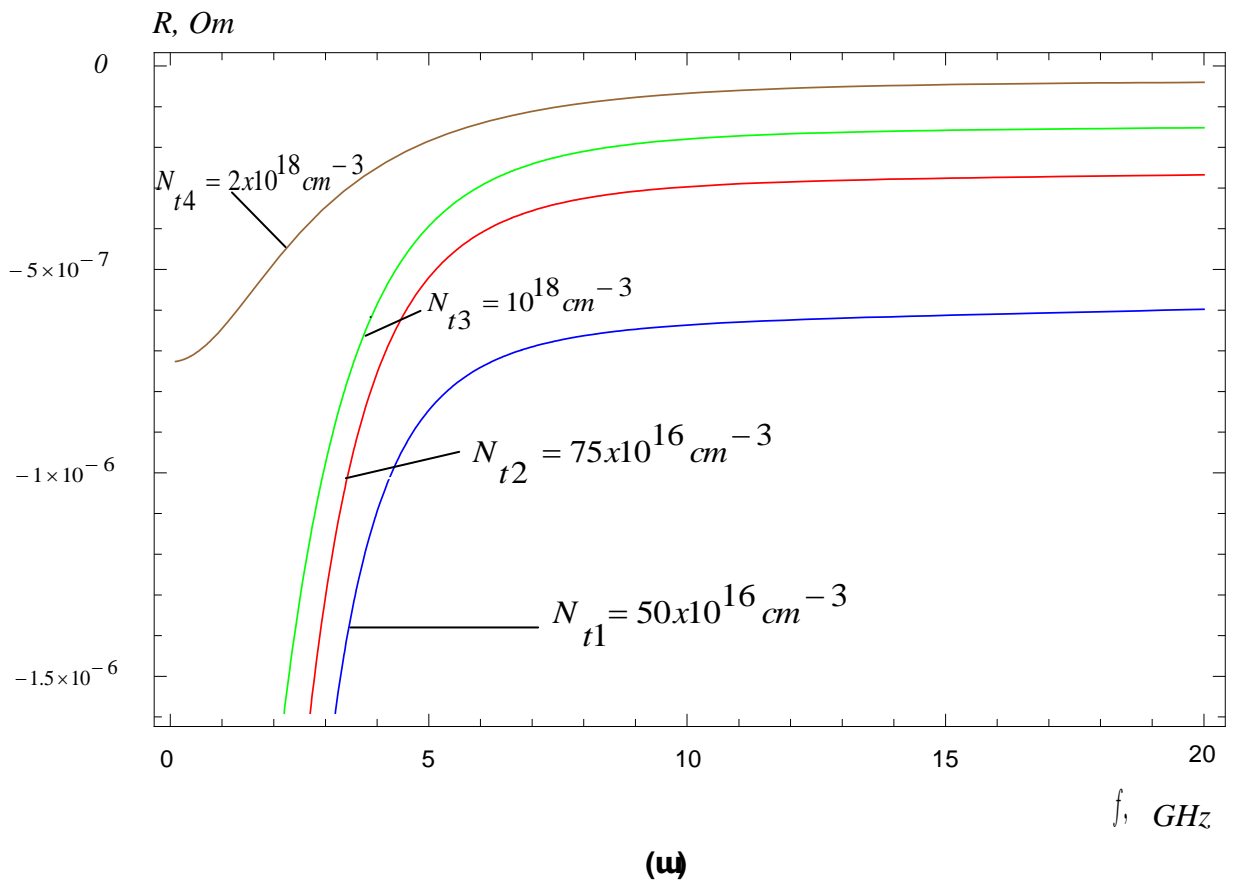
$$\theta_t \cong 0.67 \cdot 10^{-5} \dots 3, \quad l = 100 \dots 600 \text{ նմ}, \quad \varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ Ֆ/սմ}, \quad \varepsilon(0) = 106,$$

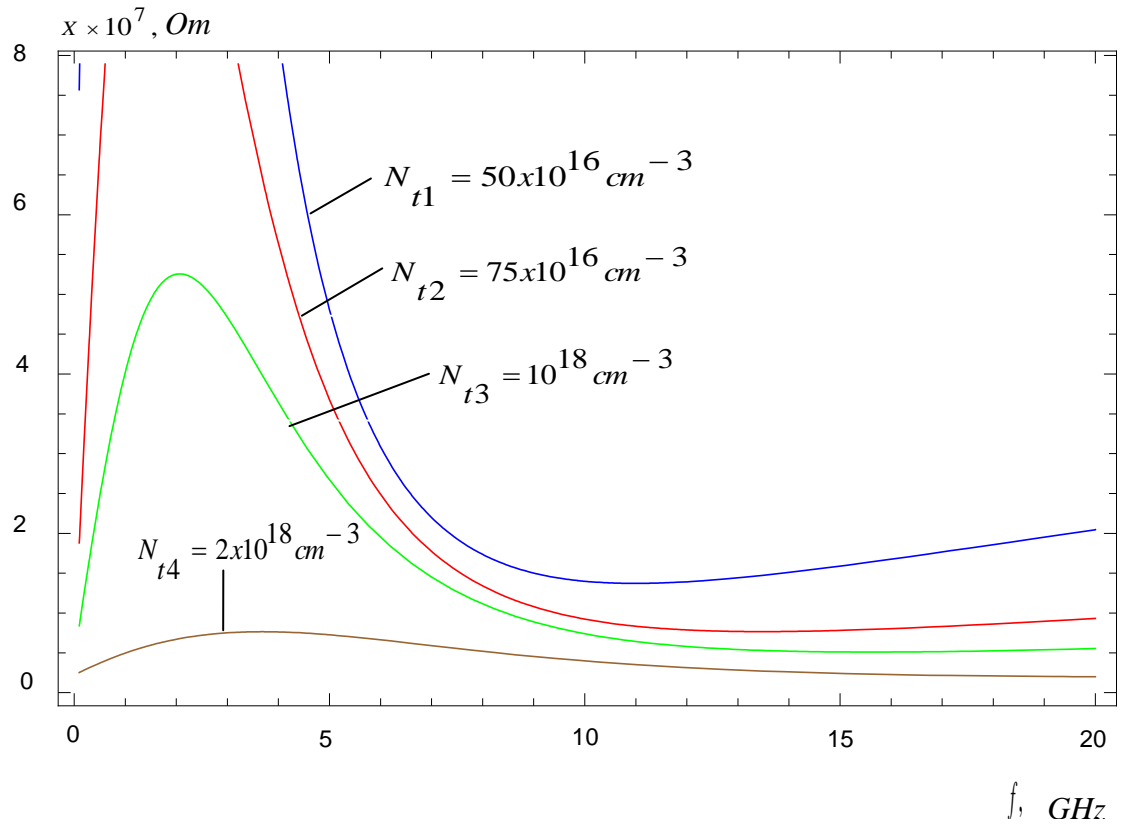
$$A \cong 0.45 \cdot 10^{-11} \text{ սմ}^2/\text{վ}^2, \quad g = 2:$$

Տեսական մոդելավորման արդյունքները ներկայացված են Ակ.5.4.-5.13-ում [104]:

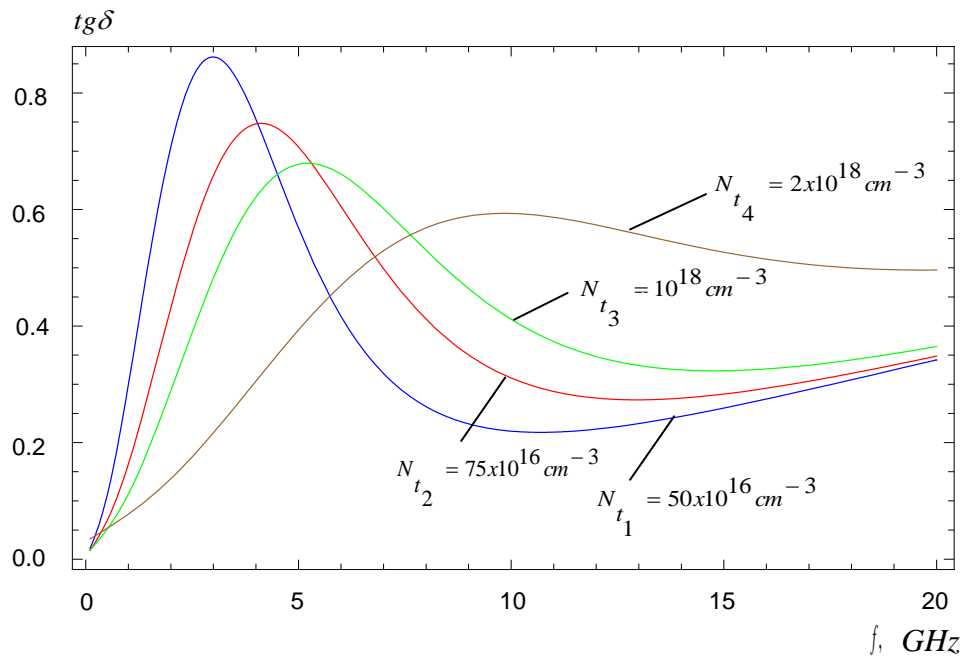


Նկ.5.4. R-ի կախվածությունը θ -ի նկատմամբ թափանցիկ թանկյունից՝ թակարդների տարբեր N_t կոնցենտրացիաների դեպքում: Մյուս պարամետրերը հետևյալն են՝ $\beta_3=1,7$; $\mu=1$ սմ²/Վ·վ; $E_0=3 \cdot 10^5$ Վ/սմ; $I_{01}=5 \cdot 10^2$ Ա/սմ²; $V_{0S}=5 \cdot 10^4$ սմ/վ; $S=6 \cdot 10^{-8}$ սմ²; $U=12$ Վ, $n_{co}=10^{11}$ սմ⁻³





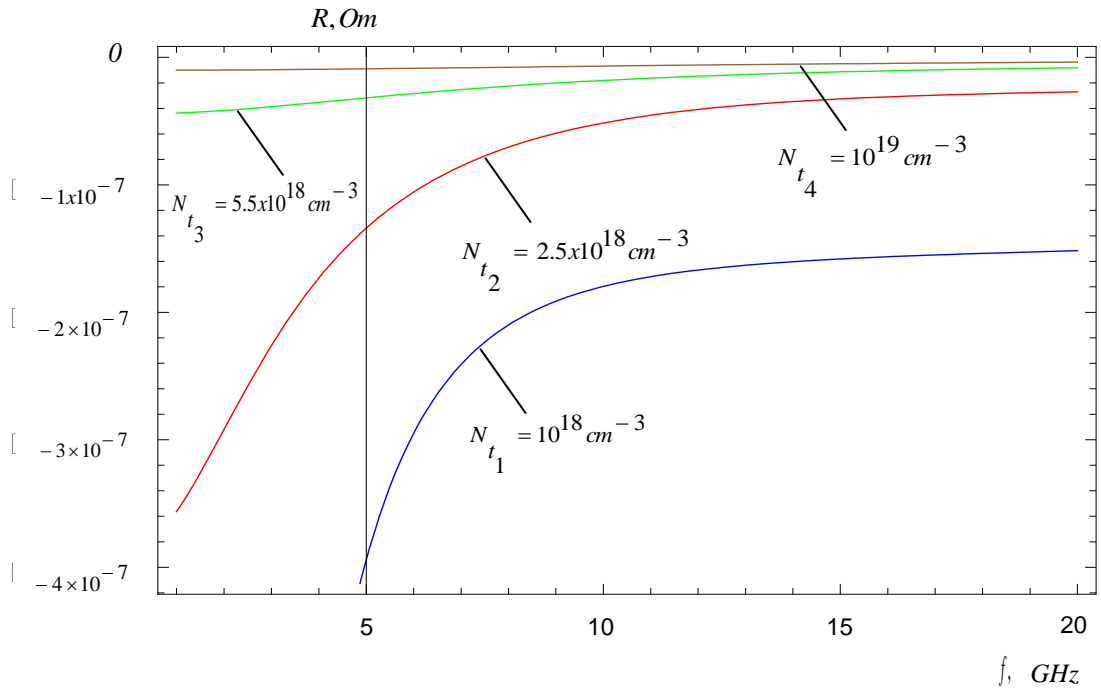
(բ)



(գ)

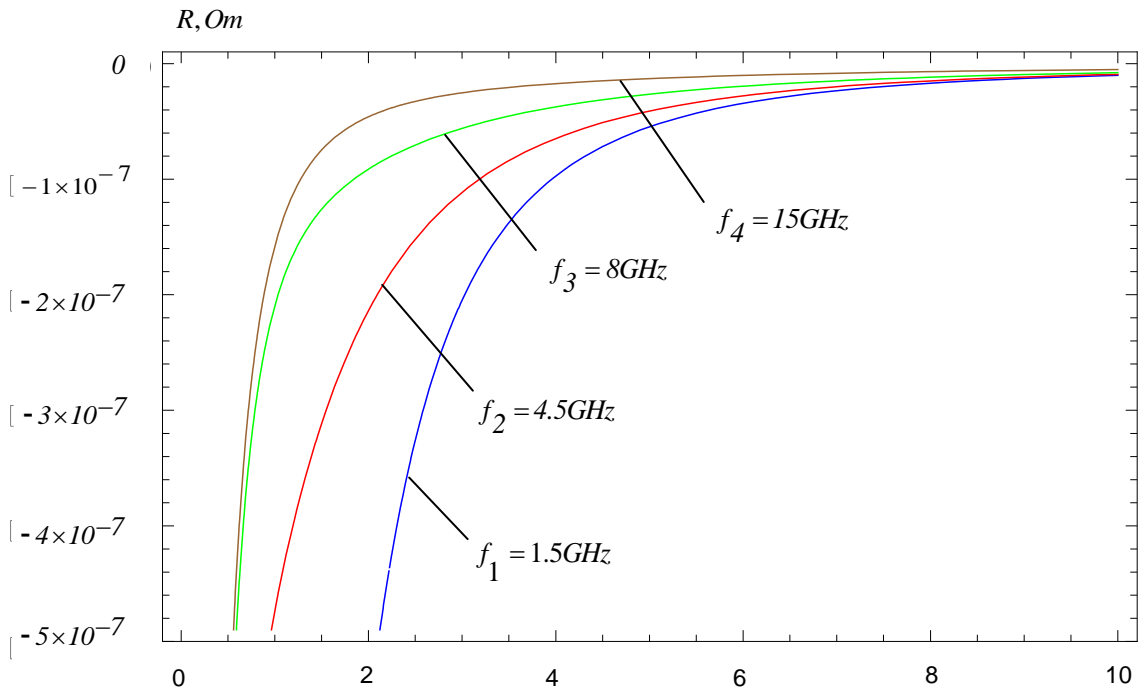
Նկ.5.5. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի (ա) R-ի, (բ) X-ի և (գ) $tg\delta$ -ի կախվածությունը նսերն ազդանշանի

հաճախությանը (ԳՀԳ), թթվածնի վակուսիաների N_t ($սմ^{-3}$) կոնցենտրացիայի տարբեր արժեքների դեպքում: Մյուս պարամետրերն են՝ $\mu=30$ $սմ^2/Վ \cdot Վ$; $\lambda=300$ $սմ$; $E_f=0.26$ $ԷՎ$; $\epsilon(0)=106$; $\sigma=10^{-16}$ $սմ^2$; $S=10^{-8}$ $սմ^2$; $U=12$ Վ; $n_{co}=10^{11}$ $սմ^{-3}$; $V_s=7.5 \times 10^6$ $սմ/վ$; $J_0=1$ $Ա/սմ^2$

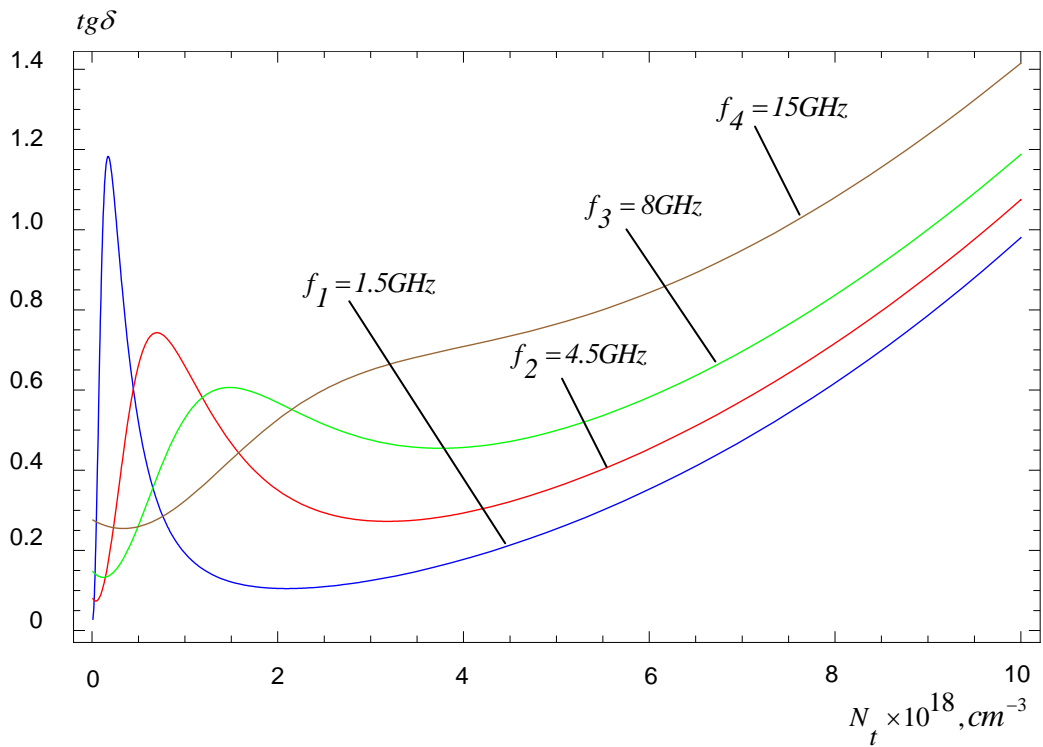


Նկ.5.6. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի R-ի կախվածությունը ազդանշանի հաճախությունից (ԳՀց), թթվածնի վակուսիաների N_t (սմ^{-3}) կոնցենտրացիայի տարբեր արժեքների դեպքում:

Մյուս պարամետրերն են՝ $\mu=30 \text{ սմ}^2/\text{վ}\cdot\text{վ}$; $\lambda=300 \text{ նմ}$; $E_f=0.26 \text{ էվ}$; $\epsilon(0)=106$; $\sigma=10^{-16} \text{ սմ}^2$; $S=10^{-8} \text{ սմ}^2$; $U=12\text{V}$; $n_{\text{co}}=10^{11} \text{ սմ}^{-3}$; $V_s=7.5 \times 10^6 \text{ սմ/վ}$; $J_0=10 \text{ Ա/սմ}^2$

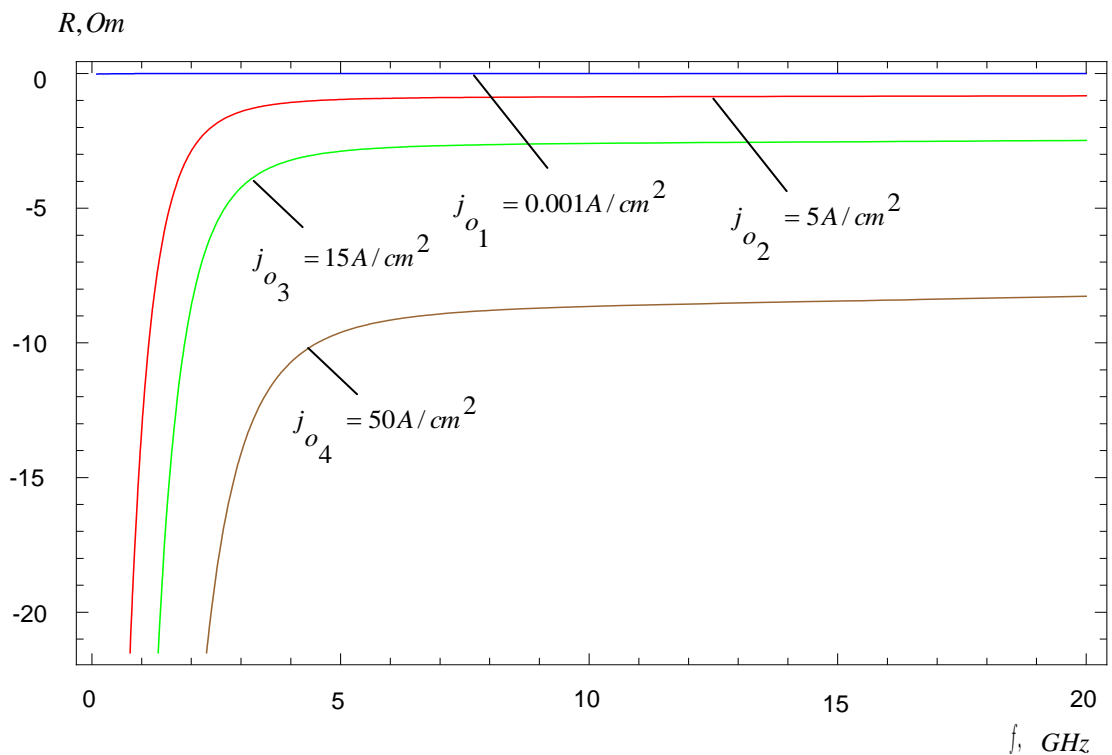


(ա)



(բ)

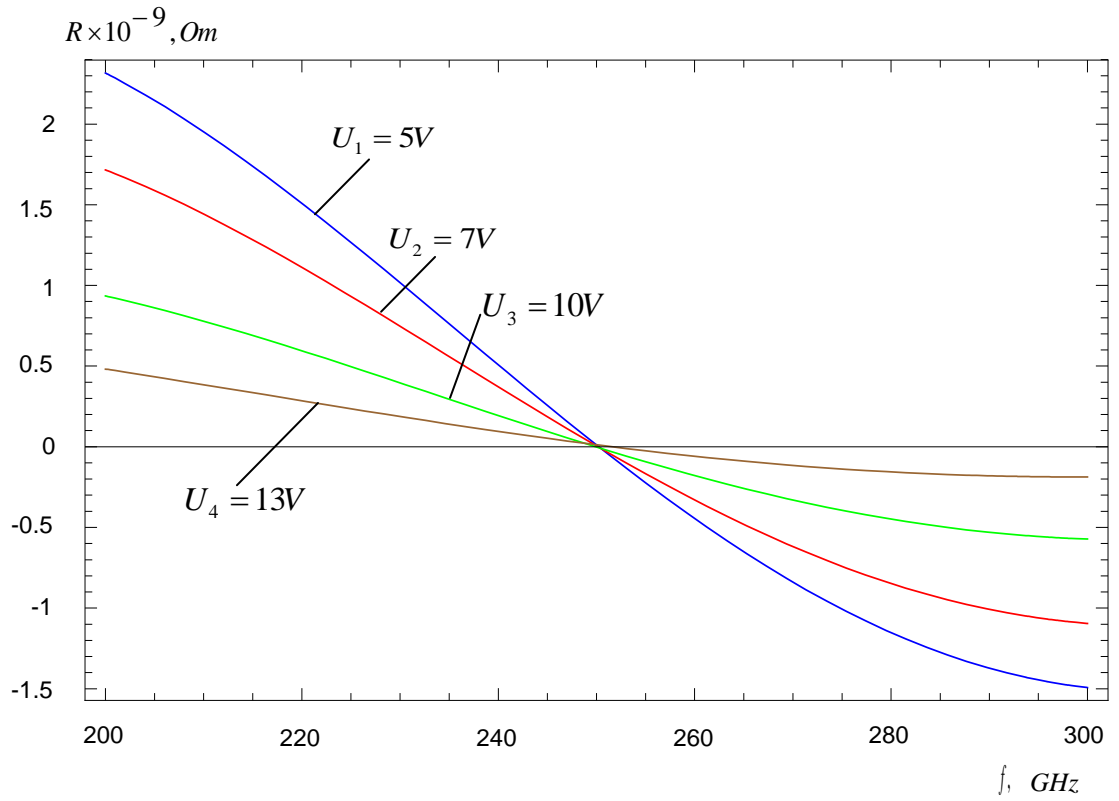
Նկ.5.7. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի (ա) R-ի և (բ) $tg\delta$ -ի կախվածությունը թյունը թթվածնի վակուսիաների N_t ($սմ^{-3}$) կոնցենտրացիայից, ազդանշանի f (ԳՀց) հաճախություն տարբեր արժեքների դեպքում: Մյուս պարամետրերը նույնն են, ինչ-որև նկ.5.5-ում



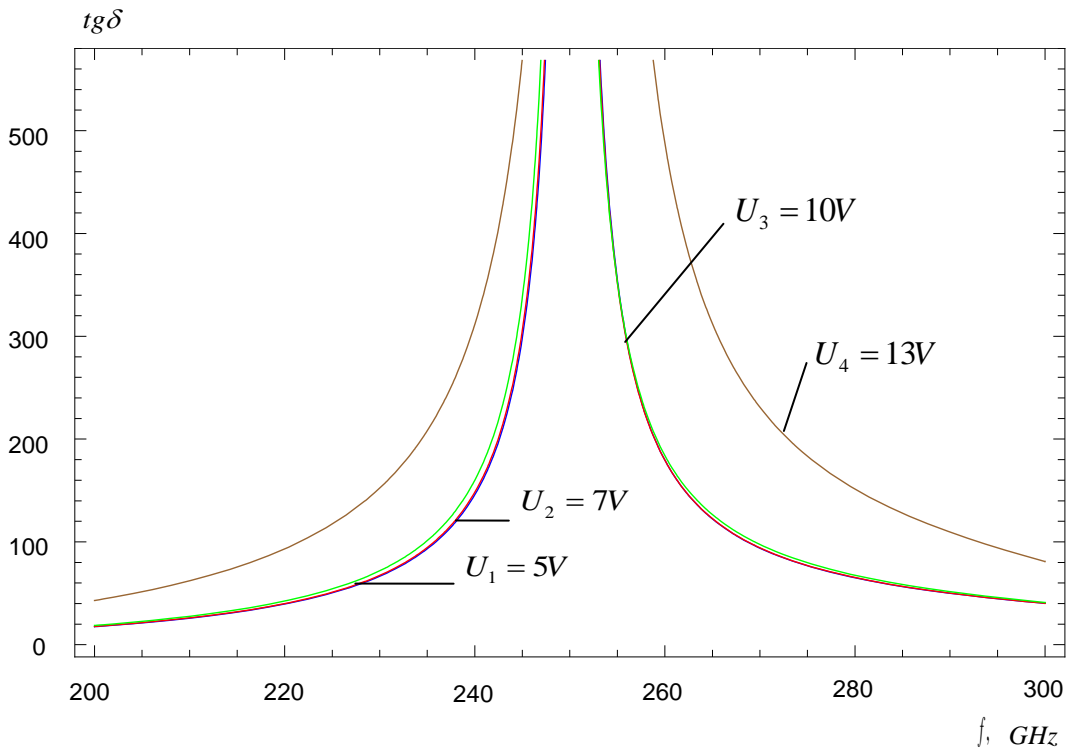
Նկ.5.8. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի R-ի կախվածությունը ազդանշանի f հաճախությունից (ԳՀց), հոսանքի J_0 խտություն տարբեր արժեքների

դեպքում:

Մյուս պարամետրերը նույնն են, ինչ որ նկ. 5.5-ում, իսկ $N_t = 3 \cdot 10^{17} \text{ սմ}^{-3}$



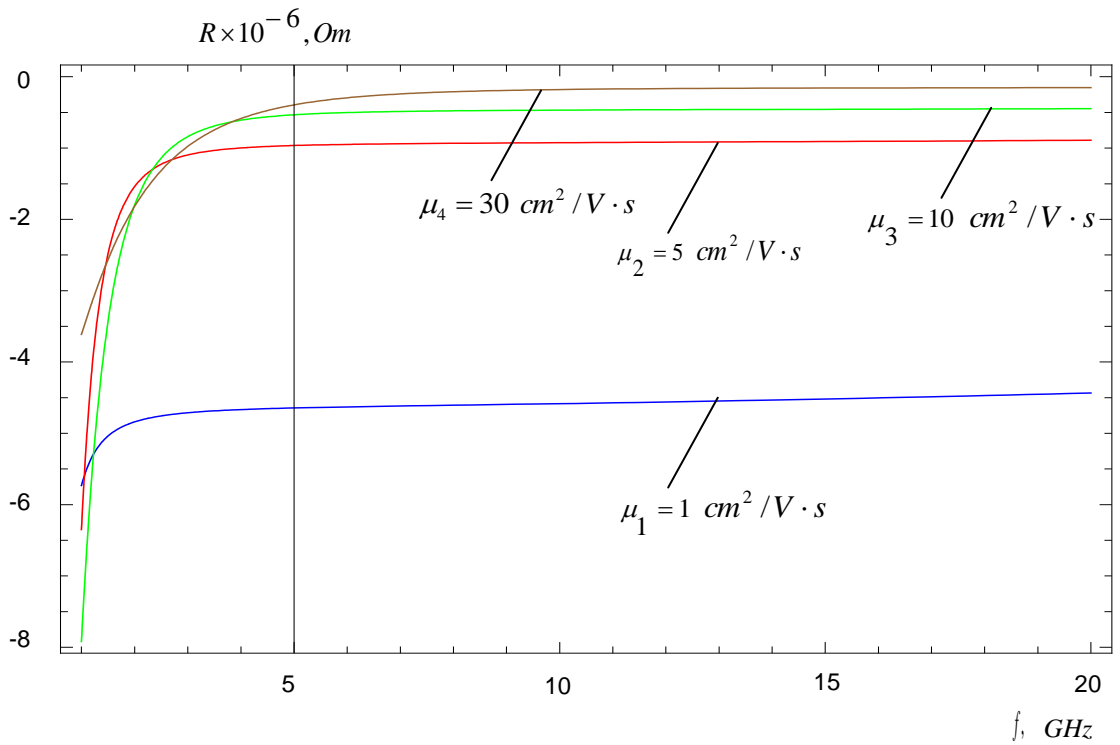
(ա)



(բ)

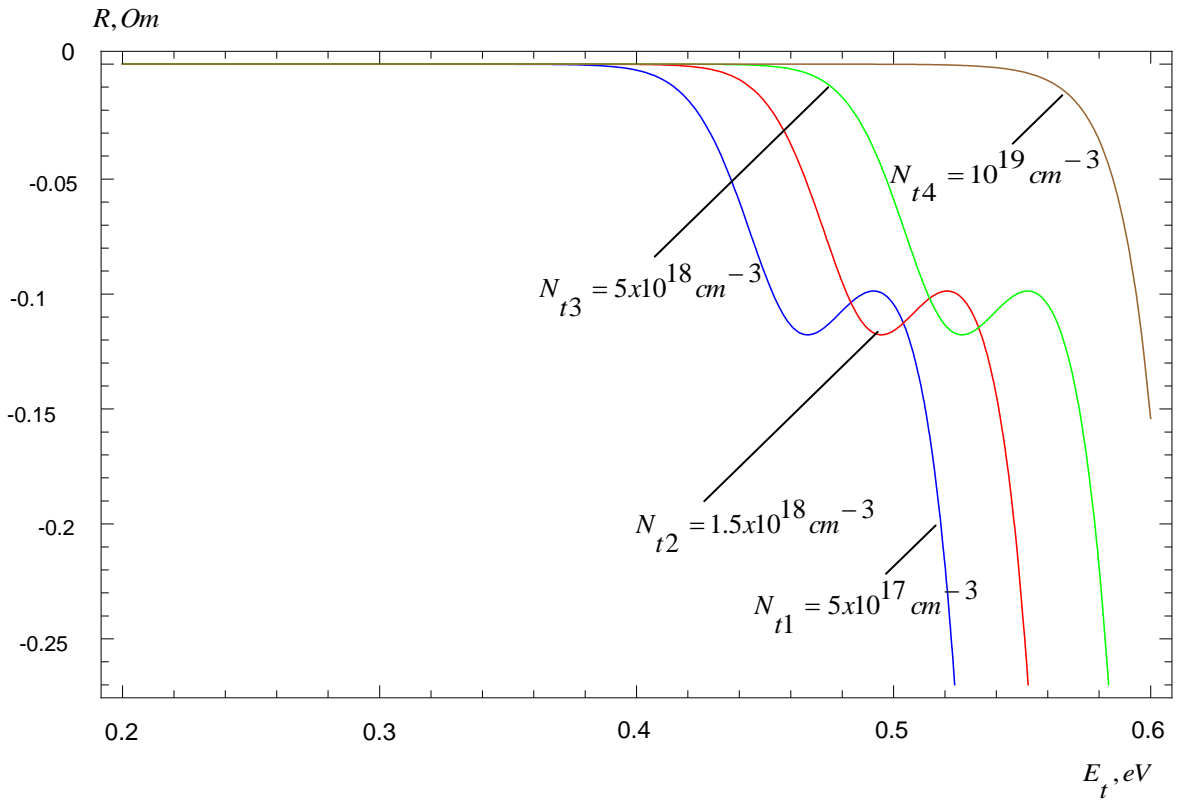
Նկ.5.9. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի (**ա**) R-ի և (**բ**) τ_{δ} -ի կախվածությունը ազդանշանի հաճախությունից (ԳՀց), կիրառված ՍԼ արման տարբեր արժեքների դեպքում:

Մյուս պարամետրերը նույնն են, ինչ-որև նկ.5.5-ում, իսկ $N_t = 10^{19} \text{ սմ}^{-3}$

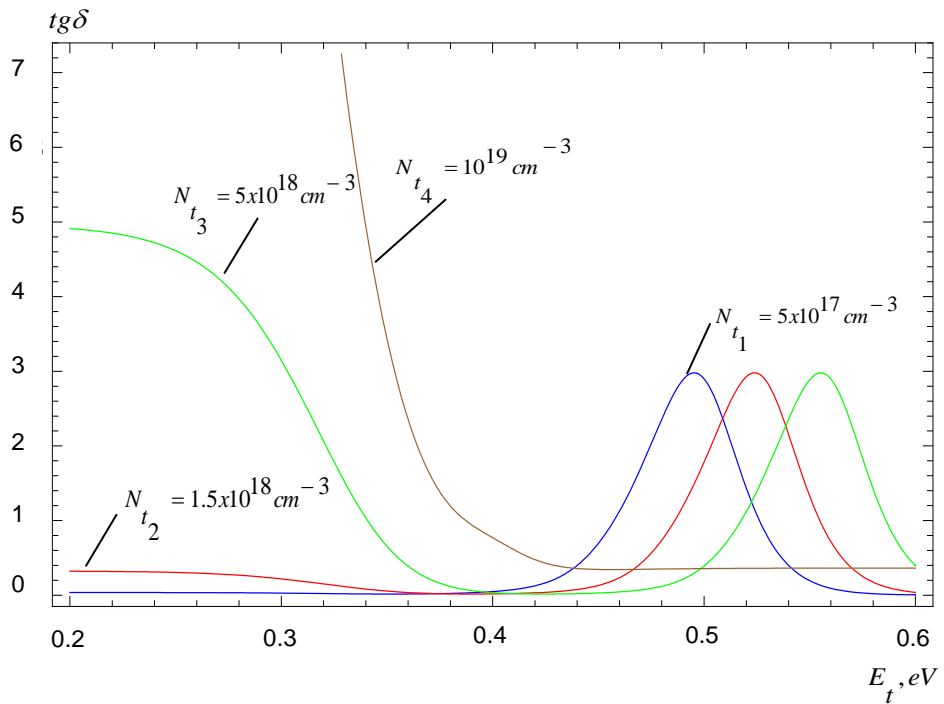


Նկ.5.10. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի R-ի կախվածությունը ազդանշանի հաճախությունից (ԳՀց), լիցքակիրների μ շարժունակության տարբեր արժեքների դեպքում:

Մյուս պարամետրերը նույնն են, ինչ-որև նկ.5.5-ում, իսկ $N_t = 10^{18} \text{ սմ}^{-3}$



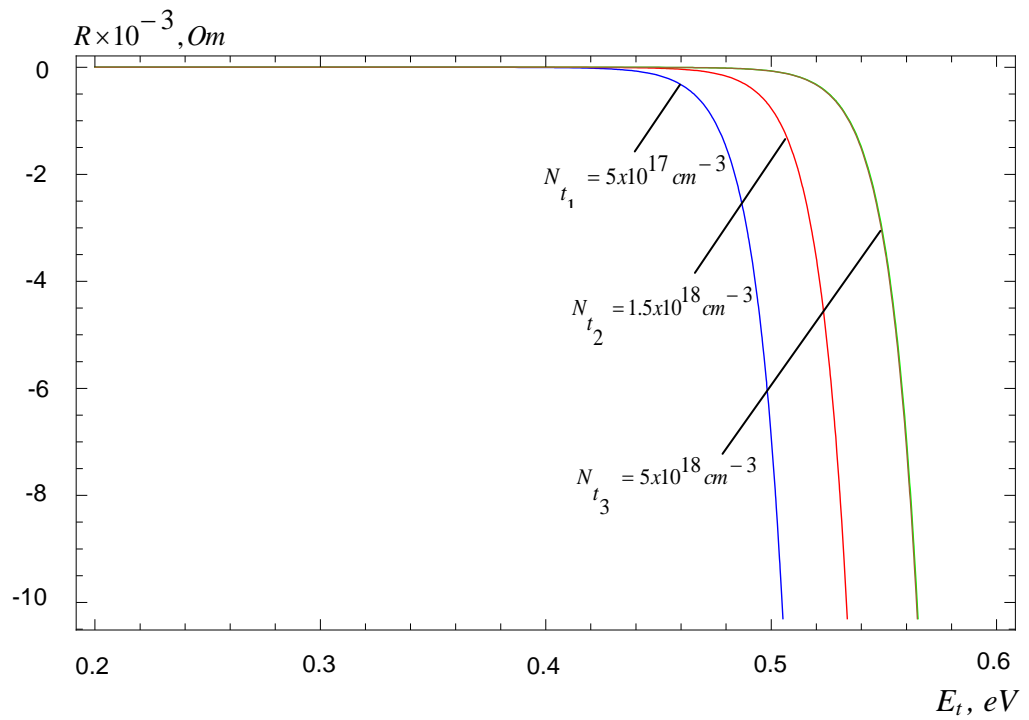
(ա)



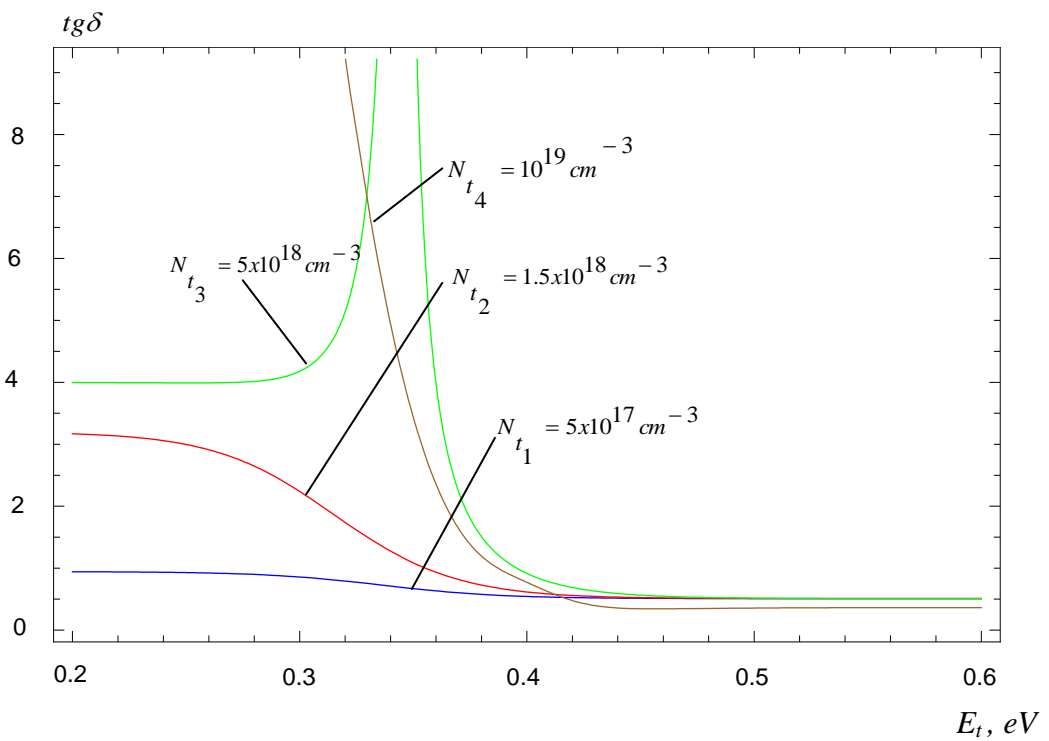
(բ)

Նկ.5.11. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի (ա) R -ի և (բ) $tg\delta$ -ի կախվածությունը նրա թակարդների՝ հաղորդական գոտու հատակից ունեցած E_t (ԷՎ) էներգիական հեռավորությունից,

Թթվածնի վակուսիաների (թակարդների) N_i (սմ^{-3}) կոնցենտրացիայի տարբեր արժեքների դեպքում: Մյուս պարամետրերը նույնն են, ինչ -որև $5.5 \cdot 10^{18}$ և $U=13,5$ Վ; $f=1$ ՊՀ ց

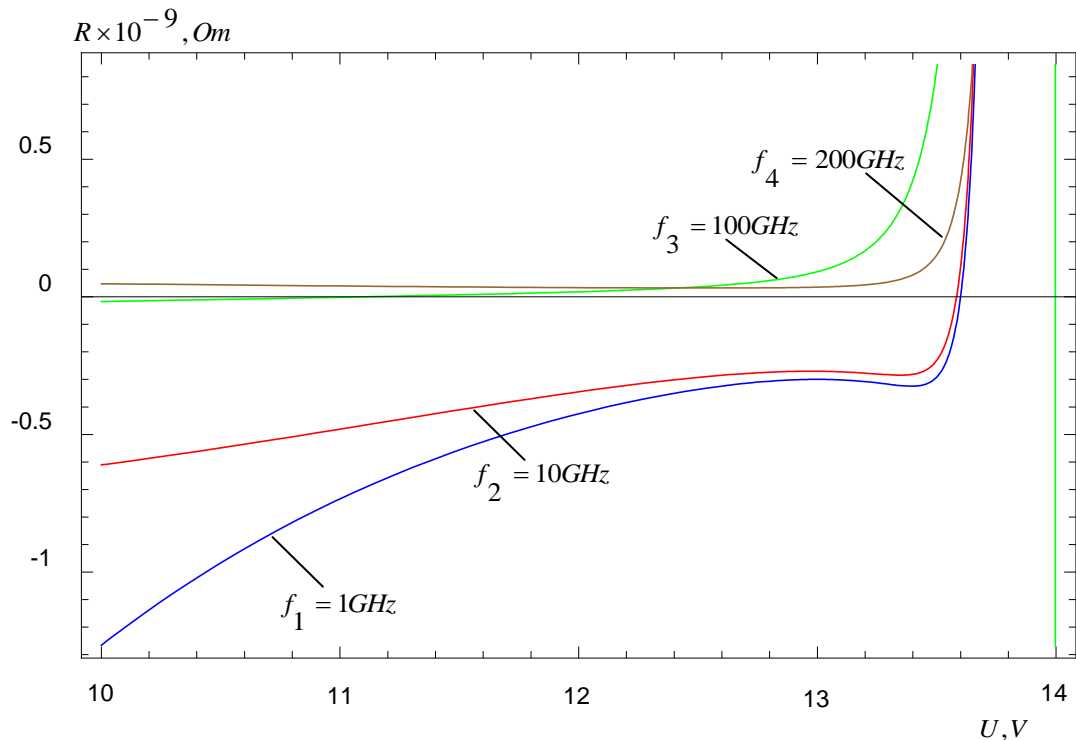


(ա)



(բ)

Նկ.5.12. Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի (**ա**) R-ի և (**բ**) tgδ-ի կախվածությունը թակարդների՝ հաղորդականության գոտու հատակից ունեցած E_i (ԷՎ) էներգիական հեռավորությունից:
 Մյուս պարամետրերը նույնն են, ինչ -որ նկ.5.5-ում և $U=13.5$ Վ; $f=1$ ԳՀց; $N_i=10^{16}$ սմ⁻³



Նկ.5.13. Դինամիկ ազդանշանի հաճախության տարբեր արժեքների դեպքում Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի R-ի կախվածությունը կիրառված հաստատուն Ս Լ արումից:
 Մյուս պարամետրերը նույնն են, ինչ -որ նկ.5.5-ում, իսկ $N_i=10^{18}$ սմ⁻³

§ 5.3. Եզրակացություններ հիևգերորդ գլխի վերաբերյալ

1. Առաջին անգամ տեսականորեն մոդելավորվել և հաշվարկվել են Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի ԳԲՀ բնութագրերը ՖԷ-ի դիէլեկտրիկ թափանցելիության ոչ գծային կախվածության, մետաղ-ֆերոէլեկտրիկ կոնտակտից ճոտկիի առաքման բացակայության և թթվածնի վականսիաներով պայմանավորված թակարդային մակարդակներից միայն էլեկտրոնների Պուլ-Ֆրենկելյան առաքման մեխանիզմի առկայության ռեժիմում:

2. Տեսականորեն հիմնավորվել է, որ ՖԷ-ի դրեյֆային տիրույթում լիցքակիրների փոքր շարժունակության արդյունքում և Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի որոշակի չափսերի ու փոփոխական ԳԲՀ ազդանշանի որոշակի պարամետրերի դեպքում կառուցվածքը

բացասական դինամիկ դիմադրություն (ԲԴԴ) է ցուցաբերում (նկ.5.4-ից 5.13):

3. Թթվածնի վականսիաների խտության մեծացմանը զուգընթաց ԲԴԴ-ն բացարձակ արժեքով նվազում է, իսկ հաճախության շերտը, որտեղ նկատվում է այդ երևույթը, շեղվում է դեպի փոքր հաճախությունների տիրույթ (նկ.5.4, նկ.5.5): Դա կարող է հետևանք լինել նախաակարգային մակարդակների «համընկնման» և հաղորդականության գոտի թափանցման, և երկրորդ՝ գրավված ու առավող լիցքակիրների հարաբերակցության փոփոխության, երբ լիցքակիրների մեծ մասն ի սկզբանե գտնվում է հաղորդականության գոտում, այսինքն՝ նրանք ԳԲՅ էլեկտրական դաշտի հետ ձևավորում են համափուլ հոսանք և չեն բերում փուլային շեղման (նկ.5.6, նկ.5.11, նկ.5.12):

4. Ինչքան փոքր է լիցքակիրների շարժունակությունը, այնքան մեծ է ԲԴԴ-ն, քանի որ դրա հետևանքով մեծանում է դրեյֆային տիրույթում հոսանքի և ԳԲՅ դաշտի միջև փուլային շեղումը, որը համապատասխանության մեջ է թռիչքային սարքերի հիմնարար ֆիզիկական սկզբունքների հետ (նկ.5.10):

5. Ինչքան մեծ է թաղանթով հոսող հոսանքը, այնքան մեծանում է ԲԴԴ-ն (նկ.5.7):

6. Կորուստների անկյան տանգենսը մեծանում է ինչպես թթվածնի վականսիաների խտության աճի հետ, այնպես էլ ԳԲՅ ազդանշանի հաճախության աճին զուգընթաց, որը համապատասխանության մեջ է ԳԲՅ կորուստների մեխանիզմների տեսության հետ (նկ.5.5, նկ.5.7):

7. Կիրառված լարման աճմանը զուգընթաց նվազում է ԲԴԴ-ն, որը հետևանք է լիցքակիրների հագեցման արագության մեծացման, հոսանքի և դաշտի միջև փուլային շեղման նվազման, ինչպես նաև՝ էլեկտրական դաշտի հետ համափուլ հոսանքի բաղադրիչի մեծացման (նկ.5.9, նկ.5.13):

8. ԲԴԴ-ն նկատվում է թակարդային մակարդակների խիստ որոշակի էներգիական հեռավորությունների դեպքում՝ մոտ 0.34...0.4 էՎ, դիտարկված կառուցվածքի որոշակի պարամետրերի ու չափերի դեպքում (նկ.5.11, նկ.5.12): Դա կարող է բացատրվել այն համգամանքով, որ խորը թակարդային մակարդակները բնութագրվում են ավելի մեծ կյանքի տևողությամբ, որն անհրաժեշտ է փուլային շեղում առաջացնելու համար, իսկ ծանծաղ մակարդակներից դեպի հաղորդականության գոտի էլեկտրոնների փոխանակման

հաճախությունը շատ մեծ է և չի կարող բերել ԳԲՀ դաշտի փոփոխման նկատմամբ փոփոխություն մեծ շեղման:

9. Գիտական և կիրառական տեսանկյուններից կարելի է ակնկալել, որ այս հետազոտությունից բխող արդյունքները կարող են հիմք հադիսանալ ՖԷ նանոթաղանթների վրա հիմնված նոր դասի ակտիվ տարրերի մշակման և վերջիններիս՝ ներկայումս օգտագործվող ՖԷ պասիվ տարրերի հետին տեգրման համար, որով ապագայում հնարավոր կլինի նախագծել ամբողջությամբ ֆերոէլեկտրական գերմեծ ինտեգրալ միկրոսխեմաներ ($\text{\$ԳԻՄՍ}$, VLSFC):

ԱՏԵՆԱԽՍՈՒԹՅԱՆ ԱՄՓՈՓՈՒՄ ԵՎ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ատենախոսության շրջանակներում սինթեզվել և հետազոտվել են ֆերոէլեկտրիկ բարոօքսիդային $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ փոշենյութերը, ծավալային կերամիկաները և նուրբ թաղանթները, M-ՖԷ-M , $\text{Pt-Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3\text{-SiO}_2\text{-pSi-Al}$, $\text{Au-Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3\text{-ITO-glass}$, $\text{Pt-Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3\text{-pSi-Al}$ նանոթաղանթային կառուցվածքները: Տեսականորեն և փորձնականում հետազոտվել են մետաղ-ֆերոէլեկտրիկ-մետաղ նանոթաղանթային կառուցվածքների ստատիկ և դինամիկ բնութագրերը:

1. BST-ի սինթեզն իրականացվել է քիմիական սինթեզի երեք եղանակներով՝ ԻԲՍ, ՑԳՍ և ԳՆԱ: Սինթեզված նյութերի կառուցվածքն ու բաղադրությունը հետազոտվել են XRD, TDX, SEM, EDS, XPS, μXRF մեթոդներով: Կատարվել է եղանակների համեմատական վերլուծություն, և ընտրվել են էներգախնայող, էկոլոգիապես մաքուր, արագ և պարզ սինթեզման ԻԲՍ և ՑԳՍ եղանակները, որոնցով տացված BST-ն ցուցաբերում է բարձր մաքրություն և ցանկալի բնութագրեր:
2. ԻԲՍ-ի և ՑԳՍ-ի եղանակներով սինթեզված BST փոշենյութից չոր մամլումով պատրաստվել են մեծ խտությամբ ($\sim 5,1 \text{ գ/սմ}^3$) կերամիկաներ, որոնք թրծվել են օդի միջավայրում՝ $\sim 1300^\circ\text{C}$ ջերմաստիճանում: Ստացված BST կերամիկաների հիմքի վրա պատրաստվել են Au/BST/Au կերամիկական կոնդենսատորներ, հետազոտվել են դրանց դիէլեկտրիկ հատկությունները ջերմաստիճանային և հաճախականային լայն տիրույթներում:

3. Գտնվել են ԼԻՓ-ի օպտիմալ տեխնոլոգիական ռեժիմները ցանկալի ստեխիոմետրիայով և միկրոկառուցվածքով թաղանթների ստացման համար: Թաղանթները նստեցվել են լազերային ճառագայթի $\sim 5 \text{ Ջ/սմ}^2$ ինտենսիվության և 10^{-4} Պամագորդային ճնշման պայմաններում, թաղանթի նստեցման միջին արագությունը՝ $\sim 0.4 \text{ նմ/վ}$: Թաղանթները նստեցվել են սիլիցիումե (p-Si), կերամիկական YSZ, ITO-ապակի հարթակների վրա, ստացվել են ամորֆ և բազմաբյուրեղային 50...700 նմ հաստությամբ թաղանթներ: Հետազոտվել են ստացված թաղանթների բաղադրությունը, միկրոկառուցվածքը և մակերևույթի մորֆոլոգիան: Ստացված թաղանթներն ունեն 1...4 նմ միջին քառակուսային անհարթություն և կարող են օգտագործվել կոնդենստորային կառուցվածքների ստացման համար:

4. ԼԻՓ տեխնոլոգիայով տարբեր հարթակների վրա ստացված BST թաղանթներն օգտագործվել են Մ-ՖԷ-Մ նանոթաղանթային կառուցվածքների ստացման համար: Մետաղական (Au, Pt) էլեկտրոդներն ստացվել են մազնետրոնային փոշենստեցմամբ: Հետազոտվել են BST-ի հիմքով Մ-ՖԷ-Մ թաղանթային կառուցվածքների լուսային և մթնային ՎԱԲ-երը: Pt-Ba_{0,31}Sr_{0,69}TiO₃-SiO₂-pSi-Al և Pt-Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃-pSi-Al նմուշների BST նուրբ թաղանթները լուսազգայունություն են ցուցաբերում լույսի տեսանելի սպեկտրում: Pt - Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃ - pSi - Al նմուշի վոլտամպերային բնութագրերն x ուղղությամբ (Pt/BST/Pt) ունեն հիստերեզիսային բնույթ, ինչը թույլ է տալիս ենթադրել, որ որոշակի նախազծա-տեխնոլոգիական մշակումներից հետո, դրանք կարող են կիրառվել որպես մերիստորային տարրեր:

5. Տեսական մոդելավորման արդյունքում առաջին անգամ փաստարկվել և ապացուցվել է, որ թթվածնի վակուսիաներով պայմանավորված թակարդային մակարդակներով հագեցած ՖԷ թաղանթներում, մեծ լարվածությամբ արտաքին էլեկտրական դաշտ կիրառելիս, Պուլ-Ֆրենկելյան առաքման ռեժիմում,

որոշակի այլ պայմանների առկայության պարագայում հոսանքի խտությունը և արումից կախված է $\frac{1}{2}$ օրենքով: Տեսական այս կախվածությունը համապատասխանության մեջ է փորձնական հետազոտությունների արդյունքների հետ:

6. Տեսականորեն մոդելավորվել և հաշվարկվել են Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի ԳԲՅ բնութագրերը \$երոելեկտրիկի դիելեկտրիկ թափանցելիության՝ կիրառված էլեկտրական դաշտից ունեցած ոչ գծային կախվածության, մետաղ-Ֆերոելեկտրիկ կոնտակտում ճոռոկի առաքման բացակայության և թթվածնի վակուսիաներով պայմանավորված թակարդային մակարդակներից էլեկտրոնների առաքման Պոլլ-Ֆրենկելյան մեխանիզմի առկայության ռեժիմում:

7. Տեսականորեն հիմնավորվել է, որ \$երոելեկտրիկի դրեյֆային տիրույթում և իցթակիրների փոքր շարժունակության արդյունքում և Մ-ՖԷ-Մ կառուցվածքի որոշակի չափսերի ու փոփոխական ԳԲՅ ազդանշանի պարամետրերի դեպքում կառուցվածքը ցուցաբերում է բացասական դինամիկ դիմադրություն:

ԼԻՓ-ի եղանակով ՖԷ նանոթաղանթներ ստանալու համար անհրաժեշտ թիրախները (կերամիկական հաբերը) պատրաստվել են երկու տարբեր՝ ինքնատարածվող բարձր ջերմաստիճանային (ԻԲՍ) և ցիտրատ-գել (ՑԳՍ) սինթեզների մեթոդներով: ԻԲՍ-ն և դրա արդյունքում ստացված BST համաձուլվածքի աղումն ու աղացած փոշենյութից կերամիկական հաբերի պատրաստումն իրականացվել են ՀԱՊՀ Միկրոելեկտրոնիկայի և կենսաբժշկական սարքերի ամբիոնում, իսկ ՑԳՍ-ն և դրա արգասիք BST փոշենյութից կերամիկական հաբերի պատրաստումը՝ Բասկերի երկրի համալսարանի (UPV/EHU) Լեյոա քաղաքում գտնվող մասնաճյուղի Անօրգանական քիմիայի ամբիոնում:

BST-ի նանոթաղանթների ԼԻՓ-ը p-Si հարթակների վրա իրականացվել է Գերմանիայի Յուլիխ քաղաքում գտնվող "Forschungszentrum Jülich" գիտահետազոտական կենտրոնում տեղակայված "Institute of Nano- and Biotechnologies" ինստիտուտում, իսկ ITO/glass հարթակի

վրա՝ UPV/EHU-ի Վիտորիա քաղաքում գտնվող Անօրգանական քիմիայի ամբիոնում:

Պատրաստված կերամիկական հաբերի և նուրբթաղանթային հետերոկառուցվածքների ֆիզիկական բնութագրերի հետազոտումը՝ XRD, TDX, SEM, EDS, μ XRF, XPS, իրականացվել է UPV/EHU-ի SGIker հետազոտական կենտրոնում:

Պատրաստված կերամիկական հաբերի և նանոթաղանթային հետերոկառուցվածքների ստատիկ վոլտ-ամպերային բնութագրերի (թե՛ մթնային և թե՛ լուսային) հետազոտությո՞ւններն իրականացվել են ՅԱՊՅ-ում գործող Յայաստանի ազգային ճարտարագիտական լաբորատորիաներում (ANEL), ՅՅ Աշտարակ քաղաքում գտնվող ՅՅ ԳԱԱ ՖՅԻ-ում և ՅՅ ԳԱԱ ՌՖԵԻ-ում:

Ստացված նմուշների դիէլեկտրիկական բնութագրերը չափվել են Իսպանիայի Բասկերի երկիր մարզի Բիսկայա տեխնոպարկի “BCMaterials–Basque Center for Materials, Applications and Nanostructures” գիտահետազոտական կենտրոնում:

Մետաղ-ֆերոէլեկտրիկ-մետաղ նանոթաղանթային կառուցվածքների բնութագրերի վրա մեծ էներգիայով էլեկտրոնային ճառագայթման ուսումնասիրությո՞ւններն իրականացվել են Երևանում՝ “CANDLE” սինխրոտրոնային հետազոտությո՞ւնների ինստիտուտի հետ համատեղ:

Մշակված տեխնոլոգիաները և ստացված ՖԵ նյութերի կերամիկաներն ու թաղանթային կառուցվածքները շնորհիվ ընտրված էլեկտրաֆիզիկական և դիէլեկտրիկական հատկությո՞ւնների, կարող են կիրառվել ԳԲՅ էլեկտրոնիկայում՝ որպես պասիվ տարրեր, կենսաբժշկական և քիմիական սենսորներ, ակուստիկական ռեզոնատորներ, ֆերոփականով ՄՕԿ էներգոանկախ հիշող բջիջներ, մեմրիստորային հիշասարքերի հիշող բջիջներ, ԳԲՅ ազգանշանների գեներացման և ուժեղացման ակտիվ տարրեր՝ դրանով իսկ ինտեգրվելով ոչ միայն ժամանակակից սիլիցիոնային տեխնոլոգիաներին, այլև հիմք հանդիսանալ ֆերոինտեգրալային միկրոսխեմաների ու տեխնոլոգիաների համար, որտեղ և՛ պասիվ, և՛ ակտիվ տարրերը պատրաստված կլինեն միայն ֆերոնյութերից:

Գիտական և կիրառական տեսանկյուններից կարելի է ակնկալել, որ այս հետազոտությունից բխող արդյունքները կարող են հիմք հադիսանալ ՏԷ նանոթաղանթների վրա հիմնված նոր դասի ակտիվ տարրերի մշակման և վերջիններիս՝ ներկայումս օգտագործվող ՏԷ պասիվ տարրերի հետ ինտեգրման համար, որով ապագայում հնարավոր կլինի նախագծել ամբողջությամբ ֆերոէլեկտրական գերմեծ ինտեգրալ միկրոսխեմաներ (\$ԳԻՄՍ-VLSFC):

ՕԳՏԱԳՈՐԾՎԱՆՑ ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Hai L., Takahashi M., Sakai S. Recent Progress in Downsizing FeFETs for Fe-NAND Application // MRS Proc.- 2011.- P. 1337.
2. Impedance Analysis of Controlled-Polarization-Type Ferroelectric-Gate Thin Film Transistor Using Resistor–Capacitor Lumped Constant Circuit / T. Fukushima, K. Maeda, T. Yoshimura, A. Ashida et al // Jpn. J. Appl. Phys.- 2011.- 50.- P. 04DD16.
3. Haga K.-I., Nakada Y., Ricinschi D., Tokumitsu E. Relationship between source/drain-contact structures and switching characteristics in oxide-channel ferroelectric-gate thin-film transistors // Jpn. J. Appl. Phys.- 2014.- 53.- P. 9.
4. Haga K.-I., Tokumitsu E. Fabrication and characterization of ferroelectric-gate thin-film transistors with an amorphous oxide semiconductor, amorphous In–Ga–Zn–O // Jpn. J. Appl. Phys.- 2014.- 53.- P. 111103.
5. Emerging non-volatile memories / S. Hong et al (Eds.).- Springer, New York, 2014.- 273 p.

6. Oxide nanoelectronics: ferroelectric memories, nanoscale size limits, microwave devices, Josephson junctions / K. Urban, U. Poppe, Y. Divin (Eds.).- On-line Publication, Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek, Verlag, Jülich.- 2004.- 356 p.
7. Fabrication and Study on One-Transistor-Capacitor Structure of Nonvolatile Random Access Memory TFT Devices Using Ferroelectric Gated Oxide Film: Chapter 8 / C.-M. Cheng, C.-Sh. Chen, C.-C. Lin, K.-H. Chen et al.- INTECH Open Access Publisher, 2011.- 179 p.
8. Write Current Reduction in Transition Metal Oxide Based Resistance Change Memory / S.-E. Ahn, M.-J. Lee, Y. Park, B.S. Kang et al // Adv. Mater.- 2008.- 20.- P. 924–928.
9. Electrical manipulation of nanofilaments in transition-metal oxides for resistance-based memory / M.J. Lee, S. Han, S.H. Jeon, B.H. Park et al // Nano letters.- 2009.- 9.- P. 1476–1481.
10. Memristive Phenomena - from fundamental physics to neuromorphic computing: Lecture notes of the 47th IFF Spring School / Waser R., Wuttig M. (Eds.).- Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek, Jülich, 2016.- 1027 p.
11. Սուլթոյան Լ.Յ., Բուկիաթյան Վ.Վ., Դաշտոյան Յոզ.Ռ. Լուսահասցեավորվող կենսաբժշկական սվիչների փորձնական հետազոտություններ // ՅԱԴՅ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2015.- Մաս 1.- Էջ 187-193:
12. Поплавко Ю. М., Переверзева Л. П., Раевский И. П. Физика активных диэлектриков: Учебное пособие.- Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009.- 480 с.
13. Мухортов В.М. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение.- Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008.- 224 с.
14. Muralt P. Ferroelectric thin films for micro-sensors and actuators: a review // J. Micromech. Microeng.- 2000.- 10.- P. 136.
15. Դաշտոյան Յ.Ռ. Տերոէլեկտրամազնիսական հիմքով նանոէլեկտրոնային կառուցվածքների ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը և հատկությունների հետազոտումը: Տեխ. գիտ. թեկնածուական ատենախոսություն / ՅԱԴՅ (Պոլիտեխնիկ).- Երևան, 2013.- 125 էջ :
16. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учебник.- М.: Лань, 2001.- 368 с.
17. Курчатов И. В. Сегнетоэлектрики.- Л., М.: Гос. техн.-теорет. изд-во, 1933.- 108 с.
18. Ржанов А.В. Титанат бария-новый сегнетоэлектрик // УФН.- 1949.- 28(4).- С. 461–489.
19. Асташенков П.Т. Жизнь замечательных людей: Курчатов.- М.:Молодая гвардия,1968.-198 с.
20. Ferroelectric random access memories: Fundamentals and applications / Hiroshi Ishiwara, Masanori Okuyama, Yoshihiro Arimoto (Eds.).- Springer, Berlin, London, 2004.- 288 p.
21. Multifunctional polycrystalline ferroelectric materials: Processing and properties / Lorena Pardo, Jesús Ricote (Eds.).- Springer, Dordrecht, London, 2011.- 782 p.
22. Ferroelectrics - Applications / Mickaël Lallart (Ed.).-INTECH Open Access Publisher,2011.-262 p.
23. Ferroelectrics - Characterization and Modeling / Mickaël Lallart (Ed.).- INTECH Open Access Publisher, 2011.- 598 p.

24. Vendik O.G. Ferroelectrics find their “niche” among microwave control devices // Phys. Solid State.- 2009.- 51.- P. 1529–1534.
25. Ramanathan S. Thin Film Metal-Oxides: Fundamentals and applications in electronics and energy.- Springer; Springer US, New York, 2010.- 337 p.
26. Gevorgian S., Tagantsev A.K., Vorobiev A.K. Tuneable film bulk acoustic wave resonators.- Springer-Verlag, London, 2013.- 243 p.
27. Peter M.M. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings - Science, Applications and Technology (3rd Edition).- William Andrew Publishing, Elsevier, Amsterdam, 2010.- 936 p.
28. Composition, structure, and dielectric tunability of epitaxial SrTiO₃ thin films grown by radio frequency magnetron sputtering / X. Wang, U. Helmersson, L.D. Madsen, I.P. Ivanov et al // J. Vac. Sci. Technol. A.- 1999.- 17.- P. 564.
29. Castellano R.N. Ion beam deposition of ferroelectric thin films sputtered from multicomponent targets // J. Vac. Sci. Technol.- 1980.- 17.- P. 629.
30. Castellano R.N. Deposition of thin films of PZT by a focused ion beam sputtering technique // Ferroelectrics.- 2011.- 28.- P. 387–390.
31. Ohnishi T., Lippmaa M., Yamamoto T., Meguro S. Improved stoichiometry and misfit control in perovskite thin film formation at a critical fluence by pulsed laser deposition // Appl. Phys. Lett.- 2005.- 87.- P. 241919.
32. Electronic oxides - correlation phenomena, exotic phases and novel functionalities: Lecture notes of the 41st IFF Spring School / S. Blügel, T. Brückel et al (Eds.).- Forschungszentrum, Jülich, 2010.- P. D10.23.
33. Chiu F.-C. A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films // Advances in Materials Science and Engineering.-2014.- 2014.- P. 1–18.
34. Kao K.-C. Dielectric phenomena in solids: With emphasis on physical concepts of electronic processes.- Academic Press, Amsterdam, London, 2004.- 581 p.
35. Pintilie L. Charge Transport in Ferroelectric Thin Films: Chapter 8 / Mickaël Lallart (Ed.).- INTECH Open Access Publisher, 2011.- P. 101-134.
36. Raymond M.V., Smyth D.M. Defects and charge transport in perovskite ferroelectrics // Journal of Physics and Chemistry of Solids.- 1996.- 57.- P. 1507–1511.
37. Pintilie L., Alexe M. Metal-ferroelectric-metal heterostructures with Schottky contacts. I. Influence of the ferroelectric properties // J. Appl. Phys.- 2005.- 98.- P. 124103.
38. Metal-ferroelectric-metal structures with Schottky contacts. II. Analysis of the experimental current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Pb(Zr,Ti)O₃ thin films / L. Pintilie, I. Boerasu, M.J.M. Gomes, Zhao T. et al // J. Appl. Phys.- 2005.- 98.- P. 124104.
39. Tsymbal E.Y., Kohlstedt H. Applied physics. Tunneling across a ferroelectric // Science (New York, N.Y.).-2006.- 313.- P. 181–183.
40. Բեգոյան Վ.Կ. Ֆերոէլեկտրական կերամիկական ու թաղանթային կառուցվածքների կորուստային հոսանքների ֆիզիկական մոդելավորումը և հետազոտումը: Տեխ. գիտ. թեկնածուական ատենախոսություն / ԶՊԾՀ (Պոլիտեխնիկ).- Երևան, 2013.- 155 էջ :

41. Hermann Kohlstedt H.I. Nanoelectronics and information technology: Advanced electronic materials and novel devices / Rainer Waser (Ed.).- Wiley-VCH, Weinheim; Cambridge, 2003.- 1001 p.
42. West A.R. Inorganic functional materials: optimization of properties by structural and compositional control // Chemical record (New York, N.Y.).- 2006.- 6.- P. 206–216.
43. Vendik O.G., Hollmann E.K., Kozyrev A.B., Prudan A.M. Ferroelectric Tuning of Planar and Bulk Microwave Devices // Journal of Superconductivity.- 1999.- 12.- P. 325–338.
44. Ferroelectric Materials for Microwave Tunable Applications / A.K. Tagantsev, V.O. Sherman, K.F. Astafiev, J. Venkatesh et al // Journal of Electroceramics.- 2003.- 11.- P. 5–66.
45. Vorobiev A., Rundqvist P., Khamchane K., Gevorgian S. Silicon substrate integrated high Q-factor parallel-plate ferroelectric varactors for microwave/millimeterwave applications // Appl. Phys. Lett.- 2003.- 83.- P. 3144.
46. Yamada T. Structural and dielectric properties of epitaxial (Ba,Sr)TiO₃ films on c-Al₂O₃ with ultra-thin TiN sacrificial template // J. Ceram. Soc. Japan.- 2011.- 119.- P. 261–265.
47. Scott J.F. High-dielectric constant thin films for dynamic random access memories (DRAM) // Annu. Rev. Mater. Sci.- 1998.- 28.- P. 79–100.
48. Ahmed A., Goldthorpe I.A., Khandani A.K. Electrically tunable materials for microwave applications // Appl. Phys. Rev.- 2015.- 2.- P. 11302.
49. Srinivasa Rao Singamaneni, Sandhyarani Punugupati, John T. Prater, Jagdish Narayan, Diamagnetism to ferromagnetism in Sr-substituted epitaxial BaTiO₃ thin films // Appl. Phys. Lett.- 2016.- 108.- P. 142407.
50. Vendik O.G., Zubko S.P. Ferroelectric phase transition and maximum dielectric permittivity of displacement type ferroelectrics (Ba_xSr_{1-x}TiO₃) // J. Appl. Phys.- 2000.- 88.- P. 5343.
51. Steer M.B., Palmer W.D. Multifunctional adaptive microwave circuits and systems.- SciTech, Eurospan distributor, Raleigh, N.C., London, 2009.- 410 p.
52. Մարտիրոսյան Ն.Վ., Դաշտոյան Յ.Ռ. BiFeO₃ սինթեզը՝ ԻԲՍ տեխնոլոգիայով և կերամիկական նմուշների ստացումը // ՅՊԵՅ (Պոլիտեխնիկ) Լրաբեր.- Երևան, 2010.- Զ. 2, №1.- Էջ 322-325:
53. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Юхвид В.И., Боровинская И.П. Физико-химические и технологические основы СВЧ.- М.: БИНОМ, 1999.- 176 с.
54. Borissov A.A., Luca L.D., Merzhanov A.G. Self Propagating High Temperature Synthesis of Materials.- Taylor & Francis, U.S.A., 2002. - 337 p.
55. Վանդուկցի Տ.Վ. Բարիոն-ստրոնցոնի տիտանաթի, մագնետիտի եվ մագնեզիտի մ-ցինկային ֆերիտների ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը ինքնատարածվող բարձր ջերմաստիճանային սինթեզի մեթոդով: Տեխ. գիտ. թեկնածուական ատենախոսություն / ՅՊԵՅ (Պոլիտեխնիկ).- Երևան, 2008.- 120 էջ:
56. ԻԲՍ տեխնոլոգիայով սինթեզված Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO₃ կերամիկական նմուշների ստացումը և ուսումնասիրումը / Տ.Վ. Վանդուկցի, Պ.Բ. Ավագյան և ուրիշներ // Լրաբեր-75: ՅՊԵՅ (Պոլիտեխնիկ) գիտական և մեթոդական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2008.- Մաս 1.- Էջ 422-425:
57. Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO₃ սեգնետո-կիսահաղորդչային նյութի ստացման նոր տեխնոլոգիայի մշակում / Տ.Վ. Վանդուկցի, Պ.Բ. Ավագյան, Ն.Վ.

- Մաքսիմալ անուղիղներ // Լրաբեր-75: ՀԳՃՀ (Պոլիտեխնիկ) գիտական և մեթոդական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2008.- Մաս 1.- Էջ 425-428:
58. Bhalla A.S., Guo R., Roy R. The perovskite structure - a review of its role in ceramic science and technology // Materials Research Innovations.- 2000.- 4.- P. 3–26.
 59. Hlavacek V., Puszynski J.A. CHEMICAL-ENGINEERING ASPECTS OF ADVANCED CERAMIC MATERIALS // Industrial & engineering chemistry research.- 1996.- 35(2).- P. 349-377.
 60. Niederberger M., Pinna N., Polleux J., Antonietti M. A general soft chemistry route to perovskites and related materials: Synthesis of BaTiO₃, BaZrO₃ and LiNbO₃ nanoparticles // Angew. Chem., Int. Ed.- 2004.- 43.- P. 2270–2273.
 61. Effect of grain size on phase transition, dielectric and pyroelectric properties of BST ceramics / C. Mao, S. Yan, S. Cao, C. Yao et al // Journal of the European Ceramic Society.- 2014.- 34.- P. 2933–2939.
 62. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. В 2-х книгах. Книга 1./ Дж. Гоулдстейн и др.- М.: Мир, 1984.- 303 с.
 63. Рид С. Дж. Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии.- М.: Техносфера, 2008.- 232 с.
 64. Bhaduri S.B., Bhaduri S. Combustion synthesis:Chapter 11 / C. Suryanarayana (Ed.).- Pergamon, Amsterdam, Oxford, 1999.- P. 289–309.
 65. Eason R. Pulsed laser deposition of thin films.- Wiley-Interscience, Hoboken, N.J., U.S.A., 2007.- 682 p.
 66. Pulse Laser Deposition of Thin Films / D.B. Chrisey, G.K. Hubler (Eds).- John Wiley & Sons, New York, 1994, 648 p.
 67. Opel M. Spintronic oxides grown by laser-MBE // J. Phys. D: Appl. Phys.- 2012.- 45.- P.033001.
 68. Pulsed laser ablation of complex oxides: The role of congruent ablation and preferential scattering for the film stoichiometry / S. Wicklein, A. Sambri, S. Amoruso, X. Wang et al // Appl. Phys. Lett.- 101.- 2012.- P. 131601.
 69. Avjyan K.E., Buniatyan V.V., Dashtoyan H.R., Optical properties of nanoscale BiFeO₃/BaTiO₃/Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ composite films obtained by the pulsed-laser deposition method // J. Contemp. Phys.- 2013.- 48(3).- P. 134–137.
 70. Դաշտոյան Հար.Ռ., Դաշտոյան Հով.Ռ. Ֆերոէլեկտրամագնիսական նանոկառուցվածքների ստացումը և կիրառությունը // Արդի տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ. Միջբուհական երիտասարդական գիտաժողովի նյութերի ժողովածու.- ՀԳՃՀ, Երևան, 2014, էջ 56-62:
 71. Morintale E., Constantinescu C., Dinescu M. Thin films development by pulsed laser-assisted deposition // Physics AUC.- 2010.- 20.- P. 43-56.
 72. Caltun O.F. Pulsed laser deposition of NiFe₂O₄ thin films // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials.- 2004.- 6 (3).- P. 935-938.
 73. Magnetic and optical properties of MgAl₂O₄-(Ni_{0.5}Zn_{0.5})Fe₂O₄ thin films prepared by pulsed laser deposition/ Takeshi Misu, Naonori Sakamoto, Kazuo Shinozaki et al // Sci. Technol. Adv. Mater.- 2011.- 12.- P. 034408.

74. Buniatyan V.V., Melikyan G.S., Hovsepyan R.K., Papoyan A.V., Dashtoyan H.R. I-V Characteristics of Pt-Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO₃-Pt Thin Films with Oxygen Vacancies // Armenian Journal of Physics.- 2016.- 9 (2).- P. 120-129.
75. Buniatyan V.V., Tsakanov V.M., Martirosyan N.W., Melikyan G.S., Dashtoyan H.R. Dielectric Characteristics of Pt/Ba_xSr_{1-x}TiO₃/Pt Thin Film Structure under the Electron Beam Irradiation // Armenian Journal of Physics.- 2016.- 9(2).- P. 138-146.
76. Դաշտոյան Յ.Վ., Բուլնիսյան Վ.Վ., Դաշտոյան Յ.Վ. Ֆերոէլեկտրական նանոթաղանթային կառուցվածքների վոլտ-ամպերային բնութագրերը // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2015.- Մաս 1.- Էջ 199-205.
77. Pulsed laser ablation and deposition of complex oxides / T. Ohnishi, T. Yamamoto, S. Meguro et al // Journal of Physics: Conference Series.- 2007.- 59.- P. 514-519.
78. McMorrow D., Als-Nielsen J. Elements of modern X-ray physics (2nd ed.).- Wiley-Blackwell, Oxford, 2011.- 434 p.
79. Gevorgian S. Ferroelectrics in microwave devices, circuits and systems: Physics, modeling, fabrication and measurements, firstst ed.- Springer, London, 2009.- 394 p.
80. Memristors and memristive systems / R. Tetzlaff (Ed.).- Springer, New York, 2014.- 409 p.
81. Capacitive field-effect pH sensor based on an electrolyte-ferroelectric-insulatorsemiconductor structure: Proceedings SENSOR 2009, Volume II / V. Buniatyan, N. Martirosyan, M. Abouzar, J. Schubert et al.- AMA Service, Wunstorf, 2009.- P. 317-322.
82. Dube D.C., Baborowski J., Muralt P., Setter N. The effect of bottom electrode on the performance of thin film based capacitors in the gigahertz region // Appl. Phys. Lett.- 1999.- 74.- P. 3546.
83. Tunable barium strontium titanate thin film capacitors for RF and microwave applications / A. Tombak, J.-P. Maria, F. Ayguavives, Zhang Jin et al // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.-2002.- 12.- P. 3–5.
84. Physical properties of (Ba,Sr)TiO₃ thin films used for integrated capacitors in microwave applications / T. Ayguavives, A. Tombak, J.-P. Maria, G.T. Stauf et al // ISAF 2000. Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics.- P. 365–368.
85. Gevorgian S.S., Martinsson T., Linner P., Kollberg E.L. CAD models for multilayered substrate interdigital capacitors // IEEE Trans. Microwave Theory Techn.- 1996.- 44.- P. 896–904.
86. Vendik O.G., Hollmann E.K., Kozyrev A.B., Prudan A.M. // Journal of Superconductivity.- 1999.- 12.- P. 325–338.
87. Դաշտոյան Յ.Վ., Դաշտոյան Յ.Վ. Մետաղական թաղանթների ստացումը բարձր հաճախականային փոշնստեցմամբ կատարելագործված BYՄ-2K տեղակայանքում // ՀՊՀՀ (Պոլիտեխնիկ) Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2012.- Մաս 1.- Էջ 358-361.
88. Դաշտոյան Յ.Վ., Դաշտոյան Ռ.Վ. Էլեկտրոնների պլազմային աղբյուրի կիրառումը նուրբ թաղանթային տեխնոլոգիայում // ՀՊՀՀ (Պոլիտեխնիկ) Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2013.- Մաս 1.- Էջ 267-271.

89. Դաշտոյան Յար.Ռ., Դաշտոյան Յով.Ռ. Ջերմագույն գայիս փոխակերպում միկրոկոնտրոլ երայիս վակուումաչափիչ և կարգավորիչ սարք // ՅՊԵՅ (Պոլիտեխնիկ) Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. - Երևան, 2014.- Մաս 1.- Էջ 196-200.
90. Chua L. Memristor-The missing circuit element//IEEE Trans.CircuitTheory.-1971.-18.-P.507-519.
91. Chua L.O., Kang S.-M. Memristive devices and systems // Proc. IEEE.- 1976.- 64.- P. 209–223.
92. Wang R.-V., McIntyre P.C. Point defect distributions and their electrical effects on (Ba,Sr)TiO₃/Pt thin films // J. Appl. Phys.- 2003.- 94.- P. 1926.
93. Robertson J. Energy levels of point defects in SrTiO₃ and related oxides // J. Appl. Phys.- 2003.- 93.- P. 1054.
94. Robertson J. Interfaces and defects of high-K oxides on silicon // Solid-State Electronics.- 2005.- 49.- P. 283–293.
95. Prosandeev S.A. On the average charge of the oxygen vacancy in perovskites necessary for kinetics calculations // J. Phys.: Condens. Matter.- 2002.- 14.- P. L745-L748.
96. Buniatyan V.V., Tsakanov V.M., Karoyan G.S., Dashtoyan H.R. I-V Characteristics of Thin Film Pt/Ba_xSr_{1-x}TiO₃/Pt Structures under the Impact of Electron Beam Irradiation // Proceedings of NPUA. “Information technologies, Electronics, Radio engineering”.- 2015.- №2.- P. 60-70.
97. Մելիքյան Գ.Ը., Կարոյան Գ.Ս., Բունիաթյան Վ.Վ., Ցականով Վ.Ս., Մարտիրոսյան Ն.Վ., Դաշտոյան Յ.Ռ., Մկրտչյան Մ.Ս. Մետաղ-ֆերոէլեկտրիկ ենթամակերևութային շերտի հաղորդականությունը էլեկտրոնային փնջով ճառագայթման ռեժիմում // ՅԾԱԼ. - 2015.- Յ.12, №4.- Էջ 753-757:
98. Մելիքյան Գ.Ը., Կարոյան Գ.Ս., Բունիաթյան Վ.Վ., Ցականով Վ.Ս., Մարտիրոսյան Ն.Վ., Դաշտոյան Յ.Ռ., Պետրոսյան Տ.Ն. Մետաղ-ֆերոէլեկտրիկ կոնտակտի ենթամակերևութային շերտում արատների ձևավորման մեխանիզմը էլեկտրոնային փնջով ճառագայթման դեպքում // ՅԾԱԼ. - 2015.- Յ.12, №3.- Էջ 573-582.
99. Lampert M.A., Mark P. Current injection in solids.- Academic Press, New York, 1970.- 351 p.
100. Mitrofanov O. Poole-Frenkel electron emission from the traps in AlGaIn/GaN transistors // J. Appl. Phys.-2004.- 95.- P. 6414.
101. Buniatian V., Martirosyan N., Vorobiev A., Gevorgian S. Dielectric model of point charge defects in insulating paraelectric perovskites // J. Appl. Phys.-2011.- 110.- P. 94110.
102. Dawber M., Rabe K.M., Scott J.F. Physics of thin-film ferroelectric oxides // Rev. Mod. Phys.- 2005.- 77.- P. 1083–1130.
103. Park C.H., Chadi D.J. Microscopic study of oxygen-vacancy defects in ferroelectric perovskites // Phys. Rev. B.- 1998.- 57- P. R13961-R13964.
104. Dashtoyan H.R. Microwave (RF) signal generation on metal-ferroelectric-metal nanostructure // Reports of the NAS and the NPUA. Series of Technical Sciences.- 2016.- 69(2).- P. 169-175.
105. Tagantsev A.K., Gerra G. Interface-induced phenomena in polarization response of ferroelectric thin films // J. Appl. Phys.- 2006.- 100.- P. 51607.

106. Metal-ferroelectric-semiconductor field-effect transistor (MFSFET) for single transistor memory by using Poly-Si source/drain and BaMgF₄ dielectric / J.-S. Lyu, B.-W. Kim, K.-H. Kim (Eds.) et al.- International Electron Devices Meeting. Technical Digest.- 1996.
107. The interface screening model as origin of imprint in PbZr_xTi_{1-x}O₃ thin films. II. Numerical simulation and verification / M. Grossmann, O. Lohse et al // J. Appl. Phys.- 2002.- 92.- P.2688.
108. The interface screening model as origin of imprint in PbZr_xTi_{1-x}O₃ thin films. I. Dopant, illumination, and bias dependence/M.Grossmann, O.Lohse et al//J.Appl.Phys.-2002.-92.- P.2680.
109. Frenkel J. On Pre-Breakdown Phenomena in Insulators and Electronic Semi-Conductors // Phys. Rev.- 1938.- 54.- P. 647–648.
110. Antula J. Hot-electron concept for Poole-Frenkel conduction in amorphous dielectric solids // J. Appl. Phys.- 1972.- 43.- P. 4663.
111. Sze S.M., Ng K.K. Physics of semiconductor devices, 3rd ed.- Wiley-Interscience, Hoboken, N.J., 2007.- 832 p.
112. Milnes A.G. Deep impurities in semiconductors.- Wiley-Interscience, New York, London.- 1973.
113. Buniatyan V.V., Aroutiounian V.M., Soukiassian P.G., Zekentes K. Microwave characteristics of hetero-junction IMPATT diodes based on SiC // J. Phys. IV France.- 2006.- 132.- P. 355–357.
114. Aroutiounian V.M., Buniatyan V.V., Soukiassian P.G. Characteristics of metal-silicon carbide tunnel contact // J. Phys. IV France.- 2006.- 132.- P. 137–139.
115. Silicon carbide TUNNETT diodes / V. Buniatyan, V. Aroutiounian, K. Zekentes et al // Solid-State Electronics.- 2004.- 48.- P. 1569–1577.
116. Aroutiounian V., Buniatyan V., Soukiassian P. Microwave characteristics of BARITT diodes based on silicon carbide // IEEE Trans. Electron Devices.- 1999.- 46.- P. 585–588.
117. Space-charge Effect on Electroresistance in Metal-Ferroelectric-Metal capacitors / B.-B. Tian, Y. Liu, L.-F. Chen et al // Scientific reports.- 2015.- 5.- P. 18297.
118. Zhang J.-J., Sun J., Zheng X.-J. A model for the C–V characteristics of the metal–ferroelectric–insulator–semiconductor structure // Solid-State Electronics.- 2009.- 53 (2).- P. 170-175.
119. Aroutiounian V., Buniatyan V., Soukiassian P. Small-signal analysis of quantum-well BARITT diodes based on silicon carbide // International Symposium on Optical Science and Technology, SPIE / A.R. Pirich, P.L. Repak, P.S. Idell, S.R. Czyzak (Eds.).- 2001.- P. 160–167.
120. Aroutiounian V.M., Buniatyan V.V., Petrosyan S., BARITT diodes with quantum wells // SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, SPIE / R.J. Hwu, K. Wu (Eds.).- 1999.- P. 551–560.
121. Ab initio modeling of surface structure for SrTiO₃ perovskite crystals / E. Heifets, R.I. Eglitis, E.A. Kotomin et al // Phys. Rev. B.- 2001.- 64.- P. 235417.

122. Wang Y.-P., Tseng T.-Y. Electronic defect and trap-related current of $(\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6})\text{TiO}_3$ thin films // J. Appl. Phys.- 1997.- 81.- P. 6762.
123. Maier J. Kinetics of oxygen stoichiometry changes // Solid State Ionics.- 2000.- 129.- P. 25–32.
124. Vorobiev A., Rundqvist P., Khamchane K., Gevorgian S. Microwave loss mechanisms in $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{TiO}_3$ thin film varactors // J. Appl. Phys.- 2004.- 96.- P. 4642.
125. Atomic-scale imaging of nanoengineered oxygen vacancy profiles in SrTiO_3 / D.A. Muller, N. Nakagawa, A. Ohtomo et al // Nature.- 2004.- 430.- P. 657–661.

Քաղեր ված 1

ՊոԼ ասոնի հավասարման համար ունենք՝

$$\frac{\varepsilon_r}{\beta^2}(\beta - 2AE^2) \cdot \frac{dE}{dx} = \rho_0 + \rho_1 e^{j\omega t},$$

$$\frac{\varepsilon_r}{(\beta_0 + \beta_1 e^{j\omega t})^2} [\beta_0 + \beta_1 e^{j\omega t} - 2A(E_0 + E_1 e^{j\omega t})^2] \cdot \frac{d(E_0 + E_1 e^{j\omega t})}{dx} = \rho_0 + \rho_1 e^{j\omega t},$$

$$\varepsilon_r [\beta_0 + \beta_1 e^{j\omega t} - 2A(E_0^2 + 2E_0 E_1 e^{j\omega t})] \cdot \frac{d(E_0 + E_1 e^{j\omega t})}{dx} = (\rho_0 + \rho_1 e^{j\omega t}) (\beta_0^2 + 2\beta_0 \beta_1 e^{j\omega t}),$$

$$\varepsilon_r [\beta_0 - 2AE_0^2 + \beta_1 e^{j\omega t} - 4AE_0 E_1 e^{j\omega t}] \cdot \left[\frac{dE_0}{dx} + \frac{dE_1}{dx} \cdot e^{j\omega t} \right] \cong \rho_0 \beta_0^2 + 2\rho_0 \beta_0 \beta_1 e^{j\omega t} + \beta_0^2 \rho_1 e^{j\omega t},$$

$$\varepsilon_r [\beta_0 - 2AE_0^2 + e^{j\omega t} (\beta_1 - 4AE_0 E_1)] \cdot \left(\frac{dE_0}{dx} + e^{j\omega t} \frac{dE_1}{dx} \right) \cong \rho_0 \beta_0^2 + (2\rho_0 \beta_0 \beta_1 + \beta_0^2 \rho_1) e^{j\omega t},$$

$$\varepsilon_r [(1 - AE_0^2) + (2AE_0 E_1 - 4AE_0 E_1) e^{j\omega t}] \cdot \left(\frac{dE_0}{dx} + e^{j\omega t} \frac{dE_1}{dx} \right) \cong \rho_0 \beta_0^2 + \beta_0 [2\rho_0 2AE_0 E_1 + \beta_0 \rho_1] e^{j\omega t},$$

$$\varepsilon_r \left\{ (1 - AE_0^2) \frac{dE_0}{dx} - 2AE_0 E_1 \cdot e^{j\omega t} \frac{dE_0}{dx} + (1 - AE_0^2) e^{j\omega t} \frac{dE_1}{dx} - 2AE_0 E_1 e^{2j\omega t} \frac{dE_1}{dx} \right\} \cong \quad (R.5.1.1)$$

$$\rho_0 \beta_0^2 + \beta_0 [4A\rho_0 E_0 E_1 + \beta_0 \rho_1] e^{j\omega t} \frac{dE_0}{dx} \cdot (1 - AE_0^2) \varepsilon_r \cong \rho_0 \beta_0^2,$$

$$\varepsilon_r(1-AE_0^2)\frac{dE_1}{dx} = 2AE_0E_1\frac{dE_0}{dx} + \beta_0[4A\rho_0E_0E_1 + \beta_0\rho_1]: \quad (3.5.1.2)$$

Անտեսել ով $e^{2j\omega t}$ կարգի անդամը՝ կստանանք (5.1)-ը և (5.2)-ը:

Յավելված 2

Յոսանքի փոփոխական բաղադրիչի համար ունենք (տես 5.9-ը)՝

$$I_1 = qn_{c0}\mu\left(-\frac{1}{V_0}\frac{dU_1}{dt}\right) + V_0\frac{dE_1}{dt}\left[\frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2}(1-AE_0^2)\right] - V_0\frac{2AE_0}{\beta_0}\left(-\frac{1}{V_0}\frac{dU_1}{dt}\right)\left[\frac{1}{\beta_0}\cdot\frac{\beta_0^2\rho_0}{\varepsilon_r(1-AE_0^2)} - 2\rho_0\right] + j\omega\left(-\frac{1}{V_0}\frac{dU_1}{dt}\right)\frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2}(1-AE_0^2):$$

Ձևափոխենք այն այսպես՝

$$I_1 = qn_{c0}\mu\left(-\frac{1}{V_0}\frac{dU_1}{dt}\right) + \frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2}(1-AE_0^2)\left\{\left(-\frac{1}{V_0}\right)\left[\frac{d^2U_1}{dt^2} - \mu\frac{dE_0}{dx}\cdot\frac{dU_1}{dt}\right]\right\} - \frac{2AE_0V_0\rho_0}{\beta_0}\left(\frac{\beta_0}{\varepsilon_r(1-AE_0^2)} - 2\right)\left(-\frac{1}{V_0}\frac{dU_1}{dt}\right) + \left(-\left(\frac{1}{V_0}\right)\frac{dU_1}{dt}j\omega\frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2}(1-AE_0^2)\right): \quad (3.5.2.1)$$

Ընդունենք $\beta_2 = \frac{\varepsilon_r(1-AE_0^2)}{\beta_0^2}$, կստանանք՝

$$I_1 = gn_0\mu\left(-\frac{1}{V_0}\frac{dU_1}{dt}\right) - \frac{1}{V_0}\beta_2\frac{d^2U_1}{dt^2} + \frac{1}{V_0}\mu\beta_2\frac{dE_0}{dx}\cdot\frac{dU_1}{dt} + \frac{2AE_0V_0\rho_0}{\beta_0}\left(\frac{1}{\beta_0\beta_2} - 2\right)\cdot\frac{1}{V_0}\cdot\frac{dU_1}{dt} - \frac{1}{V_0}\cdot\frac{dU_1}{dt}j\omega\beta_2$$

$$-I_1V_0 = gn_0\mu\frac{dU_1}{dt} + \beta_2\frac{d^2U_1}{dt^2} - \mu\beta_2\cdot\frac{dE_0}{dx}\frac{dU_1}{dt} - \frac{2AE_0V_0\rho_0}{\beta_0}\left(\frac{1}{\beta_0\beta_2} - 2\right)\cdot\frac{dU_1}{dt} + j\omega\beta_2\cdot\frac{dU_1}{dt} \quad (3.5.2.2)$$

$$-I_1V_0 = \left\{ gn_0\mu - \mu\beta_2\frac{d^2U_1}{dt^2} - \mu\beta_2\cdot\frac{dE_0}{dx} - \frac{2AE_0V_0\rho_0}{\beta_0}\left(\frac{1}{\beta_0\beta_2} - 2\right) + j\omega\beta_2 \right\}\cdot\frac{dU_1}{dt} + \beta_2\frac{d^2U_1}{dt^2}: \quad (3.5.2.3)$$

Պոլասոնի հավասարման հաստատուն բաղադրիչի համար ունենք նաև՝

$$\frac{dE_0}{dx} = \frac{\rho_0 \beta_0^2}{\varepsilon(1 - AE_0^2)} = \frac{\rho_0}{\beta_2},$$

հետևաբար՝

$$\begin{aligned} -I_1 V_0 &= \left\{ gn\omega\mu - \mu\rho_0 - \mu\beta_2 - \frac{2AE_0 V_0 \rho_0}{\beta_0} \left(\frac{1}{\beta_0 \beta_2} - 2 \right) + j\omega\beta_2 \right\} \frac{dU_1}{dt} + \beta_2 \frac{d^2 U_1}{dt^2} \\ -I_1 V_0 &= \left\{ gn\omega\mu - \rho_0 \left[\mu - \frac{2AE_0 V_0}{\beta_0} \left(\frac{1}{\beta_0 \beta_2} - 2 \right) \right] + j\omega\beta_2 \right\} \frac{dU_1}{dt} + \beta_2 \frac{d^2 U}{dt^2} \\ \frac{I_1 V_0}{\beta_2} &= \left\{ \frac{gn\omega\mu}{\beta_2} - \frac{\rho_0}{\beta_2} \left[\mu - \frac{2AE_0 V_0}{\beta_0} \left(\frac{1}{\beta_0 \beta_2} - 2 \right) \right] + j\omega \right\} \frac{dU_1}{dt} + \frac{d^2 U}{dt^2} \\ -\frac{I_1 V_0}{\beta_2} &= \{\omega_1 + j\omega\} \frac{dU_1}{dt} + \frac{d^2 U_1}{dt^2} \\ \frac{d^2 U_1}{dt^2} + (j\omega + \omega_1) \frac{dU_1}{dt} &= -\frac{V_0 I_1}{\beta_2}, \end{aligned} \quad (R.5.2.4)$$

որտեղ

$$\omega_1 = \frac{gn\omega\mu}{\beta_2} - \frac{\rho_0}{\beta_2} \left[\mu - \frac{2AE_0 V_0}{\beta_0} \left(\frac{1}{\beta_0 \beta_2} - 2 \right) \right]:$$

(R.5.2.4) հավասարման ինտեգրման համար կօգտվենք «շարժման» հավասարումներից, որոնք կստանանք հետևյալ առնչություններից՝

$$\begin{aligned} \frac{dE_0}{dx} \cdot \frac{\varepsilon_r (1 - AE_0^2)}{\beta_0^2} &= g(N_0^+ - n_{r0}) - gn_{c0}, \\ I_0 = gn_{c0} V_0 &\Rightarrow gn_{c0} = \frac{I_0}{V_0} \\ gn_{c0} &= g(N_0^+ - N_{r0}) - \frac{dE_0}{dx} \cdot \beta_2 \\ \frac{I_0}{V_0} &= g(N_0^+ - N_{r0}) - \beta_2 \frac{dE_0}{dx} \\ \frac{I_0}{\beta_2} &= \frac{g(N_0^+ - N_{r0}) V_0}{\beta_2} - \frac{dE_0 V_0}{dx}, \end{aligned} \quad (R.5.2.5)$$

$$V = \mu E, \quad V_0 = \mu E_0, \quad V_0 = \frac{dx}{dt}:$$

Եթե հաշվի առնենք, որ Լագրանժի կոորդինատները կախված են էլեկտրի կոորդինատների հետ հետևյալ առնչությամբ՝

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial E}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial E}{\partial t},$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \mu V_0 \cdot \frac{dE_0}{dt} = \mu \cdot \frac{\partial E_0}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial E_0}{\partial t} = \mu \frac{\partial E_0}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} = \mu V_0 \frac{\partial E_0}{\partial x}. \quad \frac{dV_0}{dt} = \mu V_0 \frac{\partial E_0}{\partial x} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

սպա (Ռ.5.2.4) հավասարումը կընդունի հետևյալ տեսքը՝

$$\frac{I_0}{\beta_2} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{q(N_0^+ - n_{t0})}{\beta_2} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (\text{Ռ.5.2.6})$$

որտեղ μ -ն էլեկտրոնների շարժունակության գործակալն է (ընդունում ենք հաստատուն):

$$\begin{aligned} \frac{I_0 \mu}{\beta_2} &= \frac{q\mu(N_0^+ - n_{t0})}{\beta_2} \cdot \frac{dX}{dt} - \frac{d^2X}{dt^2} \\ \frac{d^2X}{dt^2} - \frac{q\mu(N_0^+ - n_{t0})}{\beta_2} \cdot \frac{dX}{dt} &= -\frac{I_0 \mu}{\beta_2} \end{aligned} \quad (\text{Ռ.5.2.7})$$

$$\frac{d^2X}{dt^2} - \omega_t \frac{dX}{dt} = -\frac{I_0 \mu}{\beta_2}, \quad (\text{Ռ.5.2.8})$$

որտեղ $\omega_t = \frac{q\mu(N_0^+ - n_{t0})}{\beta_2}$:

(Ռ.5.2.8) հավասարման լուծումը $t=0, V_0=0, X=0$ սկզբնական պայմաններով՝

$$V_0 = \frac{I_0 \mu}{\beta_2 \omega_t} (1 - e^{\omega_t t}) \quad (\text{Ռ.5.2.8.b})$$

$$X = \frac{\mu I_0}{\beta_2 \omega_t^2} (1 + \omega_t t - e^{\omega_t t}) \quad (\text{Ռ.5.2.8.c})$$

Երբ $t=0, V_0=0, X=0$:

Եթե լիցքակիրների թռիչքի տևողությունը τ է, սպա

$$l = \frac{\mu I_0 \tau^2}{\beta_2 \theta_t^2} (1 + \theta_t - e^{\theta_t})$$

որտեղ $\theta_t = \omega_t \tau$ կանվանենք թակարդային թռիչքի անկյուն:

$$\frac{dE_0}{dX} = \frac{q(N_0^+ - n_{t0})}{\beta_2}$$

$$\omega_1 = \frac{2qn_{c0}\mu}{\beta_2} - \frac{\mu}{\beta_2} q(N_0^+ - n_{i0}) + \frac{\rho_0 2AE_0 V_0}{\beta_0 \beta_2} \left(\frac{1}{\beta_0 \beta_2} - 2 \right)$$

$$\omega_1 = \frac{2qn_{c0}\mu}{\beta_2} - \omega_i + \mu \frac{2AE_0^2 \rho_0}{\beta_0 \beta_2} \left(\frac{1}{\beta_0 \beta_2} - 2 \right)$$

Առաջին մոտավորումը ամբ ընդունենք $\beta_2 \approx \frac{\varepsilon_r}{\beta_0^2}$:

Քանի որ $\varepsilon_r \gg 1$, $\beta_0 \geq 1$, $\beta_2 \gg 1$, հետևապես $2\mu AE_0^2 \left(\frac{1}{\beta_0^2 \beta_2^2} - \frac{2}{\beta_0 \beta_2} \right)$

բաղադրիչի մեջ կարող ենք $\frac{1}{\beta_0^2 \beta_2^2}$ -ն անտեսել: Արդյունքում կստանանք՝

$$\omega_1 = \frac{2qn_{c0}\mu}{\beta_2} - \omega_i - \frac{4\mu AE_0^2 \rho_0}{\beta_0 \beta_2}$$

$$\omega_1 = \frac{2qn_{c0}\mu}{\beta_2} - \omega_i - \frac{4\mu AE_0^2 \rho_0}{\beta_0 \beta_2} \cdot q(N_0^+ - n_{i0}) + \frac{4\mu AE_0^2 qn_{c0}}{\beta_0 \beta_2}$$

$$\omega_1 \cong \frac{2qn_{c0}\mu}{\beta_2} - \omega_i - \frac{4\mu AE_0^2}{\beta_0} \cdot \varpi_i + \frac{2\mu qn_{c0}\mu}{\beta_0 \beta_2} \cdot 2AE_0^2$$

$$\omega_1 \cong \frac{2qn_{c0}\mu}{\beta_2} \left(1 + \frac{2AE_0^2}{\beta_0} \right) - \omega_i \left(1 + \frac{4AE_0^2}{\beta_0} \right)$$

$$\omega_1 \cong \frac{2qn_{c0}\mu}{\beta_2} \left(1 + \frac{3AE_0^2}{\beta_0} \right) - \frac{\varpi_i (1 + 5AE_0^2)}{\beta_0}$$

$$\omega_1 \cong \omega_0 \left(1 + \frac{3AE_0^2}{\beta_0} \right) - \frac{\varpi_i (1 + 5AE_0^2)}{\beta_0},$$

որտեղ $\omega_0 = \frac{2qn_{c0}\mu}{\beta_2}$:

Քանի որ $n_{c0} \ll \epsilon$, $\mu \ll \epsilon$, $\beta_2 \gg 1$, ապա ω_1 -ի առաջին անդամը նույնպես անտեսելով՝ կստանանք՝

$$\omega_1 \cong -\frac{\omega_t}{\beta_0}(1+5AE_0^2):$$

Չեռնաբար՝ արդյունքում կունենանք՝

$$\frac{d^2U_1}{dt^2} + \left[j\omega - \frac{\omega_t}{\beta_0}(1+5AE_0^2) \right] \frac{dU_1}{dt} = -\frac{I_1V_0}{\beta_2} \quad (3.5.2.9)$$

Վերջնական տեսքով լարման փոփոխական բաղադրիչի համար կստանանք՝

$$\frac{d^2U_1}{dt^2} + (j\omega - \omega_2) \frac{dU_1}{dt} = -\frac{I_1V_0}{\beta_2} \quad (3.5.2.10)$$

որտեղ $\omega_2 = \frac{\omega_t}{\beta_0}(1+5AE_0^2)$:

(3.5.2.10) հավասարման առաջին ինտեգրումից կստանանք՝

$$\frac{dU_1}{dt} + (j\omega - \omega_2)U_1 = -\frac{I_1X}{\beta_2} + C_0n_0t_1:$$

$C_0n_0t_1$ -ը կորոշենք հետևյալ եզրային պայմաններում՝
 $t=0, X=0, U_1=0$:

$$C_0n_0t_1 = \left(\frac{dU_1}{dt} \right)_{X,t=0} = 0$$

Արդյունքում կստանանք՝

$$\frac{dU_1}{dt} + (j\omega - \omega_2)U_1 = -\frac{I_1X}{\beta_2} \quad (3.5.2.11)$$

Տեղադրելով X -ի արտահայտույթը նրա «շարժման» հավասարումներից (3.5.2.11)-ի մեջ՝ կստանանք՝

$$\frac{dU_1}{dt} + (j\omega - \omega_2)U_1 = -\frac{I_1}{\beta_2} \left[\frac{\mu l_0}{\beta_2 \omega_t^2} (1 + \omega_t t - e^{\omega t}) \right] \quad (3.5.2.12)$$

$$\frac{dU_1}{dt} + (j\omega - \omega_2)U_1 = -\frac{a}{\omega_t^2} (1 + \omega_t t - e^{\omega t}), \quad (3.5.2.13)$$

որտեղ $a = \frac{I_1 \mu l_0}{\beta_2^2}$:

Եթե ընդունենք, որ թակարդների խտությունը (թթվածնի վականսիաների մեծ խտությունը) կուտակված է “կոնդենսատորային” կառուցվածքի մետաղական կոնտակտների մոտ, և Պուլլ-Ֆրենկելյան իոնացումը տեղի է ունենում հիմնականում ենթակոնտակտային տիրույթում, թաղանթի երկարությունն էլ է, ապա լիցքակիրների թռիչքի տևողությունը կլինի՝

$$\tau \approx \frac{l}{V_0}:$$

(Ջ.5.2.13) հավասարման լուծումն ունի հետևյալ տեսքը՝

$$U_1 = e^{-\int_0^\tau p dt} \left\{ C_2 + \int_0^\tau Q e^{\int_0^\tau p dt} dt \right\},$$

որտեղ $p = j\omega - \omega_2$, $Q = -\frac{a}{\omega_t^2} (1 + \omega_t t - e^{\omega_t t})$:

$$\int_0^\tau p dt = j\theta - \theta_2, \text{ որտեղ } \theta = \omega\tau, \theta_2 = \omega_2\tau:$$

$$U_1 = e^{-(j\omega - \omega_2)t} \left\{ C_2 - \frac{a}{\omega_t^2} \int [e^{(j\omega - \omega_2)t} dt + \int \omega_t t e^{(j\omega - \omega_2)t} - \int e^{(j\omega - \omega_2 + \omega_t)t} dt] \right\}$$

$$U_1 = e^{-(j\omega - \omega_2)t} \left\{ C_2 - \frac{a}{\omega_t^2} \left[\frac{e^{(j\omega - \omega_2)t}}{(j\omega - \omega_2)} \int_0^\tau - \frac{e^{(j\omega - \omega_2 + \omega_t)t}}{(j\omega - \omega_2 + \omega_t)} \int_0^\tau + \omega_t \int t e^{(j\omega - \omega_2)t} dt \right] \right\}$$

$$\int t e^{(j\omega - \omega_2)t} dt = UV \int_0^\tau - \int_0^\tau V dU = \frac{\tau e^{(j\omega - \omega_2)\tau}}{j\omega - \omega_2} - \frac{1}{(j\omega - \omega_2)} \left[\frac{e^{(j\omega - \omega_2)\tau}}{j\omega - \omega_2} - \frac{1}{j\omega - \omega_2} \right]$$

$$t = U, dU = dt$$

$$dV = e^{(j\omega - \omega_2)t}$$

$$V = \frac{e^{(j\omega - \omega_2)t}}{j\omega - \omega_2}$$

$$U_1 = C_2 e^{-(j\theta - \theta_2)} - \frac{a}{\omega_t^2} \left\{ \frac{1}{j\omega - \omega_2} - \frac{e^{-(j\theta - \theta_2)}}{j\omega - \omega_2} - \frac{e^{\theta_t}}{j\omega - \omega_2 + \omega_t} + \frac{e^{-(j\theta - \theta_2)}}{(j\omega - \omega_2 + \omega_t)} + \right. \\ \left. + \omega_t \left[\frac{\tau}{j\omega - \omega_2} - \frac{1}{j\omega - \omega_2} \left(\frac{1}{j\omega - \omega_2} - \frac{e^{-(j\theta - \theta_2)}}{j\omega - \omega_2} \right) \right] \right\}$$

$$U_1 = C_2 e^{-(j\theta - \theta_2)} - \frac{a}{\omega_t^2} \left\{ \frac{\tau}{j\theta - \theta_2} - \frac{\tau e^{-(j\theta - \theta_2)}}{j\theta - \theta_2} - \frac{\tau e^{\theta_t}}{j\theta - \theta_2 + \theta_t} + \frac{\tau e^{-(j\theta - \theta_2)}}{j\theta - \theta_2 + \theta_t} + \right. \\ \left. + \frac{\tau \theta_t}{j\theta - \theta_2} - \frac{\tau \theta_t}{(j\theta - \theta_2)^2} + \frac{\theta_t e^{-(j\theta - \theta_2)}}{j\theta - \theta_2} \right\}$$

Երբ $\tau = 0$ ($t = 0$), թռիչքի անկյունը նույնպես զրո է $\theta = 0$, արդյունքում՝ $U_1 = 0, C_2 = 0$:

Եթե հաշվի առնենք, որ $\omega_2 = \beta_3 \omega_t$, որտեղ $\beta_3 = \frac{(1 + 5AE_0^2)}{\beta_0}$, հետևաբար՝

$$\theta_2 = \beta_3 \theta_t:$$

$$-U_1 = \frac{a\tau^3}{\theta_t^2} \left\{ \frac{1}{j\theta - \beta_3 \theta_t} (1 - e^{-(j\theta - \beta_3 \theta_t)}) - \frac{e^{\theta_t}}{j\theta + \theta_t (1 - \beta_3)} + \frac{e^{-(j\theta - \beta_3 \theta_t)}}{j\theta + \theta_t (1 - \beta_3)} + \frac{\theta_t}{j\theta - \beta_3 \theta_t} \left(1 - \frac{1}{j\theta - \beta_3 \theta_t} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\theta_t e^{-(j\theta - \beta_3 \theta_t)}}{j\theta - \beta_3 \theta_t} \right\}$$

$$-U_1 = \frac{I_1 \mu l_0 \beta_0^2 \tau^3}{\varepsilon_r^2 (1 - AE_0^2) \theta_t^2} \left\{ \frac{1}{j\theta - \beta_3 \theta_t} - \frac{e^{-(j\theta - \beta_3 \theta_t)}}{j\theta - \beta_3 \theta_t} - \frac{e^{\theta_t}}{j\theta + \theta_t (1 - \beta_3)} + \frac{e^{-(j\theta - \beta_3 \theta_t)}}{j\theta + \theta_t (1 - \beta_3)} + \right. \\ \left. + \frac{\theta_t}{j\theta - \beta_3 \theta_t} - \frac{\theta_t}{j\theta - \beta_3 \theta_t} + \frac{\theta_t e^{-(j\theta - \beta_3 \theta_t)}}{j\theta - \beta_3 \theta_t} \right\} \quad (3.5.2.14)$$

Ցածր ազդանշանային իմպեդանսի համար կուսենանք՝

$$Z = \frac{-U_1}{I_1}$$

որտեղ $(-U_1)$ -ը սարքի վրա փոքր ազդանշանային լարումն է, որը կարող ենք հաշվել (3.5.2.14) արտահայտույթով:

Ներկայացնենք $Z = R - jX$ տեսքով, այսինքն՝ ներկայացնենք Մ-ՏԷ-Մ կառուցվածքը որպես համարժեք դիմադրության և համարժեք ունակության հաջորդաբար միացված շղթա:

Մ-ՏԷ-Մ կառուցվածքում էլեկտրական դաշտի տարածական բաշխումը կստանանք

$$E_1 = -\frac{1}{V_0} \frac{dU_1}{dt}$$

արտահայտությունն ից, եթե V_0 -ի համար տեղադրենք

$$V_0 = \frac{I_0 \mu}{\beta_2 \omega t} (1 - e^{\omega t}):$$

Այնուհետև, շեղման հոսանքը կարող ենք հաշվել՝

$$I_{1dis} = \frac{\epsilon_r}{\beta_0^2} j \omega E_1 (1 - A E_0^2)$$

արտահայտությամբ, իսկ արագության մոդուլը և աղիսը պայմանավորված հոսանքը՝

$$I_{1v} = \mu I_0 \frac{E_1}{V_0}$$

արտահայտությամբ, լիցքակիրների (էլեկտրոնների) խտության մոդուլը և աղիսը պայմանավորված հոսանքը՝

$$I_{1n} = I_1 - I_{1dis} - I_{1v}$$

արտահայտությամբ:

(Ջ.5.2.14) արտահայտության ձևափոխությունն ից հետո R -ի, X -ի, համար համապատասխանաբար, կստանանք՝

$$Z = a_2 \left\{ \frac{j\theta + \beta_3 \theta_t}{\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2} - \frac{(j\theta + \beta_3 \theta_t)(\cos \theta - j \sin \theta) e^{\beta_3 \theta_t}}{(\theta^2 + \beta_3 \theta_t)^2} - \frac{e^{\theta_t} (j\theta - \theta_t (1 - \beta_3))}{\theta^2 + (\theta_t (1 - \beta_3))^2} - \frac{(j\theta - \theta_t (1 - \beta_3)) e^{\beta_3 \theta_t} (\cos \theta - j \sin \theta)}{\theta^2 + (\theta_t (1 - \beta_3))^2} + \frac{\theta_t (j\theta + \beta_3 \theta_t)}{\theta^2 + (\theta_t \beta_3)^2} - \frac{\theta_t (j\theta + \beta_3 \theta_t)^2}{[\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2]^2} + \frac{\theta_t e^{\beta_3 \theta_t} (j\theta + \beta_3 \theta_t) (\cos \theta - j \sin \theta)}{\theta^2 + (\beta_3 \theta_t)^2} \right\},$$

$$a_2 = \frac{\mu I_0 \beta_0^2 \tau^3}{\epsilon_r^2 (1 - A E_0^2) \theta_t^2},$$

$$Z = a_2 \left\{ \frac{j\theta + \beta_3\theta_t}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} - \frac{e^{\beta_3\theta_t} (j\theta \cos \theta + \theta \sin \theta + \beta_3\theta_t \cos \theta - j\beta_3\theta_t \sin \theta - je^{\theta_t}\theta)}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} + \frac{e^{\theta_t}\theta_t(1-\beta_3)}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} - \frac{e^{\beta_3\theta_t} (j\theta \cos \theta + \theta \sin \theta - \theta_t(1-\beta_3)\cos \theta + \theta_t(1-\beta_3)j \sin \theta)}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} + j \frac{\theta_t\theta}{\theta^2 + (\theta_t\beta_3)^2} + \frac{\beta_3\theta_t^2}{\theta^2 + (\theta_t\beta_3)^2} + j \frac{2\theta\beta_3\theta_t^2}{[\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2]} - \frac{\theta_t^3\beta_3^2}{[\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2]} + \frac{\theta_t e^{\beta_3\theta_t} (j\theta \cos \theta + \theta \sin \theta + \beta_3\theta_t \cos \theta)}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} \right\}$$

$$Z = a_2 \left\{ \frac{j\theta}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} + \frac{\beta_3\theta_t}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} - \frac{e^{\beta_3\theta_t} (\theta \sin \theta + \beta_3\theta_t \cos \theta)}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} - j \frac{e^{\beta_3\theta_t}}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} (\theta \sin \theta - \beta_3\theta_t \sin \theta) - j \frac{e^{\beta_3\theta_t} (j\theta \cos \theta + \theta \sin \theta - \theta_t(1-\beta_3)\cos \theta + \theta_t(1-\beta_3)j \sin \theta)}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} + j \frac{\theta_t\theta}{\theta^2 + (\theta_t\beta_3)^2} + \frac{\beta_3\theta_t^2}{\theta^2 + (\theta_t\beta_3)^2} + j \frac{\theta e^{\theta_t}}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} + \frac{e^{\theta_t}\theta_t(1-\beta_3)}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} - \frac{e^{\beta_3\theta_t} (\theta \sin \theta - \theta_t(1-\beta_3)\cos \theta)}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} - j \frac{e^{\beta_3\theta_t} (\theta \cos \theta + \theta_t(1-\beta_3)\sin \theta)}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} + j \frac{\theta\theta_t}{\theta^2 + (\theta_t\beta_3)^2} + \frac{\theta\theta_t}{[\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2]^2} - j \frac{2\theta\beta_3\theta_t}{[\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2]^2} - \frac{\theta_t^3\beta_3^2}{[\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2]^2} + \frac{\theta_t e^{\beta_3\theta_t} (\theta \sin \theta + \beta_3\theta_t \cos \theta)}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} - j \frac{\theta e^{\beta_3\theta_t} (\beta_3\theta_t \sin \theta - \theta \cos \theta)}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} \right\}$$

3 t unu up un`

$$X = a_2 \left\{ \frac{e^{\beta_3\theta_t} (\theta \cos \theta - \beta_3\theta_t \sin \theta)(1-\theta_t)}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} - \frac{\theta(1+\theta_t)}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} + \frac{2\theta\beta_3\theta_t^2}{[\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2]^2} + \frac{\theta e^{\theta_t} + e^{\beta_3\theta_t} (\theta \cos \theta + \theta_t(1-\beta_3)\sin \theta)}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} \right\}$$

$$R = \left[\frac{a_2}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} \right] \left\{ \frac{\beta_3\theta_t(1+\theta_t) + \theta_t(\theta - \theta_t^2\beta_3^2) + e^{\beta_3\theta_t} (\theta \sin \theta + \beta_3\theta_t \cos \theta)(\theta_t - 1) + [\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2] \cdot [\theta_t e^{\theta_t} (1-\beta_3) - e^{\beta_3\theta_t} (\theta \sin \theta - \theta_t(1-\beta_3)\cos \theta)]}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} \right\} \quad (R.5.2.15)$$

$$X = \left[\frac{a_2}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} \right] \left\{ \frac{\frac{2\theta\beta_3\theta_t^2}{\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2} - \theta(1+\theta_t) + (1-\theta_t) + e^{\beta_3\theta_t} (\theta \cos \theta + \beta_3\theta_t \sin \theta) + [\theta^2 + (\beta_3\theta_t)^2] \cdot [\theta e^{\theta_t} + e^{\beta_3\theta_t} (\theta \cos \theta + \theta_t(1-\beta_3)\sin \theta)]}{\theta^2 + (\theta_t(1-\beta_3))^2} \right\} \quad (R.5.2.16)$$