



ХҒТАР 29.19.22

Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-150-1-140-161>

Самариймен белсендірілген церий оксиді ұнтақтары мен жұқа үлбірлерінің құрылымдық және морфологиялық қасиеттерін зерттеу

О. Шалқар¹, Б.Е. Жакипбаев², Д.К. Ескермесов³, Б.Ж. Сейтов⁴,
А.К. Тусупбекова⁵, Э.К. Мусенова⁵, У. А. Муратбекова⁶, Ж.К.Алипбекова⁷,
С.А. Пазылбек⁸

¹Вильнюс университеті, Вильнюс, Литва

²Академик Ә.Қуатбеков атындағы Халықтар достығы университеті, Шымкент, Қазақстан

³Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

⁴Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан

⁵Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан

⁶Ө.Жәнібеков атындағы Оңтүстік Қазақстан педагогикалық университеті, Шымкент, Қазақстан

⁷М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

⁸Жұмабек Ахметұлы Тәшенев атындағы Университет, Шымкент, Қазақстан

*Хат алмасуға арналған автор: sapargali.pa@gmail.com

Аңдатпа. Қатты оксидті отын элементтері (SOFC) үшін құрамы 26% самариймен белсендірілген церий оксиді (SDC) ұнтақтары мен жұқа үлбірлерін талдап зерттеу қарастырылады. SDC ұнтақтары мен жұқа үлбірлерін дайындауда глицин-нитраттың жануы (СВ), бірге тұндыру (СР) және сулы золь-гель (SG) әдістері қолданылады және алынған үлгілерді талдау әдістері сипатталған. Алынған барлық ұнтақтар 200-ден 1000°C градусқа дейін қыздырылып, самариймен белсендірілген церийдің кристалдық құрылымы аса жоғары температурада дамидынын көрсетеді. Қыздырылған ұнтақтардың тор параметрі мен кристаллит өлшемі қыздыру температурасының жоғарылауымен үлкейетінін көрсетеді және тор параметрі теориялық мәндерден жоғары болады. Эксперимент нәтижелері жұқа үлбірлердің кристаллиттерінің орташа өлшемі қалыңдығының жоғарылауымен өсетінін айқындады. Қолданылатын синтездің ішінде СВ әдісі бірге тұндыру мен золь-гель әдістерімен салыстырғанда жақсы нәтижелерге ие деп саналады. SiO₂ төсенішіне тұндырылған жұқа үлбірлердің тор параметрінің эксперименттік мәндері теориялық мәннен жоғары болды. Қалыңдығы жоғарылаған сайын SiO₂ төсенішіне тұндырылған жұқа үлбірлердің кристаллитінің орташа өлшемі артады. Атомдық күштік микроскоп нәтижелері жұқа үлбірлердің бетінің кедір-бұдырлығының орташа мәндері қалыңдығының жоғарылауымен өсетіндігін көрсетті. Тиісті бағдарламалық жасақтаманы қолдана отырып беттің орташа кедір-бұдырлығы (Rs), орташа квадраттық кедір-бұдырлығы (Rq), эксцесі (Rku), асимметриясы (Rsk) сипатталды.

Түйін сөздер: золь-гель, бірге тұндыру, глицин-нитраттың жануы, жұқа үлбір, самариймен белсендірілген церий оксиді, қатты оксидті отын элементі

Жіберілді 13.04.2024. Өзгертілді 5.02.2025. Қабылданды 19.02.2025. Онлайн қол жетімді 25.03.2025

¹ * хат-хабар авторы

1. Кіріспе

Отын элементтерінің технологиялары соңғы екі онжылдықта зерттеушілер мен өнеркәсіптің назарын аударды. Отын элементтері көмірқышқыл газының жаһандық шығарындыларының шешімдерінің бірі бола алады. [1] мәліметтері бойынша, көлік секторы көмірқышқыл газының жаһандық шығарындыларында шамамен 23% үлеске ие азот пен күкірт оксидтерін шығарады, бұл халықтың денсаулығына теріс әсер етеді. Дәстүрлі электр энергиясын өндіру және тасымалдау нәтижесінде көмірқышқыл газының шығарындылары климаттың өзгеруінің негізгі себептері болып саналады [2]. Жоғары температуралы отын элементтеріне қосымша процедура қажет емес, өйткені олар жоғары температурада отынның «ішкі бөліктерін түрлендіруді» жүзеге асыра алады [3-10].

Қатты оксидті отын элементтері (ҚООЭ) (SOFC) – химиялық энергияны электр энергиясы мен жылуға айналдыратын отын элементтерінің бір түрі. ҚООЭ басқа отын элементтері арасында ең жоғары жұмыс температурасына ие болып саналады. Температураның 600°C-1000°C аралығы бірнеше отын түрінің алдын-ала өңдеусіз қолдануға мүмкіндік береді. Осындай жоғары температурамен жұмыс істеу үшін электролит жұқа керамикалық негіздегі қатты металл оксиді, көбінесе оттегі иондарының өткізгіші болып табылатын иттрий мен цирконий қорытпасы пайдаланылады [11,12]. Олардың артықшылықтары ретінде ультра таза, нөлдік шығарындыларға жақын, жоғары сапалы, сенімді қуат, жоғары отын тиімділігі болса, ал кемшіліктері жоғары жұмыс температурасы ұзағырақ іске қосу уақытына және механикалық пен химиялық үйлесімділік мәселелеріне әкеледі. Құрамдас бөліктер ретінде пайдаланылатын материалдар термиялық сынақтан өтеді және технологиясы жетілмеген, күкіртке орташа төзбеушілігі мен салыстырмалы түрде қымбат болып табылады [13-15].

ҚООЭ электролитінде келесі критерийлер: жоғары иондық өткізгіштік пен төмен электронды өткізгіштікке ие, химиялық тұрақты болу және жақсы механикалық қасиеттерге ие, басқа компоненттермен химиялық және механикалық үйлесімділік, иондық кедергіні азайту үшін жұқа болуы керек. Электролит екі жағынан кеуекті электрод материалымен қапталған кристалдық торды құрайды. Құрылымдық жағынан мұндай элементтер түтіктер немесе жалпақ тақталар түрінде жасалады, бұл оларды өндіруде электронды өнеркәсіпте кеңінен қолданылатын технологияларды қолдануға мүмкіндік береді. Нәтижесінде қатты оксидті отын элементтері өте жоғары температурада жұмыс істей алады, сондықтан олар электр және жылу энергиясын өндіру үшін тиімді [10,16,17].

Қатты оксидті отын элементтері 800°C-тан 1000°C-қа дейінгі жоғары температурада жұмыс істей алатын электролит ретінде иттриймен тұрақтандырылған циркониймен (ИТЦ) (YSZ) жұмыс істейді. Бұл температуралар электролитте жеткілікті иондық өткізгіштікке ие болу үшін қажет. Осыған қарамастан, оның өндіріс құнына, коммерцияландыруға және т.б. байланысты электролит ретінде пайдаланудың кейбір кемшіліктері бар [18]. Егер керамикалық негіздегі отын элементтерін 6500C-тан аз жұмыс істеуге болатын болса, онда ұяшықтың құрылысында әлдеқайда арзан материалдарды қолдануға болады. Жұмыс температурасын азайту, қызмет ету мерзімін ұзарту мен құрамдас материалдардың таңдауын кеңейтуге мүмкіндік береді [18-20]. Зерттеулерде

церий негізіндегі электролиттік материалдарды қолдану арқылы жұмыс температурасы төмендетілді, мысалы, самариймен белсендірілген церий (SDC), гадолиниймен белсендірілген церий (GDC). Олар 4000С-тан 8000С-қа дейінгі жұмыс температурасында ең жақсы ион өткізгіштігін қамтамасыз ете алады [19]. Самариймен белсендірілген церийдің жұқа қабықшаларын электролит материалы ретінде самарийдің әртүрлі құрамымен талданып зерттелген [11,12, 21-28].

2. Әдіснама

Зерттеу нысаны ретінде құрамында самарий мөлшері $x=0,26$ болатын $\text{Sm}_{0.26}\text{Ce}_{0.74}\text{O}_{1.95}$ (26SDC) самариймен белсендірілген церий ұнтағы үш түрлі синтез арқылы: глицин-нитраттың жануы (CB), бірге тұндыру (CP) және сулы золь-гель (SG) дайындалды.

Жану синтезі арқылы SDC керамикалық ұнтақтарын алу үшін катиондар ретінде церий мен самарий нитратының гексагидраттары, ал отын ретінде глицин нитраты (барлық пайдаланылған қосылыстар Sigma Aldrich сатып алынды) пайдаланылды. Аталған барлық материалдар дистилденген суда бөлек ерітілген. Церий нитраты гексагидраты бар ерітінді қыздырылып, шамамен 15 минут араластырылды. Самарий нитратының гексагидраты мен глицині бар ерітінділер бірінші колбаға 15 минуттан кейін қосылып ерітінді қыздырылып 15 минуттай араластырылды. Ерітіндінің гельге айналуы шамамен 200°C температурада байқалды. Бұл гелдің 270°C температурада жарылуы нәтижесінде пайда болатын соңғы өнім ретінде ұнтақтар алынды [29-31].

Бірге тұндыру синтезі процесінде бастапқы прекурсорлар ретінде қымыздық қышқылы ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \geq 99.0\%$) мен аммоний гидроксиді (NH_4OH , 25%) таңдалды, ал церий ($(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99%) және самарий ($(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99.9%) нитрат гексагидраттары (Sigma Aldrich) металл прекурсорлары ретінде таңдалды. Нитраттарды бірнеше мл суда тезірек және оңай ерітуге болады, керісінше қымыздық қышқылының прекурсорларын сұйылту қиын болуы мүмкін және нитраттармен салыстырғанда әлдеқайда көп су қажет етеді. Қышқыл ерітіндісінің рН қатынасы еріген ерітіндіге аммиак гидроксидін қосу арқылы реттелді және ол 8-9 аралығында болуы керек. рН-ты қажетті рационға келтіргеннен кейін ерітіндіге нитрат ерітінділері тамшылатып қосылады. Шұңғыма тәріздес жүйені қолдану арқылы ерітінді вакуумдық машинамен сүзіліп, соңғы өнім ретінде тұнба алынады және пеште кептіріледі [24, 32, 33].

Золь-гель синтезі кезінде самарий оксиді (Sm_2O_3 , AlfaAesar), аммоний церий нитраты ($(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_4$), шарап қышқылы ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$) (Sigma Aldrich) және азот қышқылы (HNO_3 , Reachim) қолданылды. Процесс кезінде аммоний церий нитраты температурасы 80°C суда ерітіліп, ерітіндіге шарап қышқылын қосылды. рН қатынасын самарий оксиді мен азот қышқылын қосу арқылы бақыланды. Бүкіл процесс барысында үнемі қыздырыла араластырып отырды. Ерітінді 100°C температурада әртүрлі түсті гельге айналды және осыдан кейін барлық синтезделген ұнтақтар диаметрі 13 мм түйіршіктерге механикалық престеу арқылы басылып, ауада 1000°C температурада 5 сағат бойы күйдірілді [34- 37].

Электролиттің жұқа үлбірлерін алу үшін бу фазасының электронды-сәулелі физикалық тұндыру (EB – PVD) әдісі қолданылады. Төсеніш ретінде SiO_2 материалы алынып, жұқа

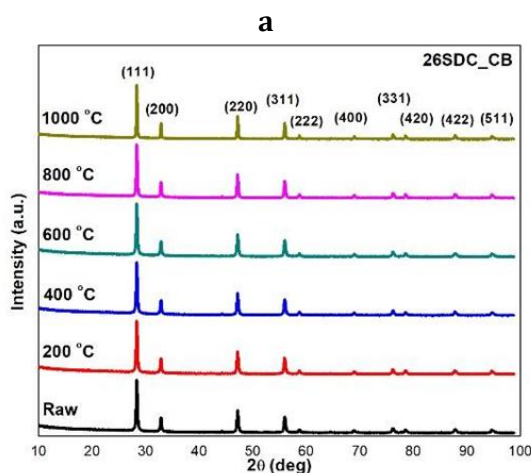
үлбірді алу үшін төсеніш шаң мен ластаушы заттардан және басқа бөлшектерден тазартылады. Олар жабынның өнімділігі мен сенімділігіне әсер ететіндіктен, тазалау үлбірлердің сапасын жақсартуға көмектеседі. Біріншіден, төсеніштер а.ү.таза N,N-Диметилформаидқа (DMF) (C_3H_7NO , Firma Chempur) батырылады және 15 минут қайнатылды. Содан кейін процедура ацетонмен (C_3H_6O , Reachem Slovakia) 5 минут бойы қайталанды және азот (N_2) газының көмегімен кептірілді. Тазалау ерітінділерінен төсенішті алу кезінде аса мұқият болған жөн, өйткені бетінде ерітіндідегі дақтар қалуы мүмкін. Булану үшін бастапқы материал ретінде синтезделген түйіршіктер пайдаланылады. Бастапқы материал вакуумдық камераға салынып, қыздырылды. Қыздыру вакуумдық камераға орнатылған инфрақызыл шаммен жүргізілді. Жұқа үлбірлердің қалыңдығы кварц резонаторымен басқарылады.

"D8 Discover" рентгендік дифрактометрі (Bruker AXS, Германия) XRD мәліметтерін талдау үшін пайдаланылды. Үлгілер үздіксіз PSD жылдам сканерлеу түрімен сканерленді, бұл сканердің 0,02999 қадаммен 20°C-тан 100°C-қа ауысуына мүмкіндік берді. XRD өлшеулері генератордың 40 кВ кернеуімен және 40 мА токпен жүргізілді. Өлшеу деректерін өңдеу және түсіндіру үшін *EVA Search-Match* дерекқоры пайдаланылды [38-40].

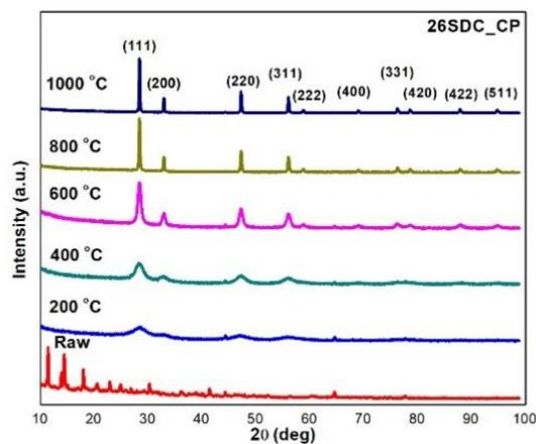
Түзілген жұқа үлбірлерге талдау жасау үшін NT-206 атомды-күштік микроскопы қолданылды. Тиісті бағдарламалық жасақтаманы қолдана отырып беттің қасиеттерін: орташа кедір-бұдырлығын (R_a), орташа квадраттық кедір-бұдырлығын (R_q), сызықтың куртозын (R_{ku}), сызықтың қисаюын (R_{sk}) сипаттауға болады. Біздің жағдайда *Surface Explorer* бағдарламалық жасақтамасы кескіндерді түзету үшін пайдаланылды [11,41,42].

3. Нәтижелер және талқылау

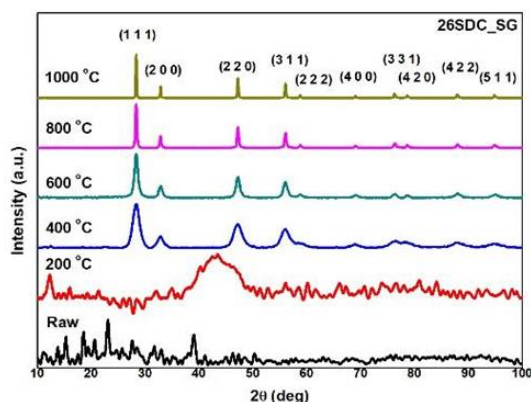
СВ химиялық синтезінің XRD нәтижелері басқа химиялық синтезімен салыстырғанда күтілгеннен де тамаша болды. Өйткені төменгі температураның өзінде бастапқы органикалық қосылыстардың жойылып, таза фаза байқалады. Жалғыз кубтық құрылым төмен температура кезінде түзіле бастайды. Процедура барысында қыздырудың әсерінен нитраттар мен қышқылдар түгелдей дерлік буланып кетеді. 1а- суреттен байқағанымыздай барлық шыңдар (111), (200), (220), (311), (400), (331), (422) және (511) кристаллографиялық бағдарларға сәйкес есептелген.



б



в



1-сурет. СВ (а), СР (б) және SG (в) химиялық синтездермен алынып әртүрлі температурада қыздырылған 26 SDC ұнтағының XRD мәліметтері

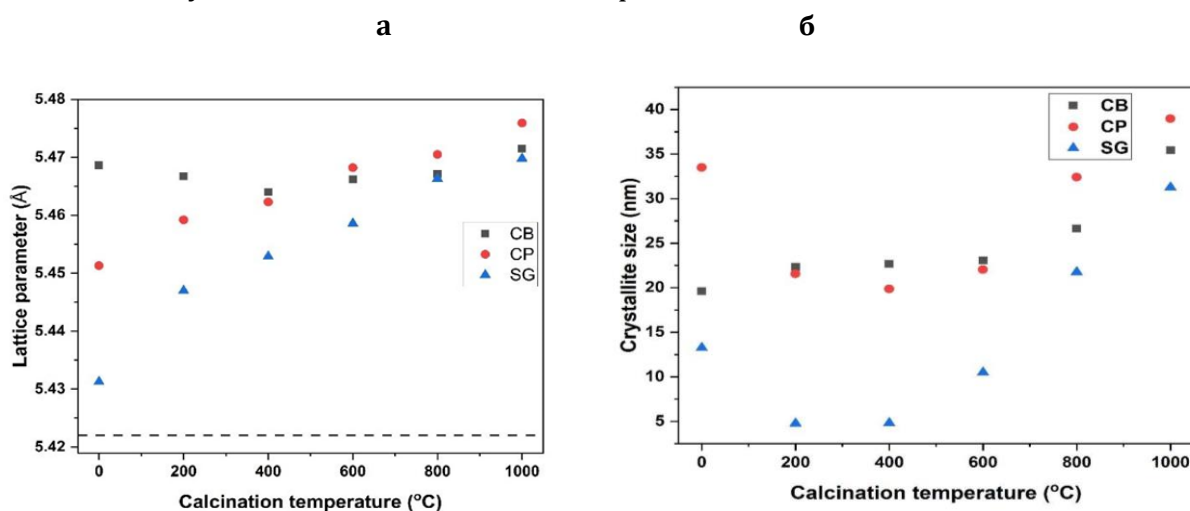
СР химиялық әдісімен дайындалған және әр түрлі температурада қыздырылған ұнтақтардың рентгенограммасы 1б-суретте келтірілген. Қымыздық қышқылы шикізатта әлі де бар және оны әлі де 200°C және 400°C температурада көруге болады. Сонымен қатар, кристалдық құрылым аралық (600 және 800°C) температурада қалыптаса бастайды. Шикізаттың XRD талдауынан шыңдардың сол жаққа қарай жылжитынын және оларды ажырату мүмкін еместігін анық байқауға болады. Мұны қымыздық қышқылының болуымен байланыстыруға болады. СР-де процесс кезінде қыздыру болмайды, сондықтан ол әлі де төмен температурада болады. Сонымен қатар, химиялық процесс кезінде нитраттар мен қышқылдарды сүзу және араластыру жүргізілсе де, қолданылатын материалдардың бастапқы қасиеттері бірдей сақталуы мүмкін.

SG химиялық жолымен синтезделген және әртүрлі температурада қыздырылған SDC-дің XRD нәтижелері 1в-суретте бейнеленген. Көріп отырғанымыздай СР синтезіне ұқсас,

қыздырылмаған кезде шыңдар ажыратылмайды және сол жаққа ығысады. Сол сияқты, шикізаттың XRD деректеріне сәйкес 200°C температурада шыңдар 10-нан 100 градусқа дейінгі барлық диапазонда болады. Алайда, бұл шыңдарды ажырату мүмкін емес. 400°C-тан бастап кристалдық құрылым түзіле бастайды. Дегенмен тек 800°C температурада оның толық кристалдық құрылымы бар деп санауға болады.

Синтездерде органикалық қосылыстардың қолданылуына байланысты инфрақызыл спектрлерде карбонат пен бикарбонат іздері байқалады. Бұл қалдықтардың CP және SG синтезі арқылы алынған үлгілер 200 °C температурада күйдірілген үлгілерде құрамында карбонил бар функционалды топтарының болуымен байланысты [43]. Барлық үш спектрде O-H [44] байланысына жататын жолақтар 1000°C соңғы қыздырудан кейін іс жүзінде жоқ, бұл барлық судың физикалық түрде десорбцияланғанын көрсетеді.

26 SDC ұнтағының қыздыру температурасынан тор (a_0) параметрі тәуелділігі және тор параметрінің теориялық мәні үзік сызықпен 2а-суретте көрсетілген. Графиктен көріп отырғанымыздай тордың тұрақтысы қыздыру температурасының жоғарылауымен өсті. Алайда, CB ұнтақтарының тор параметрі 400°C температурада 5,465Å дейін төмендеді және қалған екеуіне сәйкес 5,47Å дейін өсе берді.



2-сурет. Әртүрлі синтездер арқылы алынған 26 SDC ұнтақтарының қыздыру температурасынан тор параметрі (а) мен кристаллит өлшемінің (б) тәуелділігі

Ұнтақтардың қыздыру температурасынан кристаллит өлшемдерінің тәуелділік графигі 2б суретте келтірілген. Жалпы алғанда, үш химиялық жолмен жасалған барлық ұнтақтардың кристаллитінің орташа мөлшері ұқсас үрдіске ие. SG ұнтақтары кристаллитінің орташа өлшемі қыздырылмаған кезде шамамен 13,5 нм болып, осыдан кейін кристаллитінің өлшемі 5 нм-ге дейін төмендеп, температурасы 400°C кезінде тұрақты болып қалды. Температура 600°C кезінде секіріс болды және сол сияқты өсу диапазоны берілген температураның қалған бөлігінде өзгерген жоқ. Ол әрбір 200°C сайын 10 нм-ге өсіп отырды. CB ұнтақтарының орташа кристаллит өлшеміне келетін болсақ, көрсеткіш шамамен 19,7 нм болды. Одан кейін 22 нм-ге дейін көтеріліп, 600°C

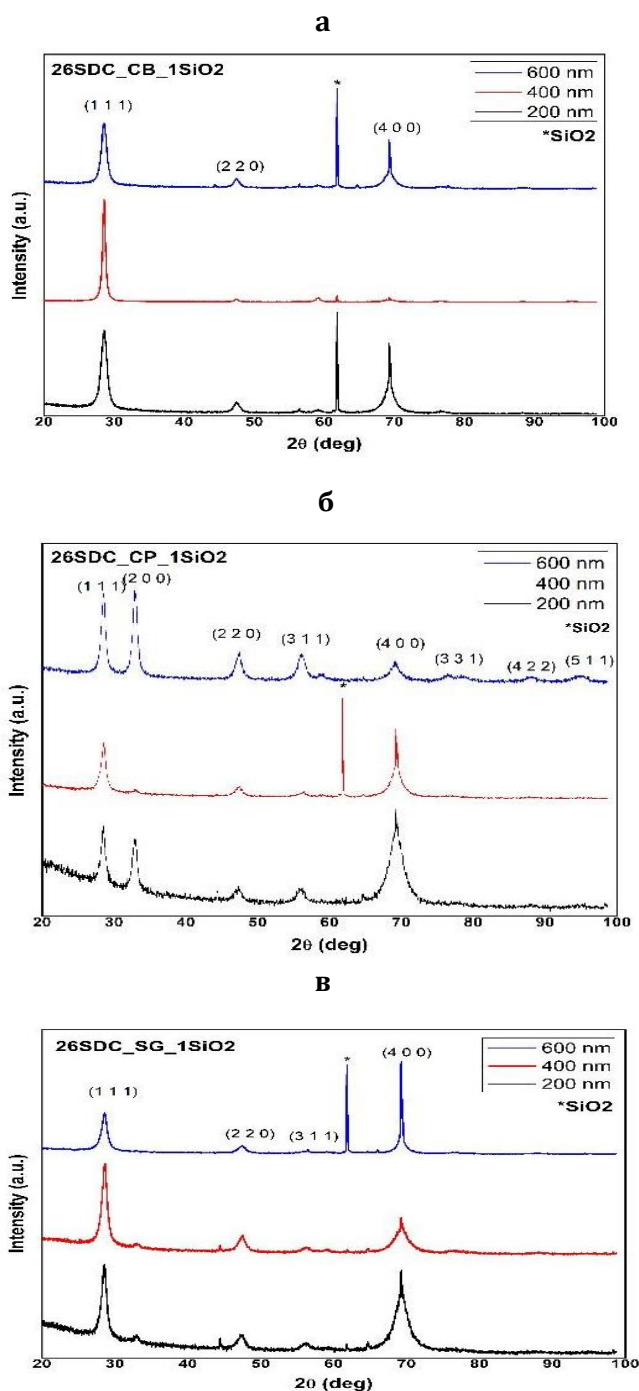
-қа дейін теңестіріліп, осы температурадан бастап СВ үшін мәндер өсе береді және ең жоғары мән шамамен 35 нм жетті. Берілген температура бойынша басқа екі химиялық процестермен салыстырғанда шамалы айырмашылық бар және бұл айырмашылық деректердің ешқандай төмендеусіз өсе беретіндігі болып табылады. СР бойынша дайындалған ұнтақтардың кристаллитінің орташа өлшемі SG синтездеген ұнтақтарға ұқсас болды, мәндер 200°C дейін төмендей бастады және осы сәттен бастап олар соңғы температураға дейін өсті. Кристаллиттің бастапқы өлшемі 33 нм-ден басталып, шикізат ретінде SP ұнтақтарының орташа кристаллит өлшемі SG-дан шамамен 20 нм үлкен болды. Сонымен қатар, СР әдісі бойынша ұнтақтардың кристаллитінің орташа өлшемі басқа әдістердің ішінде ең жоғары болды және бұл үрдісті соңғы температурада қайталады.

Кристаллиттің өсуіне температура мен оның салқындату жылдамдығы айтарлықтай ықпал жасайды. Сонымен қатар кристаллиттің өсу үрдісіне ұшқыш қосылыстардың ыдырауы қатты әсер етеді. Ал экзотермиялық әсер кристалдану процесін баяулатып қана қоймай, сонымен қатар түзілген кристаллиттерді де бұзады. Температураның 200-400 °C диапазонында ұшпа қосылыстардың бастапқы экзотермиялық ыдырауынан кейін қыздыру температурасының одан әрі жоғарылауы зерттелетін барлық диапазондағы кристаллиттердің қалыпты өсуін анықтайды және 600° C-тан кейін барлық үш жағдайда кристаллит өсу мәндерінің бірдей дерлік өсуі байқалады.

Үш түрлі синтез арқылы дайындалған қалыңдығы 200 нм, 400 нм және 600 нм болатын самариймен белсендірілген церий оксиді үлбірінің (111), (200) және (220), (400) шағылыстары 3-суретте көрсетілген. Шыңдардың орналасуы кеңістіктік Fm-3m тобының флюорит құрылымына сәйкес келеді. 26 SDC ұнтақтарын буландыру арқылы тұндырылған кристалды құрылым бастапқы $\text{Sm}_{0.26}\text{Ce}_{0.74}\text{O}_{1.95}$ (26SDC) ұнтақтың құрылымын қайталайды. Айта кету керек, глицин-нитраттың жану синтезі арқылы дайындалған үлгісінен XRD-нің тек екі көрінетін шың бар және олардың ең биік шыңы (111) кристаллографиялық бағдарға ие. 26 SDC үшін қолайлы бағдар басқа синтез әдістері үшін де дәл осылай расталады. Сонымен қатар біз шыңдардың қалыңдығының өсуімен жоғала бастайтынын көреміз. Алайда, SDC жұқа үлбірлері үшін барлық шыңдардың болуы қажет емес.

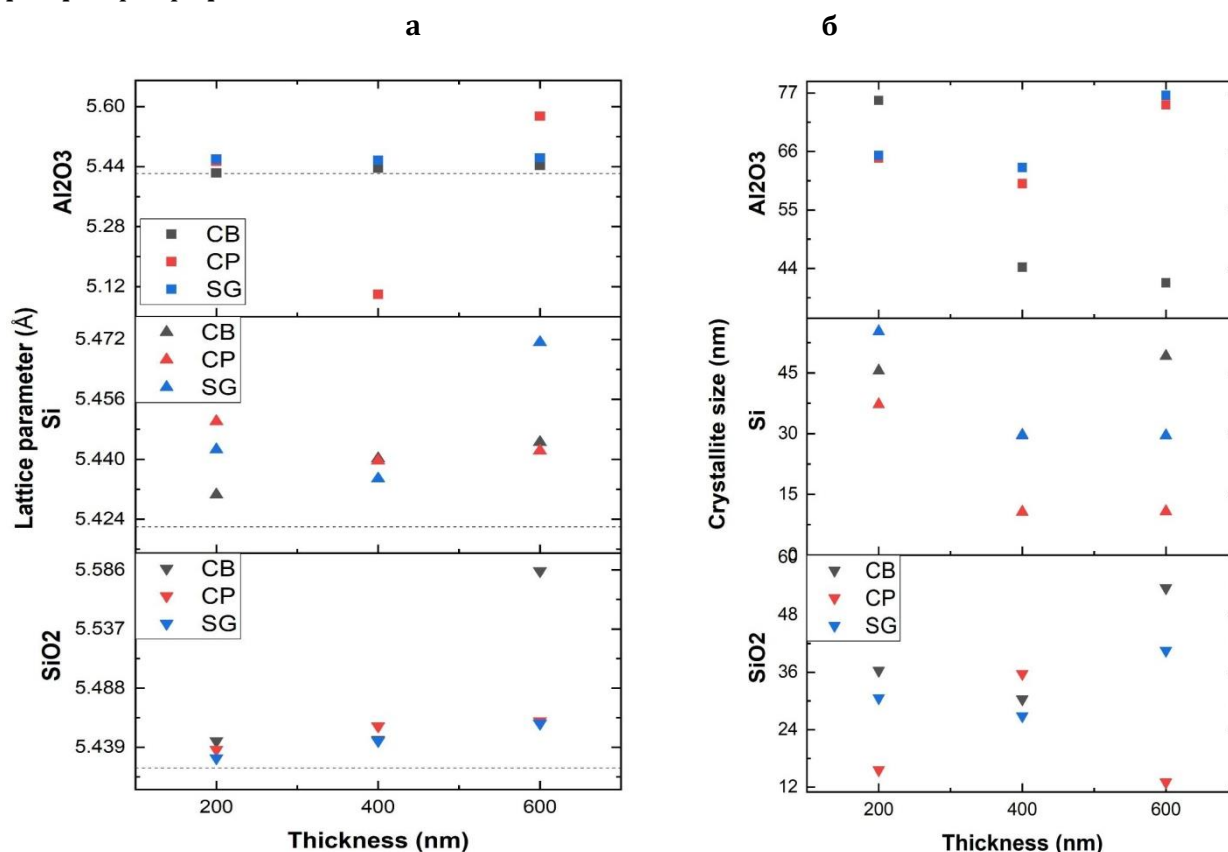
Жану синтезі арқылы тұндырылған жұқа үлбірлердің (111), (220) және (400) кристаллографиялық бағдарларына сәйкес келетін 3 шыңы (3а- сурет). Бірге тұндыру синтезі нәтижесінде пайда болған SDC жұқа үлбірлерінің кристаллографиялық бағдарларына сәйкес келетін 8 шың бар: (111), (200), (220), (311), (400), (331), (422) және (511) (3б- сурет). Ал золь-гель синтезі арқылы тұндырылған SDC жұқа үлбірлеріне сәйкес келетін СВ синтез әдісімен салыстырғанда тағы бір шыңға ие болып (111), (222), (311) және (400) бағдарларын көрсетеді (3в- сурет). Барлық графиктердің ұқсас тенденциясы қалыңдығының өсуіне қарай шыңдардың нақтылануы болып саналады. Үш түрлі әдістерде пайда болған қосымша дифракция шыңдары қымыздық қышқылдардың қалдықтары болуы мүмкін [45], өйткені байқалған дифракция шыңдары Хан және басқалары ұсынған таза қымыздық қышқылына ұқсас. SG мен СР синтезі арқылы синтезделген 200 нм қалыңдықта аморфқа жақын фаза байқалды. Печини әдісімен алынған GDC (гадолиний қоспасы бар церий) ұнтақтарына ұқсастығын көрсетеді [46]. СР әдісімен алынған үлбірдің бетінде дифракциялық шағылу көлемі мен кристалдық

дәндердің өлшемінің артуына сәйкес қалыңдыққа байланысты (220) және (311) шыңдарының қарқындылығы күшейеді. Қалыңдығы 400 нм болатын СВ үлбірдің (400) шыңы мен CP үлбірінің (200) шың қарқындылықтарының өте төмен болуы кристалдану дәрежесі аз болған кезде байқалады.



3-сурет. Глицин-нитраттардың жануы (а), бірге тұндыру (б) және золь-гель (в) синтездері арқылы дайындалған SiO₂ төсенішіне тұндырылған 26 SDC жұқа үлбірдің XRD деректері

SiO_2 , Al_2O_3 және Si төсеніштеріне тұндырылған үш түрлі синтез арқылы дайындалған жұқа үлбірлердің қалыңдығынан тор параметрінің тәуелділігі және тор параметрінің теориялық мәні 4а-суретте көрсетілген. SiO_2 төсеніштен бастап, қалыңдығы 200 нм болатын барлық жұқа үлбірлердің мәні бірдей болып, бірақ кейінірек айырмашылық өзгере бастады. 600 нм тор параметрі СВ-ден дайындалған жұқа үлбірлер үшін соңғы қалыңдығында ($5,586\text{\AA}$) ең жоғары мәнге ие болды. Сонымен, тор параметрінің эксперименттік мәндерінің теориялық мәннен шамалы айырмашылығы болды. Si қатысты жасалған жұқа үлбірлер торының параметрлері, бастапқы қалыңдығында барлық жұқа үлбірлердің тор параметрлерінің мәндері теориялық мәннен жоғары болды (СВ жұқа үлбірі үшін $5,43\text{\AA}$, СР жұқа үлбірі үшін $5,45\text{\AA}$ және SG жұқа үлбірі $5,4426\text{\AA}$). Осыдан кейін СВ және СР жұқа үлбірлерінің мәндері басқа қалыңдықта жақынырақ болды. Алайда, SG жұқа үлбірлі тор параметрінің мәні 600 нм-де $5,472\text{\AA}$ дейін өсті. Графиктен байқағанымыздай, ең жақсы нәтижелерде Al_2O_3 төсенішке тұндырылған жұқа үлбірлі тор параметрлері болды. Теориялық және эксперименттік мәндер кейбір ерекшеліктерді қоспағанда, өте жақын болғаны анық көрсетілген. Бұл ерекшелік СР жұқа үлбірлері үшін 400 нм-де $5,12\text{\AA}$ және $5,57\text{\AA}$ болды.



4-сурет. SiO_2 , Al_2O_3 және Si төсеніштеріне тұндырылған үш түрлі синтез арқылы дайындалған жұқа үлбірлердің қалыңдығынан тор параметрі (а) мен кристаллит өлшемінің (б) тәуелділігі

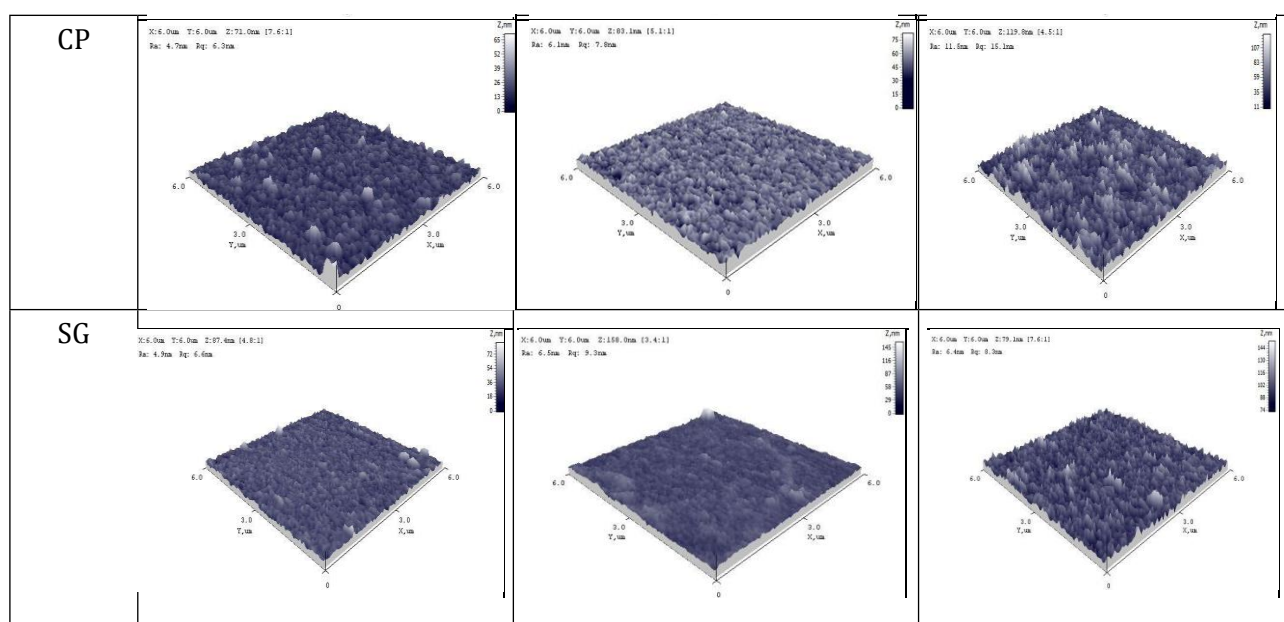
SiO_2 , Al_2O_3 және Si төсеніштеріне тұндырылған үш түрлі синтез арқылы дайындалған жұқа үлбірлердің қалыңдығынан кристаллиттердің орташа өлшемінің тәуелділігі 4б-суретте келтірілген. SiO_2 төсенішіне келетін болсақ, CP химиялық синтезін қоспағанда, әрбір химиялық синтезде кристаллит өлшемі өсе бастайды. CP жұқа үлбір кезінде 36 нм-ге дейін өсіп және бастапқы мәннен төмен түсті (12 нм-ден жоғары). CB және SG жұқа үлбірлердің кристаллитінің орташа мөлшері сәйкесінше 36 нм және 30 нм-ден басталып екі синтездің де өсуімен аяқталды (53 нм және 40 нм).

Графиктің ортаңғы бөлігінен көрініп тұрғандай Si төсенішінде CB (600 нм-де 49 нм-ге дейін өсті) қоспағанда, барлық химиялық синтездер үшін кристаллит өлшемінің орташа мәні төмендеді. Бастапқы қалыңдығындағы әрбір синтездің мәні бір-бірінен шамамен 10 нм (CB үшін 55 нм, CP үшін 45 нм және SG үшін 36 нм) бірдей айырмашылыққа ие болды. Бір таңқаларлығы қалыңдығы 400 нм CB және CP 29 нм-де бірдей мәнге ие болды. SiO_2 төсенішіне тұндырылған CB жұқа үлбірлердің 600 нм қалыңдықта тор параметрі мен кристаллит өлшемінің жоғары болуы кристалданудың дәрежесін көрсетеді.

Иондық өткізгіштік жұқа үлбірлердің өлшемі мен геометрия сияқты микроқұрылымдық қасиеттерге, сонымен қатар синтезделген үлгінің тұрақтылығы мен біртектілігіне байланысты [42]. Вурси және т.б. [45] SDC әртүрлі концентрациясын (15, 20, 25 моль%) электроспининг әдісімен синтездеді және кеуектіліктің жоғарылауы мен төмен сіңіргіштігінің арқасында дән шекарасының кедергісі жоғарылағанын анықтады. SiO_2 төсенішінде үш түрлі химиялық әдіспен (CB, CP және SG) алынған қалыңдығы 200 нм, 400 нм және 600 нм жұқа үлбірлердің атомдық-күштік микроскоп АКМ-3D кескіндері 1-кестеде келтірілген. Көріп отырғанымыздай CB жұқа үлбірлердің барлығының беттері тікенді, бірақ әртүрлі *Zmean* мәндері бар: қалыңдығы 200 нм үшін 75 нм, қалыңдығы 400 нм үшін 230 нм және қалыңдығы 600 нм үшін 110 нм болады. Сонымен қатар, кез-келген қалыңдықтағы жұқа үлбірлердің беттерінде бірнеше ең биік шыңдары болмайды. Беттік морфологияның 600 нм қалыңдықта жақсырақ екенін топологиялық тегістіктен байқауға болады.

1-Кесте. SiO_2 төсенішіне тұндырылған жұқа үлбірлердің АКМ 3D кескіндері

Синтез-дер	Қалыңдығы		
	200 nm	400 nm	600 nm
CB			

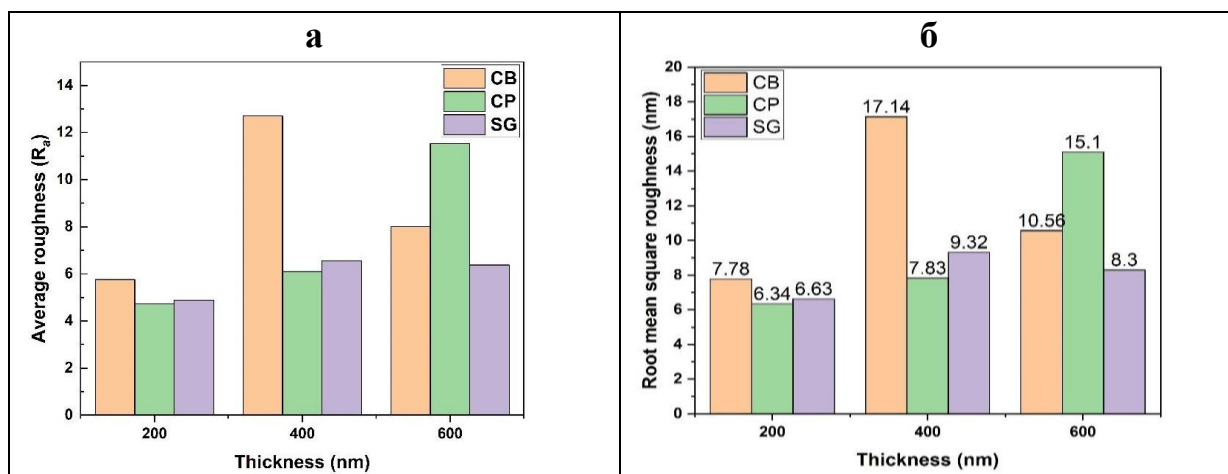


CP химиялық синтез бойынша алынған жұқа үлбірлерге келетін болсақ, қалыңдығы 200 нм болатын жұқа үлбір бетінің орташа биіктігі шамамен 70 нм және диаметрі 384 нм болатын бірнеше шыңдары болады. Қалыңдығы 400 нм болатын жұқа үлбірден кейін бетінің морфологиясы әртүрлі болады. Бұл бетінде тесіктердің болуына байланысты және орташа биіктігі шамамен 80 нм құрайды. Соңында, қалыңдығы 600 нм жұқа үлбірдің орташа биіктігі шамамен 115 нм және диаметрі шамамен 165 нм болатын аса бедерлі шыңдары болады. Бұл шыңдар биік, бірақ диаметрі кішірек болып келеді.

SG химиялық синтез арқылы алынған жұқа үлбір қалыңдығы 200 нм болатын бетінде орташа биіктігі 80 нм және диаметрі шамамен 176 нм болатын алты-жеті дөңес ғана бар. Алайда, бетінің қалған бөлігі біртекті түрде қалыптасады. Қалыңдығы 400 нм жұқа үлбірді орташа биіктігі 150 нм және диаметрі 200 нм болатын кластер құрайды. 600 нм жұқа үлбірі беті тікенді төбелермен пайда болды, бірақ таңқаларлықтай оның орташа биіктігі 400 нм жұқа үлбірмен бірдей болды.

SiO_2 төсенішке тұндырылған 26SDC үлбір қалыңдығынан жұқа үлбірлерінің (Rs) орташа кедір-бұдырлығының байланысы 5а-суретте көрсетілген. CP синтезі арқылы жасалған жұқа үлбірлердің орташа кедір-бұдырлығы қалыңдықтың артуымен өсетіні анық көрінеді. Сол сияқты SG синтезделген жұқа үлбірлерде бірдей үрдіс орын алды, бірақ мән 600 нм қалыңдықта теңестірілді. Дегенмен SG синтезі үшін 600 нм-де жұқа үлбір жоғары көтерілудің орнына төмендеді.

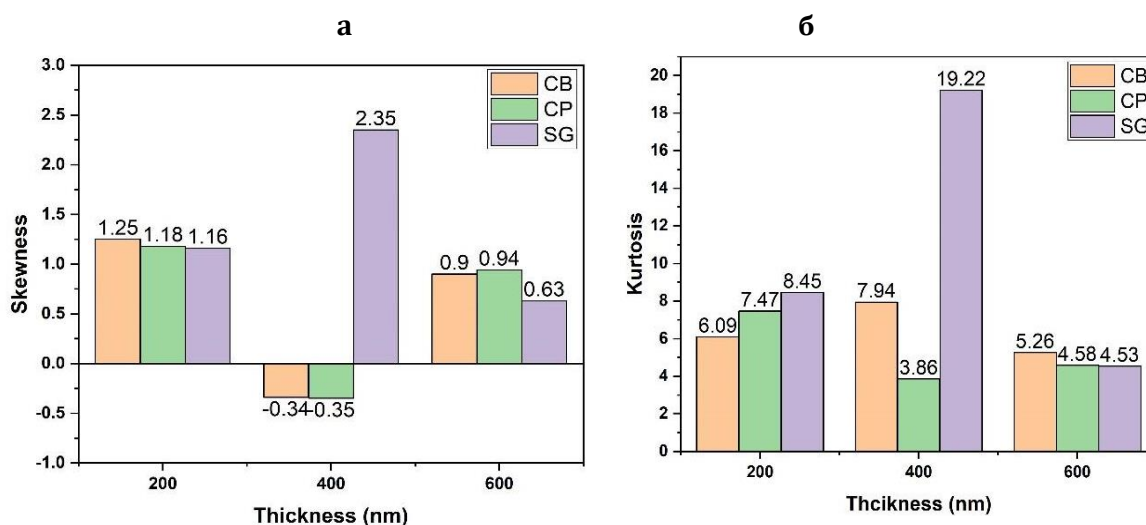
Үлбірдің орташа квадраттық кедір-бұдырлықтың (Rq) қалыңдыққа тәуелділігі 5б-суретте бейнеленген. Суреттен орташа квадраттық (Rq) мәндерінің орташа кедір-бұдырлыққа (Rs) сәйкес келетінін, бірақ аздап айырмашылығы бар екенін байқауға болады. Мәселен 400 нм-де СВ жұқа қабықшасы үшін ең жоғары мән 17,14 нм болса, ал осындай жұқа үлбір үшін орташа кедір-бұдырлық шамамен 13 нм мәнге ие болады. Беттік морфологияның 600 нм қалыңдықта жақсырақ екенін топологиялық тегістіктен байқауға болады.



5-сурет. SiO₂ төсенішіндегі жұқа үлбір қалыңдығынан (R_s) орташа кедір-бұдырлық (а) пен (R_q) орташа квадраттық кедір-бұдырлықтың (б) тәуелділігі

Асимметрия қалыңдықтың функциясы ретінде ба-суретте келтірілген. Асимметрия биіктіктің таралуының орташа жазықтықтан жоғары немесе төмен ығысуын көрсетеді. Бұл оң және теріс мәндер болуы мүмкін. SiO₂ төсенішінде тұндырылған жұқа үлбірлердің ассиметриясының оң және теріс екені анық көрінеді. 200 нм және 600 нм қалыңдықта барлық химиялық синтездер бойынша таралу оңға бұрмаланған. Дегенмен, СВ және СР үшін 400 нм теріс ассиметрия бар. Бұл жұқа қабықшалардың беті негізінен аңғарлардан тұратынын көрсетеді. Ең жоғары ассиметрия мәні SG жұқа үлбіріне тиісті болып, мәні 2,35 тең болады. СВ жұқа үлбір үшін басқа қалыңдықпен салыстырғанда 600 нм қалыңдықта ассиметриясы орташа мәнді көрсетіп оның тегістігін көрсетеді.

Жұқа үлбір қалыңдығынан беттің эксцессіне байланысты тәуелділігі бб-суретте көрсетілген. Эксцесс пен ассиметрия параметрлері беттік топология ретінде қарастырылады. Эксцесс беттің «айқындық» немесе «өткірлігін» көрсетеді. Эксцесс мәні 3-тен жоғары болса, ол өткір бет болып саналады. Суреттен көріп отырғандай барлық жұқа үлбірлердің мәндері олардың бетінің жеткілікті өткір екенін көрсетеді. Ең кіші мән 400 нм СР синтезіндегі жұқа үлбір үшін 3,86 болса, ал ең жоғары мән 19,22 болып 400 нм СР синтезіндегі жұқа үлбірге тән болады.



6-сурет. SiO₂ төсенішіндегі жұқа үлбір қалыңдығынан (Rsk) асимметрия (a) мен (Rku) эксцесстің (b) тәуелділігі

4. Қорытынды

Қолданылатын үш химиялық синтездің ішінде СВ әдісі бірге тұндыру мен золь-гель әдістерімен салыстырғанда жақсы нәтижелерге ие болғанын XRD деректерінен, SiO₂ төсенішіне тұндырылған СВ жұқа үлбірлердің 600 нм қалыңдықта кристалданудың дәрежесі мен беттік морфологиясынан, ал асимметриясы орташа мәнді көрсетіп оның тегістігін көрсететіндігінен байқауға болады. Жанудың химиялық процесі кезінде нитраттар мен қышқылдардың булануына әкелетін термиялық өңдеу қолданылады. Барлық ұнтақтар 200-ден 1000°C градусқа дейін қыздырылады және самариймен белсендірілген церийдің кристалдық құрылымы аса жоғары температурада дами бастайды. Сондықтан басқа прекурсорлық бөлшектердің болуын азайту үшін барлық ұнтақтар 1000°C температурада күйдірілді. Қыздырылған ұнтақтардың тор параметрі қыздыру температурасының жоғарылауымен үлкейеді және олар теориялық мәндерден жоғары болады. Қыздырылған ұнтақтардың кристаллит өлшемі температураның жоғарылауымен өсуге бейім болып табылады. Ұнтақтар қыздырылмаған кезде СВ үшін 19,61 нм, CP үшін 33,49 нм және SG үшін 13,25 нм басталған болса, қыздырылғаннан соң СВ үшін 35,41 нм, CP үшін 38,97 нм және SG ұнтақтары үшін 31,266 нм аяқталды. SiO₂ төсенішіне тұндырылған жұқа үлбірлердің тор параметрінің эксперименттік мәндері теориялық мәннен жоғары болды. Қалыңдығы жоғарылаған сайын SiO₂ төсенішіне тұндырылған жұқа үлбірлердің кристаллитінің орташа өлшемі артады. АКМ нәтижелері жұқа үлбірлердің бетінің кедір-бұдырлығының орташа мәндері қалыңдығының жоғарылауымен өсетіндігін көрсетеді.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Авторлар Вильнюс университеті, Химия және геоғылымдар факультеті ұжымына (Вильнюс, Литва) ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізуге көмек бергені үшін алғыс білдіреді. Авторлар олардың мүдделер қақтығысы жоқ екенін баяндайды.

Авторлардың қосқан үлесі. С.А.Пазылбек, О. Шалхар: түпнұсқа мәтінді жазу, авторлық қадағалау, әдістеме, зерттеу; **Б.Е. Жакипбаев, Д.К. Ескермесов, Б.Ж. Сейтов:** тұжырымдамалау, зерттеу, ресурстар; **А.К. Тусупбекова, Э.К. Мусенова, У.А. Муратбекова, Ж.К. Алипбекова:** зерттеу, визуализация, шолу, редакциялау және қаржыландыру.

Әдебиеттер тізімі

1. P. Boldrin, N.P. Brandon, *Progress and outlook for solid oxide fuel cells for transportation applications*, Nat. Catal., - 2019.-V. 2(7). -P.571–577, doi:10.1038/s41929-019-0310-y – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
2. U.F. Akpan, G.E. Akpan, *The contribution of energy consumption to climate change: A Feasible policy Direction*, Int. J. Energy Econ. Policy, - 2012.-V.2(1).-P. 21–33 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
3. J.M. Andújar, F. Segura, *Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries*, Renew. Sustain. Energy Rev, - 2009. - V. 13(9). - P. 2309–2322, doi: 10.1016/j.rser.2009.03.015 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
4. A. Choudhury, H. Chandra and A. Arora, *Application of solid oxide fuel cell technology for power generation*, Renew. Sustain. Energy Rev, -2013.-V.20.-P.430–442, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.031 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
5. U. Lucia, *Overview on fuel cells*, Renew. Sustain. Energy Rev, - 2014.- V. 30- P. 164–169, doi: 10.1016/j.rser.2013.09.025 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
6. L. Giorgi, *Fuel Cells: Technologies and Applications*, Open Fuel Cells J., vol. 6, no. 1, pp. 0–0, 2013, doi: 10.2174/1875932720130719001 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
7. O. Z. Sharaf, M. F. Orhan, *An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications*, Renew. Sustain. Energy Rev, -2014.-V.32-P.810–853, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.012 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
8. A.L. Dicks, D.A. J. Rand, *Fuel Cell Systems Explained*, 2018 - **ағылшын тіліндегі кітап**
9. D. Carter, J. Wing, *Fuel Cell Today*, The Fuel Cell Industry Review- 2013.- P. 1–50 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
10. P. Grimes, *Historical pathways for fuel cells. The new electric century*, Proc. Annu. Batter. Conf. Appl. Adv.-2000.-V.2000-Jan (December), -P.41–45,doi: 0.1109/BCAA.2000.838369 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
11. M. Sriubas, K. Pamakštys, G. Laukaitis, *Investigation of microstructure and electrical properties of Sm doped ceria thin films*, Solid State Ionics, -2017.-V.302- P. 165–172, doi: 10.1016/j.ssi.2016.11.007 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
12. D. Virbukas, M. Sriubas, G. Laukaitis, *Structural and electrical study of samarium doped cerium oxide thin films prepared by e-beam evaporation*, Solid State Ionics, vol. 271, pp. 98–102, 2015, doi: 10.1016/j.ssi.2014.09.036 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
13. L.Bastakys, F.Kalyk, L. Marcinauskas, *Structural investigation of gadolinia-ceria multilayered thin films deposited by reactive magnetron sputtering*, Materials Letters, - 2020.-271.- 127762, doi: 10.1016/j.matlet.2020.127762 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
14. B. Timurkutluk, C. Timurkutluk, M. D. Mat, Y. Kaplan, *A review on cell/stack designs for high performance solid oxide fuel cells*, Renew. Sustain. Energy Rev.- 2016.- V. 56- P.1101–1121, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.034 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**

15. K. Kendall, *Introduction to SOFCs*. - 2016, 2nd ed., No. 1. Elsevier Ltd. - **ағылшын тіліндегі кітап**
16. N. Kalanda, M. Yarmolich, M. Kutuzau, *Degree of phase transformations in the conditions of polythermal synthesis of SrBaFeMoO_{6-δ}*, Vacuum.- 2020.- 174.- P.109196, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109196> – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
17. B. Sorensen, Fuel cells. 3.1.1 *Electrochemistry and thermodynamics of fuel cells*, Hydrog. Fuel Cells.- 2012.- P. 95–200, doi: 10.1016/B978-0-12-387709-3.50003-6 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
18. S. A. M. Ali, R. E. Rosli, A. Muchtar, *Effect of sintering temperature on surface morphology and electrical properties of samarium-doped ceria carbonate for solid oxide fuel cells*, Ceram. Int.-2015.- V. 41(1).-P. 1323–1332, doi: 10.1016/j.ceramint.2014.09.064 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
19. Š. Jankauskas, A. Vasiliauskas, A. Guobienė, *Study of the structure, composition and wettability of the DLC:N films*, Surface and Coatings Technology- 2024.- V.489.- P.131132, doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131132 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
20. S. P. S. Badwal, S. Giddey, C. Munnings, A. Kulkarni, *Review of progress in high temperature solid oxide fuel cells*, J. Aust. Ceram. Soc.- 2014.- V. 50 (1).-P. 23–37 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
21. D. Virbukas, G. Laukaitis, *The structural and electrical properties of samarium doped ceria films formed by e-beam deposition technique*, Solid State Ionics.- 2017. - V. 302.- P. 107–112, doi: 10.1016/j.ssi.2016.12.003 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
22. I. Mindaugas, G. Asta, G. Karolis, *UV-mediated photochemical synthesis and investigation of the antiviral properties of Silver nanoparticle-polyvinyl butyral nanocomposite coatings as a novel antiviral material with high stability and activity*, Applied Materials Today.- 2024.- V. 38.- P. 102203, doi: 10.1016/j.apmt.2024.102203 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
23. S. F. Wang, C. T. Yeh, Y. R. Wang, Y. C. Wu, *Characterization of samarium-doped ceria powders prepared by hydrothermal synthesis for use in solid state oxide fuel cells*, J. Mater. Res. Technol.- 2013.- V. 2(2)- P. 141–148, doi: 10.1016/j.jmrt.2013.01.004 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
24. B. Aygün, H. Özdemir, M. A. F. Öksüzömer, *Structural, morphological and conductivity properties of samaria doped ceria (Sm_xCe_{1-x}O_{2-x/2}) electrolytes synthesized by electrospinning method*, Mater. Chem. Phys.-2019.-V.232 (January)-P.82–87, doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.04.067 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
25. C. Mansilla, J. P. Holgado, J. P. Espinós et al., *Microstructure and transport properties of ceria and samaria doped ceria thin films prepared by EBE-IBAD*, Surf. Coatings Technol.- 2007.- V. 202(4–7)- P. 1256–1261, doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.082 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
26. S. Gupta et al., *Influence of samaria doping on the resistance of ceria thin films and its implications to the planar oxygen sensing devices*, Sensors Actuators, B Chem.- 2009- V. 139(2)- P. 380–386, doi: 10.1016/j.snb.2009.03.021 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
27. V. Lair, L. S. Živković, O. Lupan, A. Ringuedé, *Synthesis and characterization of electrodeposited samaria and samaria-doped ceria thin films*, Electrochim. Acta.- 2011.- V. 56(12).- P. 4638–4644, doi: 10.1016/j.electacta.2011.02.101 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
28. J. Bae, S. Hong, B. Koo, J. An et al., *Influence of the grain size of samaria-doped ceria cathodic interlayer for enhanced surface oxygen kinetics of low-temperature solid oxide fuel cell*, J. Eur. Ceram. Soc.- 2014.- V. 34(15).- P. 3763–3768, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.05.028 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
29. A. Tamulevičienė, M. Rasa, I. Mindaugas, *Highly-hydrophobic, transparent, and durable coatings based on ZnO tetrapods with diamond-like carbon nanocomposite*, Surface and Coatings Technology.- 2023.- 470.- P.129863, doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129863 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**

30. G. Saito, Y. Nakasugi, N. Sakaguchi, C. Zhu, T. Akiyama, *Glycine-nitrate-based solution-combustion synthesis of SrTiO₃*, J. Alloys Compd.- 2015.- V. 652- P. 496–502, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.08.227 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
31. A. B. Salunkhe, V. M. Khot, M. R. Phadatare, S. H. Pawar, *Combustion synthesis of cobalt ferrite nanoparticles - Influence of fuel to oxidizer ratio*, J. Alloys Compd.- 2012.- V. 514- P.91–96, doi: 10.1016/j.jallcom.2011.10.094 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
32. N. Özbay, A. S. Yargıç, R. Z. Yarbay Şahin, E. Yaman, *Research on the Pyrolysis Characteristics of Tomato Waste With Fe-Al₂O₃ Catalyst*, Exergetic, Energ. Environ. Dimens.- 2018- P. 815–828, doi: 10.1016/B978-0-12-813734-5.00046-9 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
33. T. Athar, *Smart precursors for smart nanoparticles*, Second Edit, Elsevier Inc., 2014. - **ағылшын тіліндегі кітап**
34. S.P. Sajjadi, *Sol-gel process and its application in Nanotechnology*, J. Polym. Eng. Technol.- 2005- V. 13(January)- P. 38–41 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
35. S. Sakka, *Sol-Gel Process and Applications* – 2013.- Second Edit. Elsevier - **ағылшын тіліндегі кітап**
36. B.G. Rao, D. Mukherjee, B.M. Reddy, *Nanostructures for novel therapy novel approaches for preparation of nanoparticles.* – 2017- Elsevier Inc. - **ағылшын тіліндегі кітап**
37. A. Dehghanhadikolaie, J. Ansary, R. Ghoreishi, *Sol-gel process applications: A mini-review*, Proc. Nat. Res. Soc.- 2018.- V. 2(June).- P. 0–11, doi: 10.11605/j.pnrs.201802008 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
38. E. S. Ameh, *A review of basic crystallography and x-ray diffraction applications*, Int. J. Adv. Manuf. Technol.- 2019.- V. 105(7–8).- P. 3289–3302,, doi: 10.1007/s00170-019-04508-1 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
39. C. Giannini, M. Ladisa, D. Altamura et. al., *X-ray Diffraction: A powerful technique for the multiple-length-scale structural analysis of nanomaterials*, Crystals- 2016.- V.6(8).- P. 1–22, doi: 10.3390/cryst6080087 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
40. A. A. Bunaciu, E. gabriela Udriştioiu, H. Y. Aboul-Enein, *X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications*, Crit. Rev. Anal. Chem.- 2015.- V. 45(4).- P. 289–299, doi: 10.1080/10408347.2014.949616 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
41. F.Kalyk, Ž.Artūras, V. Andrius, *Synthesis and Electron-Beam Evaporation of Gadolinium-Doped Ceria Thin Films*, Coatings – 2022.- 12(6).- 747, doi: 10.3390/coatings12060747 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
42. F.Kalyk, A. Stankevičiūtė, G.Budrytė, *Comparative study of samarium-doped ceria nanopowders synthesized by various chemical synthesis routes*, Ceram. Intern.- 2020.- 46(15).- P. 24385, doi:10.1016/j.ceramint.2020.06.221 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
43. A. Bhabu, J. Theerthagiri, J. Madhavan, *Cubic fluorite phase of samarium doped cerium oxide (CeO₂)_{0.96}Sm_{0.04} for solid oxide fuel cell electrolyte*, J. Mater. Sci. Mater. Electron.-2015.- 27 (2), P. 1566–1573, doi:10.1007/s10854-015-3925-z – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
44. G. Accardo, C. Ferone R. Cioffi, *Electrical and microstructural characterization of ceramic gadolinium-doped ceria electrolytes for ITSOFCs by sol-gel route*, J. Appl. Biomater. Funct. Mater.- 2016.- 14 (1), P. e35–e41, doi:10.5301/jabfm.5000265 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
45. G. Gaidamaviciene, B. Abakeviciene, A. Zalga, *Oxalic acid assisted synthesis of the gadolinium-doped ceria oxide-ion conductor as electrolyte for the solid oxide fuel cells*, Chem. Pap.-2019, 73:891–899, doi:10.1007/s11696-018-0648-7 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**
46. A. Arabaci, M.F. Oksuzomer, *Preparation and characterization of 10 mol% Gd doped CeO₂ (GDC) electrolyte for SOFC applications*, Ceram. Int.- 2012.- 38. - P. 6509–6515, doi:10.1016/j.ceramint.2012.05.030 – **ағылшын тіліндегі журнал мақаласы**

О. Шалқар¹, Б.Е. Жақипбаев², Д.К. Ескермесов³, Б.Ж. Сейтов⁴, А.К. Тусупбекова⁵,
Э.К. Мусенова⁵, У.А. Муратбекова⁶, Ж.К.Алипбекова⁷, С.А. Пазылбек⁸

¹Вильнюсский университет, Вильнюс, Литва

²Университет дружбы народов имени академика А.Куатбекова, Шымкент, Казахстан

³НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева»,
Усть-Каменогорск, Казахстан

⁴Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан

⁵Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан

⁶Южно-Казахстанский педагогический университет имени О. Жанибекова, Шымкент, Казахстан

⁷Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова, Шымкент, Казахстан

⁸Университет имени Ж.А. Ташенева, Шымкент, Казахстан

*Автор для корреспонденции: sapargali.pa@gmail.com

Исследование структурных и морфологических свойств порошков и тонких пленок активированного самарием оксида церия.

Аннотация. В работе рассматривается анализ порошков и тонких пленок оксида церия (SDC) с содержанием 26%, активированного самарием для твердых оксидных топливных элементов (SOFC). при приготовлении порошков и тонких пленок SDC используются методы сжигания глицин-нитрата (СВ), совместного осаждения (СР) и водного золь-геля (SG), приводится описание анализа полученных образцов. Все полученные порошки нагревают до температуры от 200 до 1000°C и полученные данные показывают, что кристаллическая структура церия, активированного самарием, развивается при более высоких температурах. Параметры решетки и размер кристаллита нагретых порошков указывают на увеличение нагрева с повышением температуры, а параметр решетки имеет значение выше теоретических значений. Результаты эксперимента показали, что средний размер кристаллитов тонких пленок увеличивается с увеличением его толщины. Среди используемых методов синтеза считается, что метод СВ имеет лучшие результаты по сравнению с методами совместного осаждения и золь-геля. Обнаружено, что экспериментальные значения параметра сетки тонких пленок, осажденных на мате (сетке) SiO_2 , выше соответствующих теоретических значений. Показано, что по мере увеличения толщины средний размер кристаллита тонких пленок, осажденных на мате SiO_2 , увеличивается. Результаты, полученные с помощью атомно-силового микроскопа, показали, что средние значения шероховатости поверхности тонких пленок увеличиваются с увеличением их толщины. С помощью соответствующего программного обеспечения были описаны средняя шероховатость поверхности (R_s), средняя квадратичная шероховатость (R_q), эксцентриситет (R_{ku}), асимметрия (R_{sk}).

Ключевые слова: золь-гель, совместное осаждение, горение глицин-нитратов, тонкая пленка, активированный самарием церий, твердый оксидный топливный элемент.

O. Shalkar¹, B.E. Zhakipbayev², D.K. Yeskermessov³, B.Zh. Seitov⁴, A.K. Tussupbekova⁵, E.K. Mussenova⁵, U.A. Muratbekova⁶, Zh.K. Alipbekova⁷, S. Pazyzbek^{*8}

¹Vilnius University, Vilnius, Lithuania

²Peoples' Friendship University named after Academician A.Kuatbekov, Shymkent, Kazakhstan

³NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

⁴Ahmet Yassawi University, Turkestan, Kazakhstan

⁵E.A Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan

⁶South Kazakhstan Pedagogical University named after O.Zhanibekov, Shymkent, Kazakhstan

⁷M.Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

⁸Tashenev University, Shymkent, Kazakhstan

*Correspondence: sapargali.pa@gmail.com

Study of structural and morphological properties of powders and thin films of samaria doped cerium oxide

Abstract. An analysis of 26% samarium doped ceria (SDC) powders and thin films for solid oxide fuel cells (SOFCs) is considered. Glycine-nitrate combustion (CB), co-precipitation (CP), and aqueous sol-gel (SG) methods are used in the preparation of SDC powders and thin films, and methods for analyzing the obtained samples are described. All obtained powders were heated from 200 to 1000°C degrees, showing that the crystal structure of cerium activated by samarium develops at very high temperatures. It shows that the lattice parameter and crystallite size of the heated powders increase with increasing heating temperature, and the lattice parameter is higher than the theoretical values.

The results of the experiment revealed that the average size of the crystallites of thin films increases with the increase in thickness. Among the applied syntheses, the CB method is considered to have better results compared to co-precipitation and sol-gel methods. The experimental values of the lattice parameter of the thin films deposited on the SiO₂ mat were higher than the theoretical value. As the thickness increases, the average crystallite size of the thin films deposited on the SiO₂ substrate increases. The results of the atomic force microscope showed that the average values of the surface roughness of thin films increase with the increase in thickness. The mean surface roughness (R_s), root mean square roughness (R_q), kurtosis (R_{ku}), skewness (R_{sk}) were characterized using appropriate software.

Keywords: sol-gel, co-precipitation, glycine-nitrate combustion, thin film, samarium doped ceria, solid oxide fuel cell

References

1. P. Boldrin, N.P. Brandon, *Progress and outlook for solid oxide fuel cells for transportation applications*, Nat. Catal, - 2019-V. 2(7). -P.571–577, doi:10.1038/s41929-019-0310-y
2. U.F. Akpan, G.E. Akpan, *The contribution of energy consumption to climate change: A Feasible policy Direction*, Int. J. Energy Econ. Policy, - 2012.-V.2(1).-P. 21–33
3. J.M. Andújar, F. Segura, *Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries*, Renew. Sustain. Energy Rev, - 2009. - V. 13(9). - P. 2309–2322, doi: 10.1016/j.rser.2009.03.015
4. A. Choudhury, H. Chandra and A. Arora, *Application of solid oxide fuel cell technology for power generation*, Renew. Sustain. Energy Rev, -2013.-V.20.-P.430–442, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.031
5. U. Lucia, *Overview on fuel cells*, Renew. Sustain. Energy Rev, - 2014.- V. 30- P. 164–169, doi: 10.1016/j.rser.2013.09.025

6. L. Giorgi, *Fuel Cells: Technologies and Applications*, Open Fuel Cells J., vol. 6, no. 1, pp. 0–0, 2013, doi: 10.2174/1875932720130719001
7. O. Z. Sharaf, M. F. Orhan, *An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications*, Renew. Sustain. Energy Rev. -2014.-V.32-P.810–853, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.012
8. A.L. Dicks, D.A. J. Rand, *Fuel Cell Systems Explained*, 2018
9. D. Carter, J. Wing, *Fuel Cell Today*, The Fuel Cell Industry Review- 2013.- P. 1–50
10. P. Grimes, *Historical pathways for fuel cells. The new electric century*, Proc. Annu. Batter. Conf. Appl. Adv.-2000.-V.2000-Jan (December), -P.41–45,doi: 0.1109/BCAA.2000.838369
11. M. Sriubas, K. Pamakštys, G. Laukaitis, *Investigation of microstructure and electrical properties of Sm doped ceria thin films*, Solid State Ionics, -2017.-V.302- P. 165–172, doi: 10.1016/j.ssi.2016.11.007
12. D. Virbukas, M. Sriubas, G. Laukaitis, *Structural and electrical study of samarium doped cerium oxide thin films prepared by e-beam evaporation*, Solid State Ionics, vol. 271, pp. 98–102, 2015, doi: 10.1016/j.ssi.2014.09.036
13. L. Bastakys, F. Kalyk, L. Marcinauskas, *Structural investigation of gadolinia-ceria multilayered thin films deposited by reactive magnetron sputtering*, Materials Letters, - 2020.-271.- 127762, doi: 10.1016/j.matlet.2020.127762
14. B. Timurkutluk, C. Timurkutluk, M. D. Mat, Y. Kaplan, *A review on cell/stack designs for high performance solid oxide fuel cells*, Renew. Sustain. Energy Rev.- 2016.- V. 56- P.1101–1121, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.034
15. K. Kendall, *Introduction to SOFCs*. - 2016, 2nd ed., No. 1. Elsevier Ltd.
16. N. Kalanda, M. Yarmolich, M. Kutuzau, *Degree of phase transformations in the conditions of polythermal synthesis of SrBaFeMoO_{6-δ}*, Vacuum.- 2020.- 174.- P. 109196, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109196>
17. B. Sorensen, *Fuel cells. 3.1.1 Electrochemistry and thermodynamics of fuel cells*, Hydrog. Fuel Cells.- 2012. - P. 95–200, doi: 10.1016/B978-0-12-387709-3.50003-6
18. S. A. M. Ali, R. E. Rosli, A. Muchtar, *Effect of sintering temperature on surface morphology and electrical properties of samarium-doped ceria carbonate for solid oxide fuel cells*, Ceram. Int.-2015.- V. 41(1).-P. 1323–1332, doi: 10.1016/j.ceramint.2014.09.064
19. Š. Jankauskas, A. Vasiliauskas, A. Guobienė, *Study of the structure, composition and wettability of the DLC:N films*, Surface and Coatings Technology- 2024.- V.489.- P.131132, doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131132
20. S. P. S. Badwal, S. Giddey, C. Munnings, A. Kulkarni, *Review of progress in high temperature solid oxide fuel cells*, J. Aust. Ceram. Soc.- 2014.- V. 50 (1).-P. 23–37
21. D. Virbukas, G. Laukaitis, *The structural and electrical properties of samarium doped ceria films formed by e-beam deposition technique*, Solid State Ionics.- 2017. - V. 302.- P. 107–112, doi: 10.1016/j.ssi.2016.12.003
22. I. Mindaugas, G. Asta, G. Karolis, *UV-mediated photochemical synthesis and investigation of the antiviral properties of Silver nanoparticle-polyvinyl butyral nanocomposite coatings as a novel antiviral material with high stability and activity*, Applied Materials Today.- 2024.- V. 38.- P. 102203, doi: 10.1016/j.apmt.2024.102203
23. S. F. Wang, C. T. Yeh, Y. R. Wang, Y. C. Wu, *Characterization of samarium-doped ceria powders prepared by hydrothermal synthesis for use in solid state oxide fuel cells*, J. Mater. Res. Technol.- 2013.- V. 2(2)- P. 141–148, doi: 10.1016/j.jmrt.2013.01.004
24. B. Aygün, H. Özdemir, M. A. F. Öksüzömer, *Structural, morphological and conductivity properties of samaria doped ceria (Sm_xCe_{1-x}O_{2-x/2}) electrolytes synthesized by electrospinning method*, Mater. Chem. Phys.-2019.-V.232 (January)-P.82–87, doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.04.067

25. C. Mansilla, J. P. Holgado, J. P. Espinós et al., *Microstructure and transport properties of ceria and samaria doped ceria thin films prepared by EBE-IBAD*, Surf. Coatings Technol.- 2007.- V. 202(4-7)- P. 1256-1261, doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.082
26. S. Gupta et al., *Influence of samaria doping on the resistance of ceria thin films and its implications to the planar oxygen sensing devices*, Sensors Actuators, B Chem.- 2009- V. 139(2)- P. 380-386, doi: 10.1016/j.snb.2009.03.021
27. V. Lair, L. S. Živković, O. Lupan, A. Ringuedé, *Synthesis and characterization of electrodeposited samaria and samaria-doped ceria thin films*, Electrochim. Acta.- 2011.- V. 56(12).- P. 4638-4644, doi: 10.1016/j.electacta.2011.02.101
28. J. Bae, S. Hong, B. Koo, J. An et al., *Influence of the grain size of samaria-doped ceria cathodic interlayer for enhanced surface oxygen kinetics of low-temperature solid oxide fuel cell*, J. Eur. Ceram. Soc.- 2014.- V. 34(15).- P. 3763-3768, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.05.028
29. A. Tamulevičienė, M. Rasa, I. Mindaugas, *Highly-hydrophobic, transparent, and durable coatings based on ZnO tetrapods with diamond-like carbon nanocomposite*, Surface and Coatings Technology.- 2023.- 470.- P.129863, doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129863
30. G. Saito, Y. Nakasugi, N. Sakaguchi, C. Zhu, T. Akiyama, *Glycine-nitrate-based solution-combustion synthesis of SrTiO₃*, J. Alloys Compd.- 2015.- V. 652- P. 496-502, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.08.227
31. A. B. Salunkhe, V. M. Khot, M. R. Phadataré, S. H. Pawar, *Combustion synthesis of cobalt ferrite nanoparticles - Influence of fuel to oxidizer ratio*, J. Alloys Compd.- 2012.- V. 514- P.91-96, doi: 10.1016/j.jallcom.2011.10.094
32. N. Özbay, A. S. Yargıç, R. Z. Yarbay Şahin, E. Yaman, *Research on the Pyrolysis Characteristics of Tomato Waste With Fe-Al₂O₃ Catalyst*, Exergetic, Energ. Environ. Dimens.- 2018- P. 815-828, doi: 10.1016/B978-0-12-813734-5.00046-9
33. T. Athar, *Smart precursors for smart nanoparticles*, Second Edit, Elsevier Inc., 2014.34.
S.P. Sajjadi, *Sol-gel process and its application in Nanotechnology*, J. Polym. Eng. Technol.- 2005- V. 13(January)- P. 38-41
35. S. Sakka, *Sol-Gel Process and Applications* – 2013.- Second Edit. Elsevier
36. B.G. Rao, D. Mukherjee, B.M. Reddy, *Nanostructures for novel therapy novel approaches for preparation of nanoparticles.* – 2017- Elsevier Inc.
37. A. Dehghanhadikolaei, J. Ansary, R. Ghoreishi, *Sol-gel process applications: A mini-review*, Proc. Nat. Res. Soc.- 2018.- V. 2(June).- P. 0-11, doi: 10.11605/j.pnrs.201802008
38. E. S. Ameh, *A review of basic crystallography and x-ray diffraction applications*, Int. J. Adv. Manuf. Technol.- 2019.- V. 105(7-8).- P. 3289-3302, , doi: 10.1007/s00170-019-04508-1 – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
39. C. Giannini, M. Ladisa, D. Altamura et. al., *X-ray Diffraction: A powerful technique for the multiple-length-scale structural analysis of nanomaterials*, Crystals- 2016.- V.6(8).- P. 1-22, doi: 10.3390/cryst6080087
40. A. A. Bunaciu, E. gabriela Udriştioiu, H. Y. Aboul-Enein, *X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications*, Crit. Rev. Anal. Chem.- 2015.- V. 45(4).- P. 289-299, doi: 10.1080/10408347.2014.949616
41. F.Kalyk, Ž. Artūras, V. Andrius, *Synthesis and Electron-Beam Evaporation of Gadolinium-Doped Ceria Thin Films*, Coatings – 2022.- 12(6).- 747, doi: 10.3390/coatings12060747
42. F.Kalyk, A. Stankevičiūtė, G. Budrytė, *Comparative study of samarium-doped ceria nanopowders synthesized by various chemical synthesis routes*, Ceram. Intern.- 2020.- 46(15).- P. 24385, doi:10.1016/j.ceramint.2020.06.221
43. A. Bhabu, J. Theerthagiri, J. Madhavan, *Cubic fluorite phase of samarium doped cerium oxide (CeO₂)_{0.96}Sm_{0.04} for solid oxide fuel cell electrolyte*, J. Mater. Sci. Mater. Electron.-2015.- 27 (2), P. 1566-1573, doi:10.1007/s10854-015-3925-z

44. G. Accardo, C. Ferone R. Cioffi, *Electrical and microstructural characterization of ceramic gadolinium-doped ceria electrolytes for ITSOFCs by sol-gel route*, J. Appl. Biomater. Funct. Mater.- 2016.- 14 (1), P. e35-e41, doi:10.5301/jabfm.5000265

45. G. Gaidamaviciene, B. Abakeviciene, A. Zalga, *Oxalic acid assisted synthesis of the gadolinium-doped ceria oxide-ion conductor as electrolyte for the solid oxide fuel cells*, Chem. Pap.-2019, 73:891-899, doi:10.1007/s11696-018-0648-7

46. A. Arabaci, M.F. Oksuzomer, *Preparation and characterization of 10 mol% Gd doped CeO₂ (GDC) electrolyte for SOFC applications*, Ceram. Int.- 2012.- 38. - P. 6509-6515, doi:10.1016/j.ceramint.2012.05.030

Авторлар туралы мәлімет:

С.А. Пазылбек – хат-хабар авторы, PhD, қауымдастырылған профессор, «математика және информатика» кафедрасының меңгерушісі, Жұмабек Ахметұлы Тәшенев атындағы Университет, Қонаев даңғылы 21, 160012, Шымкент, Қазақстан

О. Шалқар – PhD докторант, Химия және геоғылым факультеті, Вильнюс университеті, Наугардуко көшесі 24, LT-03225, Вильнюс, Литва

Б.Е. Жақипбаев – PhD, қауымдастырылған профессор, Академик Ә.Қуатбеков атындағы Халықтар достығы университетінің Инженерлік-технологиялық хабтың бас ғылыми қызметкері, «мұнай және құрылыс өндірісі» кафедрасының профессоры, Төле би көшесі 32, 160000, Шымкент, Қазақстан

Д.К. Ескермесов – PhD, физика Орталығының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық Инженерия Мектебінің жетекші ғылыми қызметкері КЕАҚ «Д. Серікбаев ат. Шығыс Қазақстан техникалық университеті», Серікбаев көшесі 19, 070004, Өскемен, Қазақстан

Б.Ж. Сейтов – PhD, «физика» кафедрасының меңгерушісі, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Б. Саттарханов даңғылы 29, 161200, Түркістан, Қазақстан

А.К. Тусупбекова – PhD, ассоциированный профессор кафедрасы «радиофизика және электроника» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Университет көшесі 28, 100028, Қарағанды, Қазақстан.

Э.К. Мусенова – ф.м.ғ.к., физика және нанотехнологиялар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, физика-техникалық факультет, академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Университетская көшесі, 28, 100028, Қарағанды қ., Қазақстан.

У.А. Муратбекова – математика кафедрасының магистр оқытушысы, физика-математикалық факультет, Ө.Жәнібеков атындағы Оңтүстік Қазақстан педагогикалық университеті, Байтұрсынов көшесі 13, Шымкент қ., Қазақстан.

Ж.К. Алипбекова – PhD, «Физика» кафедрасының аға оқытушысы, жаратылыстану ғылымдары мен педагогика факультеті, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тауке хан даңғылы 5, Шымкент 160012, Қазақстан.

С.А. Пазылбек – автор для корреспонденции, доктор PhD, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой «Математика и информатика», Университет имени Жумабека Ахметұлы Ташенева, проспект Кунаева 21, 160012, Шымкент, Казахстан

О. Шалқар – PhD докторант, факультет химии и геонаук, Вильнюсский университет, ул. Наугардуко 24, LT-03225, Вильнюс, Литва

Б.Е. Жақипбаев – PhD, ассоциированный профессор, главный научный сотрудник Инженерно-технологического хаба, профессор кафедрасы «Нефтяное и строительное производство»

Университета дружбы народов имени академика А.Куатбекова, улица Толе би 32, 160000, Шымкент, Казахстан

Д.К. Ескермесов – PhD, ассоциированный профессор Центра физики, Ведущий научный сотрудник Международной Школы Инженерии НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», ул. Серикбаева 19, 070004, Усть-Каменогорск, Казахстан

Б.Ж. Сейтов – PhD, заведующий кафедрой «Физика», Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, проспект Б. Саттарханова 29, 161200, Туркестан, Казахстан

А.К. Тусупбекова – PhD, ассоциированный профессор кафедры радиопластики и электроники Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, ул. Университетская 28, 100028, Караганда, Казахстан.

Э.К. Мусенова – к.ф.-м.н., ассоциированный профессор кафедры физики и нанотехнологии, физико-технический факультет, Карагандинский университет имени Е.А. Букетова, ул. Университетская, 28, 100028, Караганда, Казахстан.

Ж.К. Алипбекова – PhD, старший преподаватель кафедры «Физика», факультет естественные науки и педагогика, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова, просп. Тауке хана 5, Шымкент 160012, Казахстан7

У.А. Муратбекова – магистр кафедры математики, физико-математический факультет, Южно-Казахстанский педагогический университет имени О. Жанибекова, Шымкент, Казахстан, ул. Байтурсынова 13, г. Шымкент, Казахстан.

S. Pazyzbek – corresponding author, PhD, Associate Professor, Head of the Department of "Mathematics and Informatics", Tashenev University, Kunaev Avenue 21, 160012, Shymkent, Kazakhstan

O.Shalkar – PhD student, Faculty of Chemistry and Geosciences, Vilnius University, Naugarduko Str. 24, LT-03225, Vilnius, Lithuania

B.Ye. Zhakipbayev – PhD, Associate Professor, Chief Researcher of the Engineering and Technology Hub, Professor of the Department «Oil and Construction Production» of the Peoples' Friendship University named after Academician A.Kuatbekov, Tole bi Str. 32, 160000, Shymkent, Kazakhstan

D.K. Yeskermessov – PhD, Associate Professor at the Center of Physics, Leading Researcher at the International School of Engineering of the NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University», 19 Serikbayev str., 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

B. Seitov – PhD, Head of the Department of «Physics», Ahmet Yassawi University, B. Sattarhanov Avenue 29, 161200, Turkestan, Kazakhstan

A.K. Tussupbekova – PhD, Associate Professor of the Department of Radiophysics and Electronics, Physical and Technical Faculty, E.A Buketov Karaganda University, Universitetskaya str. 28, 100028, Karaganda, Kazakhstan.

E.K. Mussenova – Candidate of phys.-math. Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and Nanotechnology, Physical and Technical Faculty, E.A Buketov Karaganda University, Universitetskaya str. 28, 100028, Karaganda, Kazakhstan.

U.A. Muratbekova – master's degree in Mathematics, Faculty of Physics and Mathematics, South Kazakhstan Pedagogical University named after O.Zhanibekov, Baitursynova str.13, Shymkent, Kazakhstan.

Zh.K. Alipbekova – PhD, senior lecturer, Department of Physics, Faculty of Natural Sciences and Pedagogy, M.Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, Shymkent 160012, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).