

Ն.Վ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Դ.Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Մ.Ա.Խ. ԱՐԱՂԻ, Տ.Վ. ՎԱՆԴՈՒՆՑ,
Ս.Գ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ռ.Հ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ա.Ս. ԵՐԵՄՅԱՆ

ՄԱՆԳԱՆԻ ՀԱՎԵԼՈՒՄՈՎ ԲԻՍՄՈՒԹ ՖԵՐՏԻ ՎԵՐԱՄԻԿԱԿԱՆ
ՆՍՈՒՇՆԵՐԻ ՍՏԱՑՈՒՄԸ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Մշակվել է մանգանի հավելումով բիսմութ ֆերիտի ինքնատարածվող բարձրջերմաստիճանային սինթեզման տեխնոլոգիա: Ռենտգենաֆազային վերլուծությամբ որոշվել են բովախառնուրդի պատրաստման և սինթեզման լավագույն պայմանները: Մշակվել են կերամիկական նմուշների ստացման և օհմական հպակների պատրաստման տեխնոլոգիական գործընթացները: Ուսումնասիրվել են դիէլեկտրիկ թափանցելիության և կորուստների անկյան տանգենսի հաճախությունից կախվածությունը ու վոլտ-ամպերային բնութագրերը:

Առանցքային բառեր. ֆերոէլեկտրիկ, մոլտիֆերոիկ, կերամիկա, ԻԲՄ, դիէլեկտրիկ թափանցելիություն, դիէլեկտրիկ կորուստներ:

Ներածություն: Պերովսկիտ ֆերոէլեկտրիկ և բազմաֆերոիկ նյութերը բնութագրվում են պարամետրերի հարուստ բազմազանությամբ, ինչպիսիք են՝ դիէլեկտրիկական, ակուստիկ/պիեզոէլեկտրական, ֆերոմագնիսական և այլն: Այս հատկությունները կարող են կարգավորվել արտաքին ազդակներով, ինչպիսիք են՝ էլեկտրական և/կամ մագնիսական դաշտը, ջերմաստիճանը կամ մեխանիկական լարվածությունը: Ֆերոէլեկտրիկ/մոլտիֆերոիկ նյութերի կիրառմամբ իրականացվում է ակուստիկական [1], օպտիկական [2], էլեկտրական/ԳԲՀ [3] համապիտանի ճկուն բաղադրիչների լայն բազմազանություն: Այնուամենայնիվ, մոլտիֆերոիկները լավագույնն են բազմաֆունկցիոնալության առումով: Դրանք համատեղում են ֆերոէլեկտրիկ, ֆերոմագնետիկ ու պիեզոէլեկտրիկ և այլ հատկությունները: Վերջիններս իրենց ֆերոէլեկտրական, ֆերոմագնիսական և ֆերոէլաստիկական հատկությունների շնորհիվ մեծ ուշադրության են արժանացել հետազոտական բազմաթիվ ոլորտներում, ինչպիսիք են, օրինակ, էներգաանկախ հիշող սարքերը, մագնիսական դաշտի սենսորները, ալեհավաքները, կարգաբերելի ինդուկտորներն ու գոյիչները, փուլի շրջող/շեղող սարքերը, և հնարավորություն են տալիս՝ նախագծելու նոր հատկություններով հեռանկարային սարքեր [4-12]:

BSTO և BFO-BTO կոմպոզիցիաների դիէլեկտրիկական հատկությունները հնարավոր է արագ/կտրուկ փոփոխել՝ շեղող լարման իմպուլս կիրառելով: Այս

նյութերն ունեն յուրահատուկ ներքին հատկություններ, որոնց շնորհիվ դրանք շատ գրավիչ են որպես արագագործ վենտիլներ և մեծ-հզորությամբ դեկավարվող կարգաբերիչներ՝ բարձր էներգիայով արագացուցչային տեխնիկայում կիրառությունների դեպքում:

Մուլտիֆերոէլեկտրիկները բնութագրվում են իրենց էլեկտրական և մագնիսական հատկությունների խիստ կապվածությամբ, որի միջոցով էլ հնարավոր է լինում սենյակային ջերմաստիճանի պայմաններում վերափոխել նյութի մագնիսական հատկությունները արտաքին էլեկտրական դաշտի միջոցով և հակառակը: Այս առանձնահատկությունը հայտնի է որպես մագնիսաէլեկտրական կապ (ME coupling) [6-9]: Այս նյութերն օժտված են նաև պիեզոէլեկտրական և պիրոէլեկտրական հատկություններով, և հետևաբար՝ նյութի հատկությունները կարելի է փոփոխել նաև ջերմաստիճանի և արտաքին մեխանիկական ազդեցությունների միջոցով:

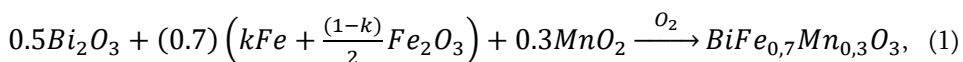
Գրականությունից հայտնի է, որ մագնիսաէլեկտրական կապն ավելի ուժեղ է կոմպոզիտային նյութերում, քան միաֆազ նյութերում: Ընդ որում, միաֆազ նյութերի մեծ մասում մագնիսաէլեկտրական կապը կա՛մ բավականին թույլ է, կա՛մ այն չի առաջանում: Միաֆազ մուլտիֆերոէլեկտրիկների շարքին է պատկանում բիսմութ ֆերիտը՝ BiFeO_3 (BFO), որը շեղանկյունանիստ բյուրեղային կառուցվածքով պերովսկիտ նյութ է և պատկանում է $R3c$ խմբին [9]: Միաֆազ նյութերի համեմատությամբ BFO-ի առավելություններն են՝ բարձր Կյուրիի ջերմաստիճանը ($T_C=830^\circ\text{C}$), բարձր Նեելի ջերմաստիճանը ($T_N=367^\circ\text{C}$) և բարձր բևեռացումը ($P_r=90\ldots100$ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$) [4, 6-9, 12]: Սակայն BFO նյութին բնորոշ են մի քանի թերություններ, որոնք ակնհայտորեն կարող են սահմանափակել դրանց կիրառությունը տարբեր ոլորտներում: BFO-ի թերություններից է համեմատաբար թույլ մագնիսաէլեկտրական կապը, քանի որ էլեկտրական և մագնիսական հատկություններ ապահովող իոնները տարբեր են, նյութի էլեկտրական հատկություններն ապահովում են Bi-ի իոնները, իսկ մագնիսական հատկությունները՝ Fe-ի իոնները: BFO նյութին բնորոշ թերություն է նաև կորստի մեծ հոսանքը՝ ցածր դիմադրությունը, քանի որ BFO-ի պատրաստման ընթացքում առաջանում են հավելյալ Fe^{2+} իոններ, հետևաբար՝ Bi-ի և O-ի վականախաներ: Ընդ որում, կորստի մեծ հոսանքի պատճառով մեծ դժվարություն է առաջանում՝ ստանալու այնպիսի BFO նյութ, որի բևեռացումը կլինի $90\ldots100$ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ [6, 10]:

Վերը նկարագրված թերությունների պատճառով սովորաբար անհրաժեշտություն է առաջանում լավարկել BFO նյութի հատկությունները, որն իրականացնելու համար գոյություն ունեն մի քանի արդյունավետ մեթոդներ: Առաջին մեթոդի դեպքում իրականացվում է BFO նյութի իոնների մի մասի փոխարինում համապատասխան իոններով: Հայտնի է, որ այս դեպքում համար օգտագործվում

են սակավահողային իոններ (La^{3+} , Sm^{3+} , Nd^{3+} , Ho^{3+})՝ բիսմութի իոնների փոխարինման համար և անցումային մետաղների իոններ (Mn^{3+} , Ti^{4+} , Co^{3+} , Zr^{4+})՝ երկաթի իոնների փոխարինման համար: Երկրորդ մեթոդի դեպքում BFO նյութը խառնում են պերովսկիտների խմբին պատկանող մեկ այլ նյութի հետ, օրինակ՝ CaTiO_3 , PbTiO_3 , BaTiO_3 , LaFeO_3 : $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{BaTiO}_3$ պինդ խառնուրդը (BF-BT), Կյուրիի բարձր ջերմաստիճանի և նվազեցված կորստի հոսանքի հատկությունների շնորհիվ, հետազոտողների համար հանդիսանում է որպես հեռանկարային նյութ և կապար պարունակող նյութերի այլընտրանք [6, 8, 10, 12-14]: Գոյություն ունեն նաև կապար չպարունակող այլ նյութեր, որոնցից են, օրինակ՝ $(\text{Ba,Ca})\text{TiO}_3$ - $\text{Ba}(\text{Ti,Zr})\text{O}_3$ (BCZT), $(\text{Bi,Na})\text{TiO}_3$ (BNT), $(\text{K,Na})\text{NbO}_3$ (KNN):

Որպես լավագույն պիեզոէլեկտրական նյութ՝ նախկինում լայնորեն կիրառություն ուներ կապարի ցիրկոնիում տիտանատը ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ կամ PZT), սակայն քանի որ կապարը համարվում է թունավոր նյութ մարդկանց և շրջակա միջավայրի համար, այդ պատճառով էլ օրենսդրական սահմանափակումների միջոցով արգելվեց էլեկտրոնային սարքերում կապարի օգտագործումը սնդիկի, կադմիումի և վեցավալենտ քրոմի հետ միասին:

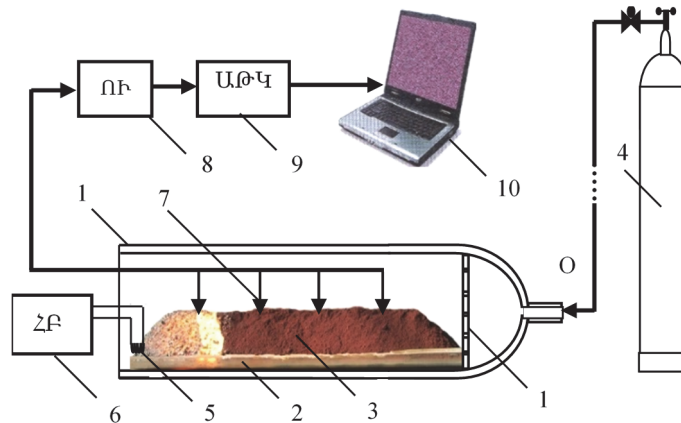
Փորձական մաս: ԻԲՄ տեխնոլոգիայով $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ փոշենյութի ստացման համար օգտագործվել են հետևյալ ելանյութերը. որպես վառելիք՝ Fe, իսկ որպես օքսիդիչ՝ թթվածին (O_2), բիսմութի օքսիդ՝ Bi_2O_3 (մաքրությունը > 99,975 %, մասնիկի չափը՝ 1...5 մկմ), երկաթի օքսիդ՝ Fe_2O_3 (մաքրությունը > 99,975 %, մասնիկի չափը՝ 1...5 մկմ), երկաթ՝ Fe (մաքրությունը > 99 %, մասնիկի չափը՝ 1...5 մկմ), մանգանի երկօքսիդ՝ MnO_2 (մաքրությունը > 99,9 %, մասնիկի չափը՝ 1...5 մկմ): Մինչև իրականացվել է հետևյալ քիմիական ռեակցիայով՝



որտեղ k -ն ռեակցիայի էկզոթերմիան կարգավորող գործակից է: ԻԲՄ տեխնոլոգիայով օքսիդային նյութի ստացման գործընթացի կազմակերպման, այրման պրոցեսների փորձարարական հետազոտությունների իրականացման համար պատրաստվել և օգտագործվել է պարբերական գործողությամբ լաբորատոր ռեակտոր (նկ. 1):

Լաբորատոր քվարցե խողովակի (1) մեջ տեղադրված է քվարցե պնակ (2), որի մեջ մամլված կամ ազատ վիճակում լցվում է ելանյութերի փոշեխառնուրդը (3): Խողովակի մի ծայրը բաց է, իսկ մյուս ծայրին ամրացված է շտուցեր՝ թթվածնի մատակարարման համար: Թթվածինը ռեակցիոն խցիկ է մղվում բալոնից (4)՝ զազի հոսքը կարգավորող սարքի միջոցով: Ելանյութերի փոշեխառնուրդի սկզբնականում տեղադրված է վոլֆրամից պատրաստված շիկացման պարույր (5), որի

շիկացման ժամանակ փոշեխառնուրդի սկզբնամասի մակերևութային շերտում տեղի է ունենում քիմիական ռեակցիա, և ձևավորվում է այրման ճակատ: Մկզբնավորված այրման ճակատը հաստատուն արագությամբ տարածվում է փոշեխառնուրդի երկայնքով, իսկ նրա անցնելուց հետո, խառնուրդի հովացմանը զուգընթաց, ձևավորվում է նպատակային օքսիդային փոշենյութը:

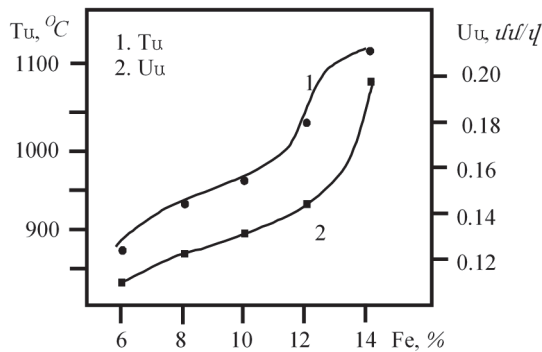


Նկ. 1. Լաբորատոր ԻԲՄ ռեակտորի սխեման. 1-քվարցե խողովակ, 2-քվարցե պնակ, 3-էլանյութերի փոշեխառնուրդ, 4-թթվածնի բալոն, 5-շիկացման պարույր, 6-հարուցման բլոկ, 7-թերմոդուզ, 8-ազդանշանի ուժեղարար, 9-անալոզ-թիվ կերպագրիչ, 10-համակարգիչ, 11-քվարցե ցանց

Որքան մեծ լինի k գործակիցը, այնքան մեծ կլինի ելանյութերի խառնուրդում վառելիքի քանակությունը, որից էլ կախված է խառնուրդի այրման ջերմաստիճանն ու այրման ճակատի տարածման արագությունը: Փորձերն իրականացվել են տեխնոլոգիական տարբեր ռեժիմներում. պատրաստվել են ելանյութերի խառնուրդներ՝ օժտված տարբեր էկզոթերմիայով: Փորձնական արդյունքները ցույց են տվել, որ համակարգում ԻԲՄ սկզբնավորելու և պահպանելու համար անհրաժեշտ է k -ն վերցնել 0,32 և ավելի (6 % և ավելի երկաթի փոշի): Այդ արժեքից ցածր արժեքների դեպքում ԻԲՄ գործընթացը կամ չի սկզբնավորվում, կամ կարճ ժամանակ հետո այրման գործընթացը մարում է: Ինչպես երևում է նկ. 2-ից, ելանյութերի խառնուրդում վառելիքի՝ Fe-ի փոշու քանակության մեծացմանը զուգընթաց աճում է ինչպես այրման ջերմաստիճանը, այնպես էլ այրման ճակատի արագությունը:

k -ի 0,73 արժեքից (14% Fe-ի փոշի) սկսած՝ այրման ջերմաստիճանը և ճակատի տարածման արագությունը սկսում են կտրուկ աճել, ինչը պայմանավորված է հետևյալ հանգամանքով: Ինչպես հայտնի է, այրման գոտին տարածվում է վառվող տեղամասից դեպի բովախառնուրդի հարակից շերտը՝ ջերմության փոխանցման հաշվին, այսինքն՝ հարակից հում շերտը տաքանում է մինչև այրման

ջերմաստիճան ու բռնկվում, ընդ որում, փոխանցված ջերմության քանակը հիմնականում կախված է երկու գործոններից՝ համակարգի ջերմահաղորդականությունից և վառվող ու հարակից հում շերտերի միջև ջերմային գրադիենտից:



Նկ. 2. Այրման ջերմաստիճանի T_c և արագության U_c կախվածությունը վառելիքի քանակից $BiFe_{0.7}Mn_{0.3}O_3$ համակարգում

Ջերմահաղորդման աճը պայմանավորված է մետաղների, տվյալ դեպքում՝ երկաթի բարձր ջերմահաղորդականությամբ (մետաղների օքսիդներն ունեն ավելի ցածր ջերմահաղորդականություն): Իսկ ջերմային գրադիենտի մեծացումը պայմանավորված է k -ի մեծացմանը զուգընթաց այրման առավելագույն ջերմաստիճանի մեծացմամբ: Ահա այս հանգամանքով էլ, հավանաբար, պայմանավորված է այրման ջերմաստիճանի և ճակատի տարածման արագության կտրուկ աճը:

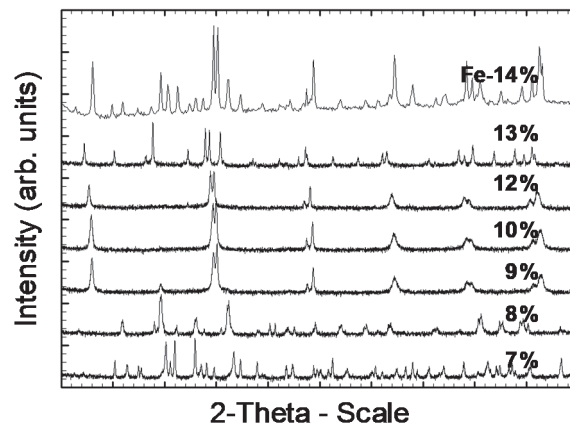
Այրման ճակատի տարածման արագությունը որոշվել է ժամանակից, որն անհրաժեշտ է նմուշում ջերմազույգերի միջև ճակատի տարածման համար: Տվյալների գրանցումը կատարվում է LabView ծրագրի միջոցով:

Նպատակային նյութերի սինթեզման ժամանակ, պայմաններից կախված, հիմնական կառուցվածքագոյացման ռեակցիաներն ամբողջությամբ տեղի չեն ունենում, և ստացված այրման արգասիքները, բացի նպատակային նյութից, պարունակում են նաև ելանյութերի որոշ քանակություն, ինչպես նաև այլ սինթեզված ֆազեր: $BiFeO_3$ փոշենյութի սինթեզման աստիճանի վրա այրման պարամետրերի և սինթեզման պայմանների ազդեցությունը պարզելու համար տեխնոլոգիական տարբեր ռեժիմներում սինթեզված նմուշները ենթարկվել են ռենտգենաֆազային անալիզի: Հետազոտությունները կատարվել են D8-advanced դիֆրակտաչափի միջոցով ստացված դիֆրակցիոն պատկերների՝ դիֆրակտագրերի հիման վրա: Ռենտգեն հետազոտությունները ցույց են տվել, որ ցանկալի ֆազով նպատակային նյութը սինթեզվում է, երբ բովախառնուրդի մեջ վառելիքի քանակը 9...12 % է:

Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ այրման ցածր ջերմաստիճանի (վառելիքի քիչ քանակության) դեպքում ԻԲՄ գործընթացն ավարտվում է Fe-ի

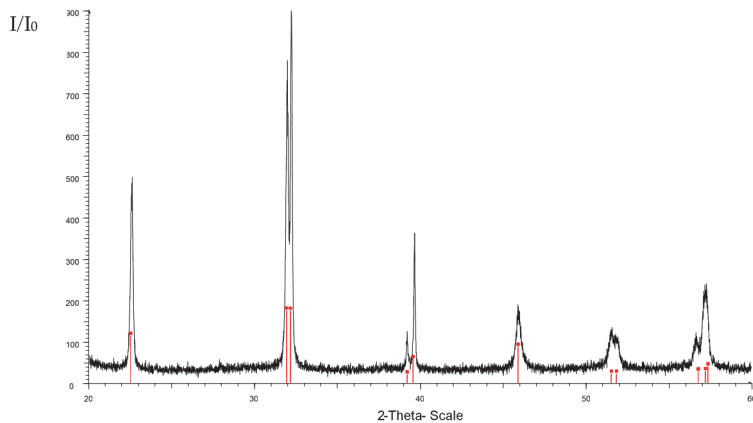
փոշու օքսիդացումով, և արդյունքում սինթեզված նյութի մեջ մնում են զգալի քանակությամբ ելանյութեր: Վառելիքի ավելացումը, որն ուղեկցվում է այրման ջերմաստիճանի աճով, նպաստում է BFO նյութի սինթեզմանը: Որքան շատ է վառելիքի քանակությունը ելանյութերի խառնուրդում, այնքան բարձր է նյութի սինթեզման աստիճանը:

ԻԲՄ տեխնոլոգիայով ստացված $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ փոշենյութի ռենտգենագրերը բերված են նկ. 3-ում և 4-ում: Կորերից կարելի է եզրակացնել, որ ֆազերի ինտենսիվությունների վրա հիմնականում ազդում են այրման ջերմաստիճանը և ճակատի տարածման արագությունը:



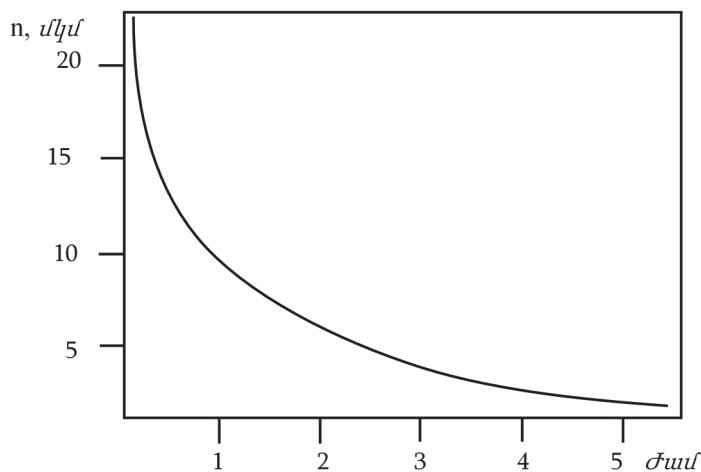
Նկ. 3. Ֆազի հարաբերական ինտենսիվությունը վառելիքի տարբեր քանակի դեպքում $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ համակարգում

Կերամիկական նմուշների նախապատրաստում (մանրացում, մամլում) և թրծում: Էլեկտրոնիկայում և էլեկտրատեխնիկայում օգտագործվող կերամիկական նյութերի հատկությունները կախված են նրանց միկրո և նանոկառուցվածքից: Կերամիկայի ծակոտկենությունը և հատիկների կառուցվածքային համասեռությունը ազդում է դրա հատկությունների վրա (դիէլեկտրիկ թափանցելիություն, մագնիսական թափանցելիություն, հիստերեզիսի կորի տեսք և այլն): Իր հերթին կերամիկական նյութերի միկրոկառուցվածքը կախված է դրանց եռակալման պայմաններից: Ինչպես հայտնի է, էլեկտրաֆիզիկական հատկությունների ձևավորման վրա զգալի ազդեցություն են թողնում այնպիսի գործոններ, ինչպիսիք են ելանյութերի ֆիզիկաքիմիական վիճակը, ելանյութի մանրացման աստիճանը, պատրաստման պայմանները և սկզբունքը: Իսկ թրծման ժամանակ զգալի ազդեցություն են թողնում թրծման ժամանակը, ջերմաստիճանը, տաքացման և հովացման ընթացքում ջերմաստիճանի փոփոխման արագությունը, գազային միջավայրը և այլն:



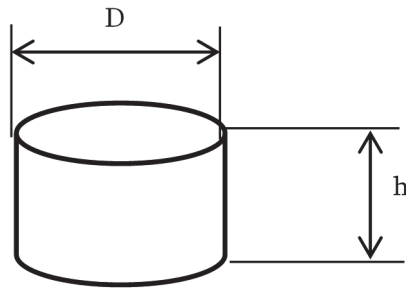
Նկ. 4. $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ փոշենյութի ռենտգենագիրը Fe-ի 12 %-ի դեպքում

ՌՖԱ հետազոտություններից հետո իրականացվել են մանրացման, մամլման և թրծման գործընթացներ: Որպես մանրացման մեթոդ՝ ընտրվել է մոլորակային մեթոդը, մանրացման արագությունը՝ 600 պտ/ր, պարկուճները/պահունակները լցվել են 70%-ով, մանրացնող գնդերի և նյութի հարաբերակցությունը համապատասխանաբար 4/3 է, մանրացնող հեղուկը՝ սպիրտը՝ նյութի 200%-ը: Մանրացումն իրականացվել է մինչև հատիկների 1...8 մկմ չափի ապահովումը (նկ. 5):



Նկ. 5. Մանրացման ժամանակային կորը

Կերամիկական նմուշներ պատրաստելու նպատակով մանրացված փոշենյութին որպես պլաստիկարար ավելացվել է 15...20% պոլիվինիլային սպիրտի 10%-ոց լուծույթ, որից հետո նյութերը մամլվել են զլանաձև՝ 16x5 մմ (Dxh) ձևաչափով (նկ. 6):

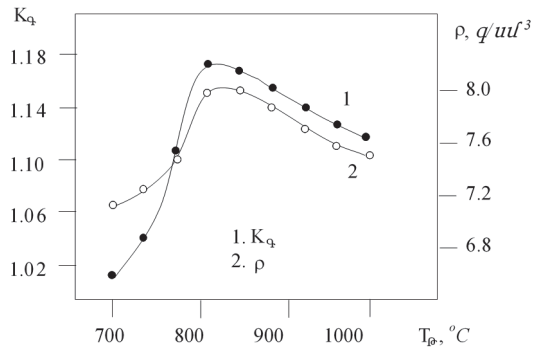


Նկ. 6. Մամլվածքի գլանաձև ձևաչափը

Նախքան թրծելը նմուշները հարկավոր է չորացնել, երբ նմուշից հեռանում են օրգանական նյութերը և ջուրը: Նշենք, որ մեծ ձևաչափով նմուշները բարձր ջերմաստիճանում և օդափոխիչ միջավայրում չի կարելի չորացնել: Նման դեպքերում նմուշի մակերևույթից օրգանական նյութերը և ջուրը հեռանում են ինտենսիվորեն, իսկ խորքերից նմուշի փոքր գազաթափանցելիության հետևանքով օրգանական նյութերը և ջուրը սակավ ինտենսիվությամբ են հեռանում: Այս երևույթի հետևանքով նմուշի խորքը, որտեղ խոնավությունը բարձր է, քիչ են կծկումները, իսկ մակերեսը, որտեղ խոնավությունը քիչ է, կծկումները զգալի են:

Անհավասար կծկումների հետևանքով նմուշի մակերևույթում առաջանում են ճաքեր և շերտավորումներ: Այս երևույթից խուսափելու համար նմուշները հարկավոր է չորացնել դանդաղ, ցածր ջերմաստիճաններում և երբեմն օդի բարձր հարաբերական խոնավության միջավայրում: Այս գործընթացը հարկավոր է ապահովել հատկապես 1-ին և 2-րդ փուլերում, երբ ջրի և օրգանական նյութերի հեռացումն ամենաինտենսիվն է: Մամլվածքի թրծման կինետիկայի հետազոտությունները ցույց են տվել, որ նմուշների լայնական կտրվածքով կծկումներն ավելի մեծ են, քան բարձրության ուղղությամբ: Այս անիզոտրոպիայի պատճառն այն է, որ սեղմումն իրականացվում է մի ուղղությամբ:

Այնուհետև մամլված նմուշները թրծվել են բարձր ջերմաստիճանային վառարանում (նկ.7): Թրծման սկզբնական փուլում գազաթափանցելիությունը որոշակիորեն մեծանում է, որը պայմանավորված է հատիկների միջև գլանաձև խողովակների առաջացմամբ: Այդ փոփոխում ազատ մակերեսը նվազում է:



Նկ. 7. Թրծման կորերը

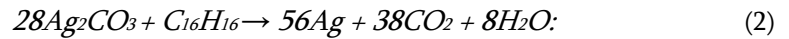
Թրծման հաջորդ փուլում կծկման հետևանքով խողովակների կտրվածքը կտրուկ փոքրանում է, միաժամանակ կտրուկ ընկնում է ազատ մակերևույթը: Նմուշների գազաթափանցելիության վերացումն ուղեկցվում է խոռոչների տարածական ցանցի քայքայումով, և առաջանում են մեկուսացված խոռոչներ: Այդ փուլին հաջորդում է թրծման եզրափակիչ փուլը: Ընդ որում, այս փուլում հարկավոր է ապահովել տաքացման շատ փոքր արագություն, որպեսզի թրծման գործընթացը կայանա միաժամանակ ամբողջ ծավալով, ինչպես նաև ստացվի հատիկների հավասարաչափ աճ: Մամլվածքները թրծվել են էլեկտրական վառարանում 700...850 °C ջերմաստիճանի պայմանում, 2 ժամ տևողությամբ: Հատկությունների ուսումնասիրման նպատակով նմուշի վրա նստեցվել են արծաթե կոնտակտներ: Նկ. 8-ում բերված են կերամիկական նմուշների նկարները:



Նկ. 8. Կերամիկական նմուշներ

Կերամիկական BFO նյութի էլեկտրաֆիզիկական հատկությունների ուսումնասիրման նպատակով թրծումից հետո ստացված նմուշները ենթարկվել են հղկման մինչև հաստության մոտավորապես 1 մմ արժեքը, որից հետո 800...850 °C ջերմաստիճանում նրանց վրա արծաթի մածուկի կիրառմամբ նստեցվել են օհմական կոնտակտներ: Արծաթեպատումն իրականացվել է դասական եղանակով: Արծաթի կարբոնատի (35...40 %) և պլաստիկարարի (65...60 %) խառնուրդը բարակ վրձնի միջոցով նստեցվել է նմուշների մակերեսին, որոնք նախապես մաքրվել և յուղազերծվել

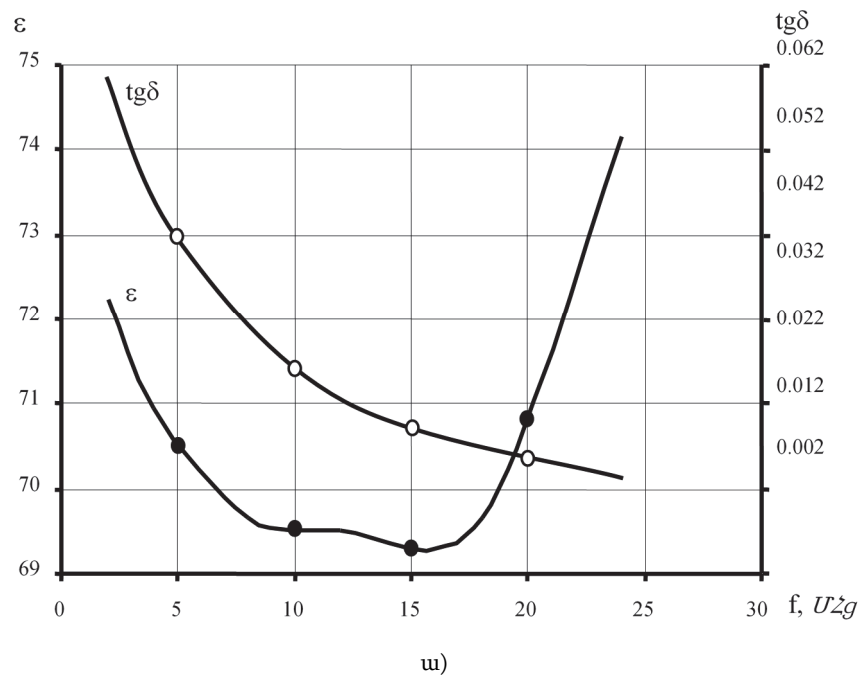
են: Թրծման առաջին փուլում ($200...400^{\circ}C$) այրվում է պլաստիկարարը, իսկ 2-րդ փուլում ($450...850^{\circ}C$) արծաթի կարբոնատը վերականգնվում է՝ վերածվելով մետաղական արծաթի: Արծաթի վերականգնումը կարելի է ներկայացնել հետևյալ քիմիական ռեակցիայով.

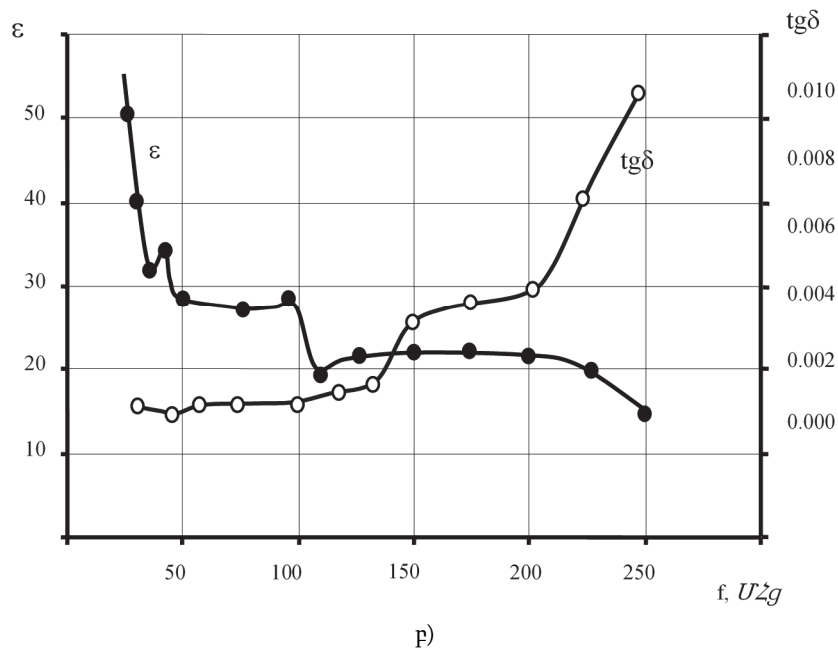


Արծաթե էլեկտրոդների հաստությունը թրծումից հետո կազմել է $30...40$ մկմ:

Կերամիկական նմուշների դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը (ε) և կորուստների անկյան տանգենսը ($tg\delta$) որոշվել են՝ էլնելով ունակության և բարորակության արժեքներից:

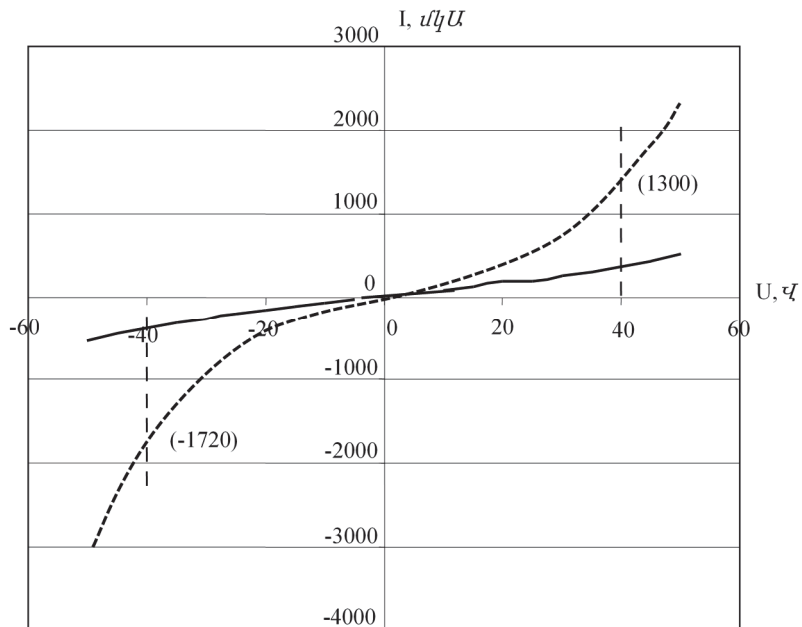
Էլեկտրական հատկությունների նկարագրությունը: Դիէլեկտրիկ թափանցելիության (ε) և կորուստների անկյան տանգենսի ($tg\delta$) չափումները կատարվել են TESLA BM560 սարքավորման միջոցով, ստացված արդյունքները բերված են նկ. 9-ում:





Նկ. 9. BiFeO_3 կերամիկական նմուշի դիէլեկտրիկ թափանցելիության (ϵ) և կորուստների անկյան տանգենսի ($\text{tg}\delta$) կախվածությունը հաճախությունից.
 ω – հաճախությունը մինչև 30 ՄՀց, p – հաճախությունը 25-ից մինչև 250 ՄՀց

Նմուշները տաքացվել են մինչև 200°C և պահվել մոտավորապես մեկ ժամ, այնուհետև կիրառվել է հաստատուն լարում, և նմուշները աստիճանաբար սառեցվել են, որից հետո ստացվել են դրանց ՎԱԲ-երը: Ինչպես երևում է ՎԱԲ-երից, նմուշներին կիրառված լարման բևեռականությունը փոխելիս նմուշները ցուցաբերում են տարբեր դիմադրություններ, ինչը խոսում է p և n տիպի լիցքակիրների տարածական վերաբաշխման մասին: Այսինքն՝ կարելի է ենթադրել, որ այս ճանապարհով հնարավոր է ստանալ կերամիկական p - n անցում: Նմուշների ՎԱԲ-երը 0...50 Վ լարում միջակայքում մինչև տաքացնելը և տաքացնելուց հետո բերված են նկ. 10-ում:



Նկ. 10. ՎԱԲ-երը մինչև ջերմամշակումը (հոծ գիծ), ջերմամշակումից հետո (կետ-գիծ)

Եզրակացություն. Փորձերի արդյունքում պարզվել է, որ ելանյութերի բոցախառնուրդում/համակարգում ԻԲՄ սկզբնավորելու և պահպանելու համար անհրաժեշտ է k -ն վերցնել 0,32 (6% և ավելի երկաթի փոշի): Այդ արժեքից ցածր արժեքների դեպքում ԻԲՄ գործընթացը կամ չի սկզբնավորվում, կամ կարճ ժամանակ հետո այրման գործընթացը մարում է:

k -ի 0,73 արժեքից (14% և ավելի երկաթի փոշի) սկսած՝ այրման ջերմաստիճանը և ճակատի տարածման արագությունը սկսում են կտրուկ աճել՝ բովախառնուրդում ջերմահաղորդականության և վառվող ու հարակից հում շերտերի միջև ջերմային գրադիենտի աճով պայմանավորված:

Սինթեզված արգասիքների ռենտգենաֆազային վերլուծությամբ պարզվել է, որ ելանյութերի և միջանկյալ ֆազերի փոքր քանակությամբ ցանկալի ֆազով նպատակային նյութը սինթեզվում է, երբ բովախառնուրդի մեջ վառելիքի քանակը 9...12% է:

ՎԱԲ-երից երևում է, որ էլեկտրական դաշտում ջերմամշակած նմուշներին կիրառված լարման բևեռականությունը փոխելիս նմուշները ցուցաբերում են տարբեր դիմադրություններ, ինչը խոսում է p և n տիպի լիցքակիրների տարածական վերաբաշխման մասին:

Կերամիկական նմուշի դիէլեկտրիկ թափանցելիության (ε) և կորուստների անկյան տանգենսի ($\operatorname{tg}\delta$) հաճախությունից կախվածության ուսումնասիրությունը

ցույց է տալիս, որ հաճախության մինչև 250 ՄՀց միջակայքում ԻԲՄ-ով սինթեզված այս նյութերը համատեղելի են ինտեգրալ մեծ սխեմաների արտադրության հետ:

Աշխատանքն իրականացվել է ՀՀ ԿԳՄՄՆ բարձրագույն կրթության և գիտության կոմիտեի աջակցությամբ՝ «Միկրո- և նանո-էլեկտրոնիկա» (ՀԱՊՀ) և «Նորագույն նյութերի և միկրոսարքերի» (ՔԵՆԴԼ) բազային գիտահետազոտական լաբորատորիաներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Dielectric phenomena of multiferroic oxides at acoustic- and radio-frequency / **J. Yang, W. Bai, Y. Zhang, C.G. Duan, J. Chu, X. Tang** // J Phys Condens Matter.- 2023, Aug.- 23;35(46). doi: 10.1088/1361-648X/acecf0
2. Magnetoelectric coupling in multiferroics probed by optical second harmonic generation / **S. Xu, J. Wang, P. Chen, K. Jin, C. Ma, S. Wu, & et al** // Nature Communications.- 2023.- Vol. 14, article number: 2274.
3. Electrical, magnetic and microwave absorption properties of multiferroic NiFe_2O_4 - BaTiO_3 nanocomposites / **D.S. Lam, N.N. Tung, D.D. Dung, B.X. Khuyen, & et al** // Materials Research Express.- 2022.-Vol. 9, Nr. 7. DOI 10.1088/2053-1591/ac7fe1
4. Multiferroic properties of BiFeO_3 - BaTiO_3 based ceramics / **T. Futakuchi, T. Kakuda and Y. Sakai** // Journal of the Ceramic Society of Japan.- 2014.- Vol. 122, issue 1426.- P.- 464-468. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.122.464>.
5. Properties of BiFeO_3 – BaTiO_3 ceramics in the morphotropic phase boundary: a role of crystal structure and structural parameters / **D.V. Karpinsky, M.V. Silibin, D.V. Zhaludkevich, S.I. Latushka, & et al** // Magnetic Journal of Magnetism and Magnetic Materials.- 2021.-Vol. 539, article 168409. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168409>.
6. Enhanced dielectric and multiferroic properties in BaTiO_3 doped $\text{Bi}_{0.85}\text{Nd}_{0.15}\text{Fe}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{O}_3$ ceramics / **H. Zhao, R. Yang, Y. Li, G. Liu, & et al** // Journal of Magnetism and Magnetic Materials.- 2020.-Vol. 494, article 165779. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165779>.
7. Ferroelectrically tunable magnetism in $\text{BiFeO}_3/\text{BaTiO}_3$ heterostructure revealed by the first-principles calculations / **W. Wang, W. Sun, G. Zhang, F. Ren, & et al** // Journal of Advanced Research.-2020.-Vol. 24.- P. 371-377. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.04.012>.
8. Enhanced ferroelectric, magnetic and magnetoelectric properties of multiferroic BiFeO_3 - BaTiO_3 - LaFeO_3 ceramics / **M. Zhang, X. Zhang, X. Qi, H. Zhu, & et al** // Ceramics International.-2018.-Vol. 44, issue 17.-P. 21269-21276. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.175>.
9. Ramírez, Control of Multiferroic properties in BiFeO_3 nanoparticles / **D. Carranza-Celis, A. Cardona-Rodríguez, J. Narváez, O. Moscoso-Londono, & et al** // Scientific Reports.-2019.- Vol. 9.-article 3182. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39517-3>.

10. The Multiferroic Properties of $\text{BiFeO}_3\text{--Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ Solid Solution Ceramics / **Z. Xu, L. Luo, M. He, K. Shen, & et al** // IEEE Transactions On Magnetism.- 2015.- Vol. 51, issue 11. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2438954>.
11. Enhanced Electric and Magnetic Properties of the Epitaxial $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{TiO}_3/\text{BiFeO}_3$ Multiferroic Heterostructure / **Y. Chen, J. Miao, X. Zhang, F. Weng, & et al** // IEEE Transactions on Magnetism.- 2012.-Vol. 48, issue 11. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2200459>.
12. Ferroelectric and Magnetic Properties of Multiferroic BiFeO_3 -Based Composite Films / **H. Naganuma, T. Okubo, K. Kamishima, K. Kakizaki, & et al** // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.- 2008.- Vol. 55, issue 5. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.755>.
13. Pure perovskite $\text{BiFeO}_3\text{--BaTiO}_3$ ceramics prepared by reaction flash sintering of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3\text{--BaTiO}_3$ mixed powders / **A. Taibi, S. Chaguetmi, P.-E. Sanchez-Jimenez, A. Perejon, & et al** // Ceramics International.- 2021.- Vol. 47, issue 19.- P. 26947-26954. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.108>.
14. Synthesis and Characterization of $0.7\text{BiFeO}_3\text{--}0.3\text{BaTiO}_3$ Crystallites by the Hydrothermal Method / **T. Tong, J.G. Chen, J. Jian, D.R. Jin and J.R. Cheng** // IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF).- 2014. <https://doi.org/10.1109/ISAF.2014.6923014>.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 04.12.2023:

**Н.В. МАРТИРОСЯН, Д.С. МАРТИРОСЯН, М.А.Х. АРАГИ,
Т.В. ВАНДУНЦ, С.Г. АЙРАПЕТЯН, Р.А. КАЗАРЯН, А.С. ЕРЕМЯН
ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ФЕРРИТА ВИСМУТА,
ЛЕГИРОВАННОГО МАРГАНЦЕМ, И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ**

Разработана технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза феррита висмута, легированного марганцем. Методом рентгенофазового анализа определены наилучшие условия для приготовления смеси исходных компонентов и синтеза. Разработаны технологические процессы получения керамических образцов и подготовки омических контактов. Исследованы частотные зависимости диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь и вольт-амперной характеристики.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, мультиферроик, керамика, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери.

**N.W. MARTIROSYAN, D.S. MARTIROSYAN, M.A.KH. ARAGHI,
T.V. VANDUNTS, S.G. HAYRAPETYAN, R.H. GHAZARYAN,
A.S. YEREMYAN**

**OBTAINING MANGANESE - DOPED BISMUTH FERRITE CERAMIC
SAMPLES AND STUDYING THEIR PROPERTIES**

A self-propagating high-temperature synthesis technology of manganese - doped bismuth ferrite has been developed. The best conditions for the preparation of the initial components mixture and synthesis are determined by X-ray phase analysis. The technological processes of obtaining ceramic samples and preparing ohmic contacts have been developed. Frequency dependence of dielectric permeability and loss angle tangent and volt-ampere characteristics are studied.

Keywords: ferroelectric, multiferroic, ceramics, self-propagating high-temperature synthesis, dielectric permeability, dielectric losses.