

С. Опахай

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ., e-mail: serikjan_0707@mail.ru

**ҚАТТЫ ОКСИДТІ ОТЫН ЭЛЕМЕНТТЕРІ ЭЛЕКТРОЛИТІ ҮШІН
YSZ ПЛЕНКАСЫН ТҰНДЫРУДЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРІ**

Қазіргі таңда қатты оксидті отын элементтері электролиті үшін жұқа әрі берік YSZ (иттриймен тұрақтандырылған цирконий оксиді) пленкасын тұндыру мақсатында тиімділігі мен сезімталдығы өте жоғары физикалық әдістер қолданылады. Шолу мақала әр түрлі мақала авторларының өз жұмыстарында қолданған реактивті магнетронды және плазмалық бүрку, импульсті лазерлі тұндыру сияқты перспективті физикалық әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктерін талдауға арналған. Импульсті лазерлі тұндыру әдісінің басты артықшылықтарының бірі – ультражоғары жиілікті камера мен булану энергиясының бөлінуі негізінде тұндыру кезінде фондық газды және қоршаған орта қысымын таңдауға мүмкіндік беруі, алайда микробөлшектер мен нысанадағы бүркілетін заттың субстрат бетіне түсуі YSZ пленкасының беттік морфологиясын өзгертумен қатар пленканың деформацияға ұшырау нәтижесінде құрылымдық ауытқулар тудыруы мүмкін. Сол сияқты шолу мақалада қалған әдістердің де артықшылықтары мен кемшіліктері авторлардың жұмыстарын салыстыра отырып жан-жақты талқыланады. Әсіресе жоғарыда аталған әдістердің ішінен реактивті магнетронды бүрку әдісінің ерекшеліктеріне көп көңіл аударылады және аталған әдістің болашақта қолдануға өте тиімді, сезімталдығы жоғары экспрессивті әдіс екендігі көрсетіледі.

Түйін сөздер: физикалық тұндыру әдістері, магнетрон, YSZ жұқа пленкасы, лазер, қатты оксидті отын элементтері, плазма.

S. Opakhay

L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Kazakhstan, Nur-Sultan, e-mail: serikjan_0707@mail.ru

**Physical methods of YSZ film application
on solid oxide fuel cell electrolyte**

Today high effective and sensitive physical methods are used to deposit thin and durable YSZ films (zirconium oxide stabilized by yttrium) for a solid oxide fuel cells electrolyte. The review article is intended to analyze the advantages and disadvantages of perspective physical methods used in the papers of various authors, such as reactive magnetron and plasma sputtering, pulsed laser deposition. One of the main advantages of the pulsed laser deposition method is the choice of the background gas and the ambient pressure during the emission of the ultraviolet camera and the evaporation energy, however, the penetration of microporous particles and target particles on the substrate surface leads to structural changes caused by deformation of the film, as well as a change in the morphology of the film surface YSZ. In this paper, the advantages and disadvantages of the remaining methods are discussed in detail by comparing the articles of the authors. In particular, from the above methods, special attention is paid to the features of the reactive magnetron sputtering method, and it is shown that this method is the most effective, sensitive, expressive method for future use.

Key words: physical deposition methods, magnetron, YSZ thin film, laser, solid oxide fuel cells, plasma.

С. Опахай

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Казахстан, г. Нур-Султан, e-mail: serikjan_0707@mail.ru

**Физические методы осаждения пленки YSZ
для электролита твердооксидных топливных элементов**

В настоящее время для нанесения тонкой и прочной пленки YSZ (стабилизированного иттрием оксида циркония) электролита твердооксидного топливного элемента используются высокоэффективные и чувствительные физические методы. Данная обзорная статья

предназначена для анализа преимуществ и недостатков перспективных физических методов, использованных различными авторами в своих работах, таких как реактивное магнетронное и плазменное напыление, импульсное лазерное осаждение. Одним из основных преимуществ метода импульсного лазерного осаждения является выбор фонового газа и давления окружающей среды при выделении ультрафиолетовой камеры и энергии испарения, однако проникновение микропористых частиц и частиц-мишеней на поверхности подложки приводит к структурным изменениям, вызванным деформациями пленки, а также изменением морфологии поверхности пленки YSZ. В данной статье подробно обсуждаются преимущества и недостатки других остальных методов путем сравнения работы авторов. В частности, из вышеупомянутых методов особое внимание уделяется особенностям реактивного магнетронного напыления, и показано, что этот метод является наиболее эффективным, чувствительным, экспрессивным методом для будущего использования.

Ключевые слова: методы физического осаждения, магнетрон, тонкая пленка YSZ, лазер, твердооксидные топливные элементы, плазма.

Кіріспе

Қатты оксидті отын элементтері кологиялық таза және тиімділігі жоғары химиялық энергияны электр энергиясына айналдыратын электрохимиялық түрлендіргіш болып табылады. Олардың негізгі артықшылығы ретінде электр энергиясын өндірудің жоғары тиімділігін атауға болады. Қазіргі таңда нарықта 850-1000°C жоғары температурада жұмыс жасайтын қатты оксидті отын элементтері қолданылады. Сондықтан, олардың коммерциялық тартымдылығын арттыру жұмыс температурасын төмендетуді талап етеді. Бұл осы құрылғылардың қызмет ету мерзімін ұзартуға, сонымен қатар арзан коммутациялық материалдарды қолдануға мүмкіндік береді [1-5].

Қатты оксидті отын элементтері жоғары температура жағдайында құрамдас бөліктерінің деградациялық процестері мен химиялық әрекеттесуі жеделдетіледі, материалдардың жылулық қасиеттерінің үйлесімділігі мәселесі туындайды. Мұның бәрі пайдаланылатын материалдарға қатаң талап қояды, қатты оксидті отын элементтері құнының қымбат болуын тудырады және оларды коммерцияландыруды айтарлықтай шектейді. Пленкалы электролитті қолдану қатты оксидті отын элементтері жұмыс температурасын төмендету мәселесінің тиімді шешімі болып табылады нәтижесінде электролиттің қалыңдығы төмендейді, элементтің ішкі кедергісі азаяды және оның қуаты артады. Қазіргі таңда қатты оксидті пленкалы электролит негізіндегі қатты оксидті отын элементтерін дамыту электрохимияда белсенді дамып келе жатқан жаңа бағыттардың бірі болып табылады [6-8].

Қатты оксидті отын элементтері технологиясында қолданылатын ең танымал электролиттік материалдар иттриймен тұрақталған цирко-

ний диоксиді (YSZ) пленкалары болып табылады. Цирконий диоксиді негізіндегі керамикалық материалдар жоғары температурада қолдануға арналған ең көп зерттелген және дамыған электролиттер болып табылады. YSZ артықшылықтары ретінде жұмыс температурасындағы механикалық беріктігін, әртүрлі әдістермен оңай синтезделетіндігі және катодтар мен анод материалдарының қолданылуын атауға болады. YSZ пленкаларын золь-гель әдісі, бу фазасынан химиялық тұндыру, лазерлік тұндыру, магнетронды және плазмалық тұндыру сияқты әдістерді қолданып қондырады. YSZ пленкасын қондырудың аталған әдістердің ішінен ең перспективті әдісі ретінде магнетронды бүрку әдісін ерекше атап көрсетуге болады. Бұл шолу мақалада әртүрлі авторлардың жоғарыдағы физикалық тәсілдерді қолдана отырып YSZ пленкасын қондырудың әдістері жөнінде толық қарастырылады [9-10].

Физикалық әдістердің методикасы мен техникасының ерекшеліктері

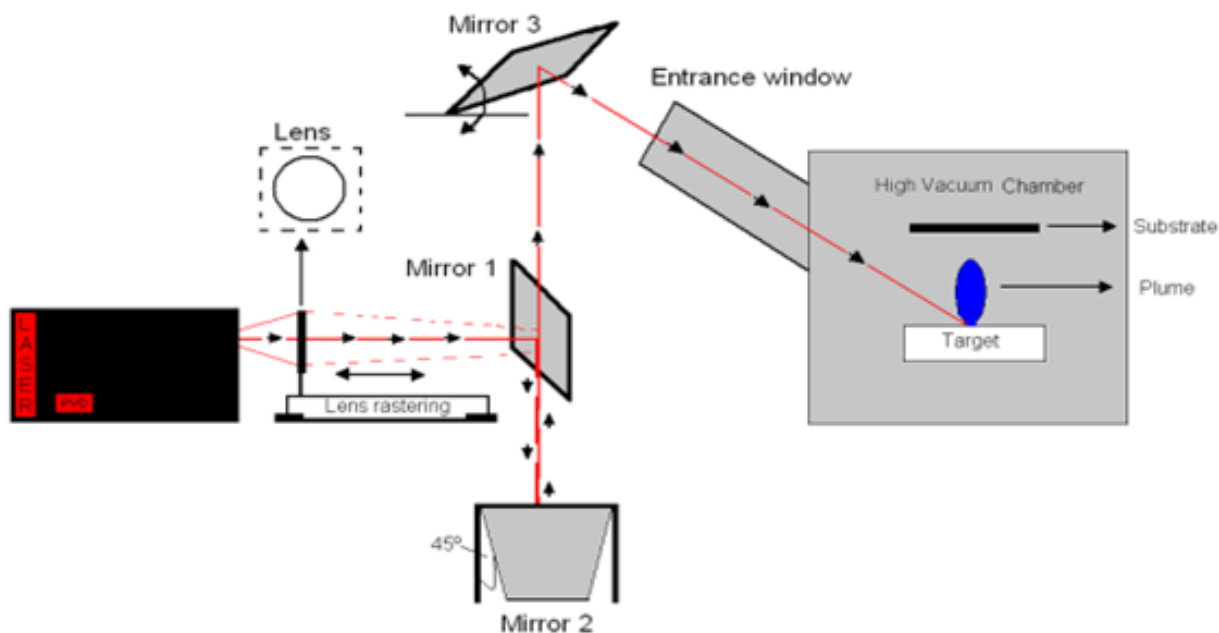
Лазерлі тұндыру әдісі

Импульсті лазерлік тұндыру – бұл материалды субстратта лазерлік абляциялау негізінде әмбебап «материал-нысана» жұқа пленкаларын өңдеу технологиясы. Оның жүйесінде лазер, бетке лазер сәулесін фокустау үшін қолданылатын оптикалық компоненттер жиынтығы және нысана мен субстрат бір-біріне қарама-қарсы орналасқан ультра жоғары вакуумды камера бар. Импульсті лазерлік тұндыру техникасының басты артықшылықтарының бірі – ультражоғары жиілікті камера мен булану энергиясының (лазер) бөлінуі негізінде тұндыру кезінде фондық газды және қоршаған орта қысымын таңдауға мүмкіндік береді. Тиісті мы-

сал ретінде құрылымдағы оттегінің жеткілікті мөлшерін қамтамасыз ету үшін YSZ пленкасын тұндыру кезінде ультражоғары жиілікті камераға оттегінің енгізілуі [11-13].

H.N Krogstad [14] YSZ жұқа қабатты электролит пленкасын микро – қатты оксидті отын элементтерін құру негізінде импульсті лазерлік тұндыру әдісі арқылы зерттеді. YSZ жұқа пленкалары толқын ұзындығы 248нм және импульс ұзақтығы 20нс, газ ортасы KrF болатын эксимерлі лазер Lambda Physic COMPexPRO негізінде IREC, PLD5000 құрылғысының көмегімен қондырылды (сурет 1). Ультражоғары жиілікті камераға орналастырылған оттегіне төзімді қара түсті субстрат жылытқышы инфрақызыл жылу шамдары мен суды салқындату жүйесін қолдана отырып, қажетті температурада ұстау үшін пай-

даланылды. Автор температурасы 600°C-қа төзетін аморфты Si негізіндегі субстраттарға импульсті лазерлік тұндыру әдісімен құйылған 8YSZ жұқа пленкалардың қалыңдығы мен микроқұрылымы фондық қысымға, PO₂ мен нысанадан субстратқа дейінгі қашықтыққа үлкен тәуелділікте болатынын анықтады. Алынған пленканың қалыңдығы 15-тен 239нм-ге дейін өзгерді, және ол қысым мен субстраттың қалыңдығының төмендеуімен сызықтық түрде жоғарылайтыны анықталды. PO₂ қабатының микроқұрылымы фондық қысымына байланысты айтарлықтай өзгерістерді көрсетті. 50 мен 35м Торр аралығында бүріккіш пленкалардың тығыздалу үрдісі байқалды, ал 25 пен 20мТоррға дейін құйылған үлгілер толығымен тығыз көрінді.



1-сурет – Импульсті лазерлік тұндыру құрылғысының үлкен аумағындағы лазер сәулесінің жолы

[15] жұмыста Ce_{0.8}Sm_{0.2}O_{2.6} (SDC) жартылай ұяшығына YSZ пленкасының электронды оқшаулау қабаты мен SDC буферлік қабатын орналастыру үшін импульсті лазерлік тұндыру әдісі қолданылды. Авторлар аталған әдісті қолдана отырып төмен температура әсерінен өткізгіштігі нашар (Zr, Ce)O₂ негізіндегі қатты ерітінділерді түзетін церий диоксиді мен тұрақтандырылған цирконий арасындағы фазааралық реакцияның болуын алдын ала білді. YSZ қабатының электронды оқшаулануының әсерінен 650°C темпе-

ратурада ұяшықтар үшін ашық тізбекті кернеу мәні 0,509В-дан 0,918В-қа дейін артты. Аталған жұмыста жоғары температуралы өндеудің басқа сулы керамикалық процестерімен салыстырғанда, импульсті лазерлік тұндыру әдісі қатты оксидті отын элементтері үшін төмен температурада жоғары сапалы жұқа қабатты қондыруға арналған тамаша әдіс болатындығы көрсетілді. Алайда бұл жұмыста қолданылған импульсті лазерлік тұндыру әдісінің жоғарыдағы артықшылықтарымен қатар кемшіліктері де бол-

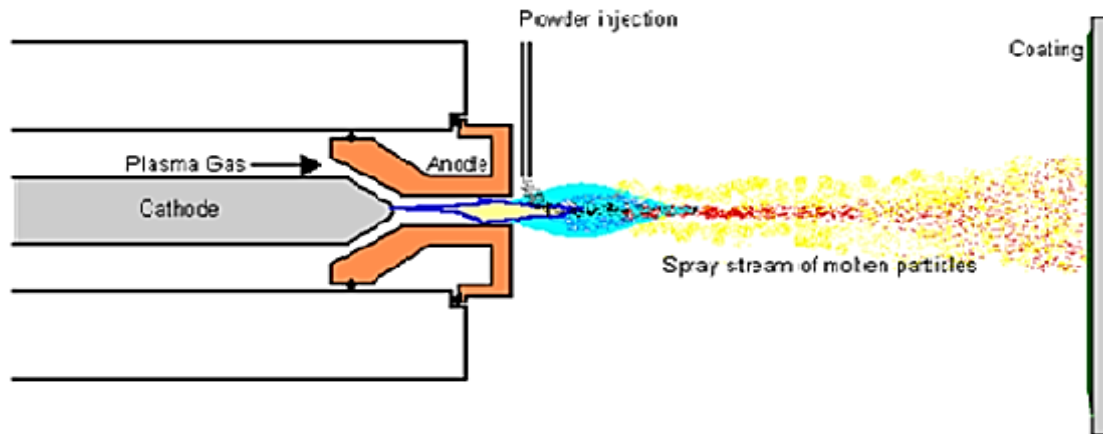
ды, мысалы: микробөлшектер мен нысанадағы бүркілетін заттың субстрат бетіне түсуі. Яғни бұл процесс YSZ пленкасының беттік морфологиясын өзгертумен қатар пленканың деформацияға ұшырау нәтижесінде құрылымдық ауытқулар тудыруы мүмкін.

[16] жұмыста YSZ жұқа пленкалары лазерлік қайталану жылдамдығы 10-50Гц жиілікте импульсті лазерлік тұндыру әдісімен тұндырылды. Лазердің қайталану жиілігін басқару YSZ пленкасының жоғары жылдамдықта тұнуын қамтамасыз ете алады, бірақ лазердің жоғары қайталану жылдамдығындағы тұндыру жылдамдығы алынған пленканың кристалдылығына теріс әсер етуі мүмкін. Осы жұмыста 10–50Гц аралығында қондырылған YSZ жұқа пленкасының рентгендік дифракциясының мәні айтарлықтай айырмашылықтар көрсеткен жоқ. Жақсы кристалданған YSZ жұқа пленкалары барлық жиіліктерде лазерлік қайталау арқылы алынды. Авторлар әрбір жұқа пленканың оксид-ион өткізгіштігін көлемді YSZ пленкасының өткізгіштігімен салыстырды. Нәтижесінде пленкалар арасында Y_2O_3 қалдық кернеуінің шамалы айырмашылықтары ғана байқалды. Тәжірибе нәтижесінде 900K және 1000K температурада қондырылған YSZ жұқа пленкалары бірдей оксидті-иондық өткізгіштікті, ал 800K

температурада қондырылған пленкалар төменгі оксидті-иондық өткізгіштікті көрсетті. Авторлар бұл айырмашылық түйірлер шекарасының тар енімен байланысты болуы мүмкін деген қорытындыға келді.

Плазмалық бүрку әдісі

Плазмалық бүрку процесі – бұл қыздырылған немесе балқытылған кездегі материал бетіне жабындыны қаптау әдісі болып табылады. Плазмалық бүріккіш мыс анод пен вольфрам катодынан тұрады, екеуі де сумен салқындатылады. Плазма газы (аргон, азот, сутегі, гелий) катодтың айналасында және анод арқылы тығыздалатын саптама түрінде өтеді. Плазма жоғары вольтты разрядтан басталады, ол локализацияланған иондалуды және катод пен анодтың арасында тұрақты доғаның пайда болуын тудырады. Газдың доғаның кедергісімен қызуы өте жоғары температураға жетуіне алып келеді, нәтижесінде ыдырайды, ионданады және плазма түзеді. Плазма анодтың саптамасынан еркін немесе бейтарап плазмалық жалын түрінде өтеді (электр тогын өткізбейтін плазма) және ол доғаны жабуға болатын бетке жайылған кезде плазмалық берілетін доғаны қолдану арқылы қаптау процесінен ерекшеленеді [17] (сурет 2).



2-сурет – Плазмалық бүрку процесі

Қазіргі кездегі көптеген зерттеулер плазмалық бүрку әдісін қолдану арқылы қатты оксидті отын элементтерін қатты оксидті отын элементтерін өндіруге арналады. Қатты оксидті отын элементтері өндірісі үшін плазмалық бүріккішті қолдану, керамиканы ылғал өңдеуден

өнімділік пен құн жағынан салыстырғанда да көптеген артықшылықтарға ие болып табылады. Плазмалық бүрку процесі көбінесе қалыпты атмосфералық жағдайда қолданылады сондықтан атмосфералық плазмалық бүрку деп аталады. Атмосфералық плазмалық бүрку

технологиясы өнеркәсіптік масштабта YSZ пленкасын қаптау негізінде оның жоғары тұну жылдамдығы, экономикалық тиімділігі жоғары өте берік, қалың жабын өндіру мақсатында қолданылады [18].

[19] жұмыста жұқа пленкалы YSZ электролиті жоғары жылдамдықты атмосфералық плазмалық бүрку әдісі арқылы 200, 400 және 600°C болатын әртүрлі температураларда тұндырылды. Авторлардың пікірінше тұндыру температурасы жоғарылаған сайын YSZ электролиті жұқа пленкасының микроқұрылымы әдеттегі ламель құрылымынан үздіксіз бағаналы кристалды құрылымға өзгерді. Тәжірибе нәтижесі 600°C температурада тұндырылған YSZ жұқа пленкалы электролиті ұяшығының максималды қуаттығыздығы 630 Вт/см² болып, 200°C температурада жоғары газ және электр өткізгіштігінің нәтижесінде жиналған ұяшықпен салыстырғанда 34% артатынын дәлелдеді.

D. Waldbillig және бірлескен авторлар [20] суспензияның плазмалық бүрку процесінің параметрлерінің микроқұрылымға және YSZ пленкасы жабындысының өткізгіштігіне әсерін зерттеді. Электролиттің бастапқы материалы ретінде авторлар концентрациясы 8 моль бүрку арқылы кептірілген YSZ ұнтағын пайдаланды. Алынған ұнтақтағы агломераттың мөлшері $d=50$, шамамен 1,6 мкм, өлшемдері 0,5-тен 15 мкм-ге дейін болды. Құрамында 3% қатты заты бар сулы суспензия ионсыздандырылған суды пайдаланып дайындалды. Зерттеу нәтижесі бойынша алынған жабындарда байқалатын енудің салыстырмалы төмен деңгейі оларды ҚООЭ-электролиттерін плазмалық бүркуге потенциалды ықтимал кандидат өте алатындығын дәлелдеді. Алайда авторлар плазмадағы газдың өте жоғары жылдамдығы ұсақ саңылаулармен бірге тұндырудың тиімділігін айтарлықтай төмендетуі мүмкін деген қорытындыға келді. Бұл қабаттардың электрохимиялық қасиеттері ылғалдығы 3% Н₂ отын ретінде және ауа тотықтырғыш ретінде қолданған кездегі N₂ балансындағы газ қоспасымен сипатталды. 600-750°C температура аралығында плазмалық бүрку әдісімен алынған элемент электролиттерінің тұйықталған кернеу мәні 1В болды. Яғни аталған жұмыста суспензиялық бүрку кезінде плазмадағы газдың өте жоғары жылдамдығы YSZ пленкасының морфологиясына айтарлықтай әсер етеді, нәтижесінде пленканың электр өткізгіштігі азаяды.

Реактивті магнетронды бүрку әдісі

Реактивті магнетронды бүрку термиялық булану және электронды сәулелі булану сияқты вакуумды жабу технологиясы сияқты басқа да әдістерге қосымша әдіс болып табылады. Бірақ аталған әдістердің бірнеше кемшіліктері бар. Атап айтқанда, қорытпалар мен отқа төзімді металдар құраушы қорытпалардың бу қысымдары мен олардың жоғары балку нүктелерінің айырмашылығына байланысты проблемалар туғызады. Сонымен қатар, қосылыстар төмен булану қысымымен химиялық құрамдас бөліктеріне ыдырай бастайды. Реактивті магнетронды бүрку әдісінің жоғарыдағы аталған кемшіліктерімен қатар көптеген басқа артықшылықтарға ие болады. Аталған әдістің негізгі артықшылықтары: тұндырудың жоғары жылдамдығы, (2) кез-келген металды, қорытпаны немесе қосылысты бүркудің жеңілдігі; (3) пленканың жоғары тазалығы мен жеңіл адгезиясы, (5) жабындының сатылай жабылуының тамаша мүмкіндіктері, (6) ыстыққа сезімтал субстраттарды жабу мүмкіндігі, (7) автоматтандырудың қарапайымдығы және (8) үлкен аумақты субстратта тамаша біркелкіліктің болуы [21-22].

А.А Соловьев және бірлескен авторлар [23] тұрақтандырылған иттрий оксидінің (YSZ) жұқа пленкаларын әртүрлі жағдайларда NiO-YSZ отын ұяшықтарының анодтарына реактивті магнетронды шашырату әдісімен бүркуді зерттеді. Тәжірибелер диаметрі 100мм және 8мм Zr_{0.86}Y_{0.14} нысана көмегімен тот баспайтын болаттан жасалған цилиндрлік вакуумдық камераға орналастырылған дөңгелек магнетрон көзімен жабдықталған. Тұндыру алдында субстраттар 10 минуттай бүріккішпен тазартылды. Бұл жағдайда магнетронның қуаты 200Вт, ал тербеліс кернеуі 600В амплитудасы арқылы субстрат ұстағышқа жіберілді, содан кейін үлгілер шамамен 500°C температураға дейін қыздырылды. Аталған жұмыста тұрақтандырылған иттрий оксидінің (YSZ) жұқа пленкалары реактивті магнетронды бүрку әдісімен NiO-YSZ отын элементтерінің анодтарына әр түрлі жағдайда қондырылды. Субстраттың жылжу кернеулігі, температурасы, кеуектілігі қондырылған пленканың морфологиясы мен текстурасына әсері зерттелді. Авторлар реактивті магнетронды бүрку нәтижесінде NiO-YSZ анодтарында өсірілген YSZ пленкаларының морфологиясын салысты-

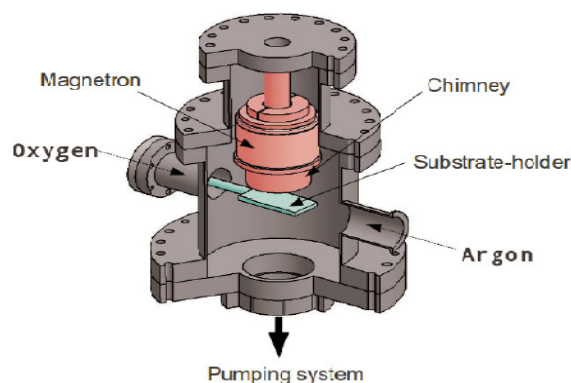
ра отырып субстратқа жоғары кеуектілікпен қондырылған пленкалардың бағаналы, ешқандай жарықшақсыз және тұндыру параметрлеріне тәуелді бос орындар жоқ екенін және анодқа жақсы адгезияланатынын анықтады. Мұндай пленкалар (әсіресе жұқа пленкалы YSZ) ҚООЭ сапасын арттыруда тамаша материал болып табылады. Яғни аталған жұмыстағы магнетронды бүрку әдісі қатты оксидті отын элементтері электролитіне арналған YSZ пленкаларын қондыруда қолданылатын тамаша әдіс екенін атап көрсетуге болады.

[24] жұмыста реактивті магнетронды бүрку әдісімен қатты оксидті отын элементтері үшін анод субстраты негізінде YSZ пленкалары алынды. Функционалды анод қабатын қолданып, анодтың бетін тегіс, тығыз және біркелкі қалыңдығы 10мкм болатын YSZ пленкасымен жабу сәтті жасалды. Аталған жұмыста YSZ пленкасының күй жағдайлары да талқыланды. Жұмыс авторларының болжауы бойынша тұндырылған YSZ пленкалары үшін қолайлы күй шарттары 1250°C температурада 4 сағат ішінде болады деп болжанды. Бүркілген YSZ электролит пленкасы және активті катод материалдары LSM–YSZ үшін арнайы ұяшықтар сыналды. Ұяшықтың 750°C температурада кернеулілігі 1,08В және максималды қуат тығыздығы 700 мВт/см² мәндері ылғалдандырылған сутегіні отын ретінде, ал ауаны тотықтырғыш ретінде қолданған кезде алынды.

Н.Hidalgo және серіктестері [25] тұрақты ток кезіндегі қатты оксидті отын элементтеріне арналған электролиттің YSZ эффективті жұқа пленкасын реактивті магнетронды бүрку әдісімен алудың оңдайландыру процесін зерттеді. Магнетронды бүрку бойынша тәжірибелер тот баспайтын болаттан жасалған камерада ($\varnothing = 15\text{см}$; $h = 13\text{ см}$) жүргізілді (3-сурет). Тұндыру алдында камера турбомолекулярлы насос арқылы 10–40Па қысыммен вакуумделді. Тұндыру қысымы 1.2Па болды. Аргонның (ауа сұйықтығы 99,9995%) және оттегінің (ауа сұйықтығы 99,9995%) шығынын екі масса реттегіш басқарып, камераға сол түтік арқылы кірді. Вакуумдық металды цирконий-иттрий нысаны тұрақты ток көзімен жұмыс істейтін 2-планарлы магнетронға бекітілген. Токтың интенсивтілігі 1А деңгейінде орнатылды, ол 12Вт/см² жақын қуаттың тығыздығына сәйкес келеді.

Жоғарыдағы жұмыста иттриймен тұрақталған цирконий диоксидінің жұқа қабаты (YSZ, $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$) аргон/оттегі атмосферасында Zr/Y металл нысанынан жоғары тұндыру

жылдамдығымен тұрақты ток кезінде реактивті магнетронды бүрку әдісімен қондырылды. Плазма параметрлері және газ фазасының құрамын талдау «күрделі» режимде бүрку процесі оттегінің шығыны 2,5сccm болғанда орындалатынын көрсетті. «Металл» режимінде кремнийге ағынды жылдамдықпен шоғырлану өте жоғары тұндыру жылдамдығымен (>10lm/h) тік бағаналы стехиометриялық кристалданған YSZ пленкасын алуға мүмкіндік береді. Коммерциялық анодқа NiO-YSZ қолданған кезде де алынған жабындар бірдей қасиеттерді көрсетеді. Нәтижесінде аталған жұмыста субстраттың күрделілігіне (кеуектілігі мен кедір-бұдырлығына) қарамастан, ықшам және лайықты қабат пайда болды. Пленка қабатын ауада немесе сутегіде тазарту қабаттардың құрылымын айтарлықтай өзгертпеді. LSM трафареті ($LaSrMnO_3$) катодымен 850°C температурада электрохимиялық сынақ қанағаттанарлықтай газөткізгіштікті көрсетті (OCV=900mВ) және максималды қуат тығыздығы 350мВт/см² болды.



3-сурет – Реактивті магнетронды бүрку құрылғысы

Қорытынды

Шолу мақалада қазіргі таңда қатты оксидті отын элементтері электролиті үшін YSZ пленкасын тұндыруда кеңінен қолданылатын реактивті магнетронды, плазмалық және лазерлі тұндыру сияқты физикалық әдістердің мүмкіндіктері, жетістіктері, артықшылықтары мен кемшіліктері кеңінен талқыланды. Аталған әдістерді әрбір автор сапалы әрі дәлдігі жоғары нәтижелер алуда сәтті қолдана білді. Алайда плазмалық және лазерлі тұндыру әдістерінің кейбір кемшіліктері болды. Мысалы Qian J. және бірлескен авторлары жұмысында

жоғары температуралы өңдеудің басқа сулы керамикалық процестерімен салыстырғанда, импульсті лазерлі технология әдісі қатты оксидті отын элементтері үшін төмен температурада жоғары сапалы жұқа қабатты қондыруға арналған тамаша әдіс болатындығы көрсетілді. Алайда бұл жұмыста қолданылған импульсті лазерлі технология әдісінің жоғарыдағы артықшылықтарымен қатар кемшіліктері де болды, мысалы: микробөлшектер мен нысанадағы бүркілетін заттың субстрат бетіне

түсуі, яғни бұл процесс YSZ пленкасының беттік морфологиясын өзгертумен қатар пленканың деформацияға ұшырау нәтижесінде құрылымдық ауытқулар тудыруы мүмкін. Қорыта келгенде жоғарыдағы авторлардың қатты оксидті отын элементтері электролиті үшін YSZ пленкасын тұндыруда қолданылған физикалық әдістердің ішінен магнетронды бүрку әдісінің болашақта мүмкіндігі жоғары әрі перспективті әдістің бірі екенін ерекшеліп айтуға болады.

Әдебиеттер

- 1 Bove R. Solid Oxide Fuel Cells: Principles, Designs and State of the Art in Industries //in book Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology. S. Basu, Ed. – New York, 2007. – P.267-285.
- 2 Singhal S.C. and Kendall K. High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications. – Elsevier, Oxford, UK, 2003. – 406 p.
- 3 Choudhury A., Chandra H. and Arora A. Application of Solid Oxide Fuel Cell Technology for Power Generation-A Review //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 20. – P.430-442.
- 4 Williams M.C. Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals to Systems //Fuel Cells. – 2007. –No. 1. – P.78-85.
- 5 Winkler W. In High temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications. In: Singhal S.C. and Kendall K. (eds). – Oxford, Elsevier, 2003. – P.53–82.
- 6 Du Y., Hedayat N., Panthi D., Ilkhani H., Emley B.J. and Woodson T. Freeze- casting for the fabrication of solid oxide fuel cells: A review //Materialia. – 2018. – Vol.1. – P. 198-210.
- 7 Da Silva F.S., & de Souza T.M. Novel materials for solid oxide fuel cell technologies: A literature review //Int J of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42(41). – P.26020-26036.
- 8 Damo U.M., Ferrari M.L., Turan A., and Massardo A.F. Solid oxide fuel cell hybrid system: A detailed review of an environmentally clean and efficient source of energy //Energy. – 2019. – Vol. 168(C). – P.235-246.
- 9 Yang Z., Guo M., Wang N., Ma C., Wang J., & Han M. A short review of cathode poisoning and corrosion in SOFC //Int J of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol.42(39). – P.24959.
- 10 Дунюшкина Л.А Введение в методы получения пленочных электролитов для твердооксидных топливных элементов. Монография. – Екатеринбург: УРО РАН, 2015. – 126 с.
- 11 Ryu S., Lee S., Jeong W., Pandiyan A., Moorthy S.B.K., Chang I., Cha S.W. Pulsed laser deposition of BaCo_{0.4}Fe_{0.4}Zr_{0.1}Y_{0.1}O_{3-δ} cathode SOFC //Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 369. – P.265-268.
- 12 Li Y., Wong L.M., Yu C.C., Wang S., & Su P.C. Pulsed laser deposition of Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ} thin film cathodes for low temperature solid oxide fuel cells //Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol.320. – P.344–348.
- 13 Pascu R., Somacescu S., Epurescu G., Filipescu M., Luculescu C., Colceag D., Mitu B. Pulsed laser deposition of yttria stabilized zirconia based heterostructure //Thin Solid Films. – 2014. – Vol.553. – P.98–103.
- 14 Krogstad H.N. Deposition of Thin Film Electrolyte by Pulsed Laser Deposition (PLD) for micro-SOFC Development: a review //Materials Science and Engineering. – 2012. – Vol.72. – P.1-54.
- 15 Qian J., Tao Z., Xiao J., Jiang G., & Liu W. Performance improvement of ceria-based solid oxide fuel cells with yttria-stabilized zirconia as an electronic blocking layer by pulsed laser deposition //Int J of Hydrogen Energy. – 2013. – Vol. 38(5). – P.2407–2412.
- 16 Mukai T., Fujita T., Tsukui S., Yoshida K., Adachi M., & Goretta K.C. Effect of Rate on Pulsed Laser Deposition of Yttria-Stabilized Zirconia Electrolyte Thin Films for SOFCs //J of Fuel Cell Science and Technology. – 2015. – Vol. 12(3). – 031002.
- 17 Gupta M., Weber A., Markocsan N., & Gindrat M. Electrochemical Performance of Plasma Sprayed Metal Supported Planar SOFC //J of The Electrochemical Society. – 2016. – Vol.163 (9). – P.F1059-F1065.
- 18 Zhang S.-L., Yu H.-X., Li C.-X., Lai S.Y., Li C.-J., Yang G.-J. and Liu M. Thermally sprayed high-performance porous metal-supported solid oxide fuel cells with nanostructured La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-δ} cathodes //J of Materials Chemistry A. – 2016. – Vol. 4(19). –P.7461–7468.
- 19 Yang Y.C., Chang T.H., Wu Y.C., & Wang S.F. Porous Ni/8YSZ anode of SOFC fabricated by the plasma sprayed method // Int J of Hydrogen Energy. – 2012. – Vol.37 (18). – P.13746–13754.
- 20 Waldbillig D., & Kesler O. Effect of suspension plasma spraying process parameters on YSZ coating microstructure and permeability //Surface and Coatings Technology. – 2011. – Vol. 205(23-24). – P.5483-5492.
- 21 Coddet P., Amany M.-L., Vulliet J., Caillard A., & Thomann A.-L. YSZ/GDC bilayer and gradient barrier layers deposited by reactive magnetron sputtering for solid oxide cell //Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 357. – P.103-113.
- 22 Depla D., Besnard A., & Lamas J. The influence of the pressure on the microstructure of yttria-stabilized zirconia thin films deposited by dual magnetron sputtering //Vacuum. – 2016. – Vol. 125. – P.118-122.

- 23 Solovyev A.A., Rabotkin S.V., Ionov I.V., Shipilova A.V., Kovalchuk A.N. and Borduleva A.O. Bias-assisted magnetron sputtering of yttria-stabilised zirconia thin films // *J of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol.552. – 012010.
- 24 Wang H., Ji W., Zhang L., Gong Y., Xie B., Jiang Y., & Song Y. Preparation of YSZ films by magnetron sputtering for anode-supported SOFC // *Solid State Ionics*. – 2011. – Vol.192(1). – P.413-418.
- 25 Hidalgo H., Thomann A.L., Lecas T., Vulliet J., Wittmann-Tenze K., Damiani D., ... Brault P. Optimization of DC Reactive Magnetron Sputtering Deposition Process for Efficient YSZ Electrolyte Thin Film SOFC // *Fuel Cells*. – 2012. – Vol. 13(2), 279–288.

References

- 1 R. Bove, *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*. S. Basu, Ed. (New York, 2007), p.267-285.
- 2 S.C. Singhal and K. Kendall, *High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications*, (Elsevier, Oxford, UK, 2003), 406 p.
- 3 Choudhury, H. Chandra, and A. Arora, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 430-442 (2013).
- 4 M.C. Williams, *Fuel Cells*, 1, 78-85 (2007).
- 5 W. Winkler, In *High temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications*. In: Singhal S.C. and Kendall K. (eds), (Oxford, Elsevier, 2003), p.53–82.
- 6 Y. Du, N. Hedayat, et al, *Materialia*, 1, 198-210 (2018).
- 7 Da Silva F.S., and de Souza T. M., *Int J Hydrogen Energ*, 42(41), 26020 (2017).
- 8 U.M. Damo, M.L. Ferrari, A. Turan, and A.F. Massardo, *Energy*, 168(C), 235-246 (2019).
- 9 Z. Yang, M. Guo, et al, *Han Int J of Hydrogen Energy*, 42(39), 24959 (2017).
- 10 L.A. Dunyushkina *Vvedeniye v metody polucheniya plenochnykh elektrolitov dlya tverdotsidnykh toplivnykh elementov*. Monografiya, (Yekaterinburg: URO RAN, 2015), 126 s. (in Russ).
- 11 S. Ryu, S. Lee, et al, *Surface and Coatings Technology*, 369, 265-268 (2019)
- 12 Y. Li, L.M. Wong, et al, *Surface and Coatings Technology*, 320, 344–348 (2017).
- 13 R. Pascu, S. Somacescu, G. Epurescu, et al, *Thin Solid Films*, 553, 98–103 (2014).
- 14 H.N. Krogstad, *Materials Science and Engineering*, 72, 1-54 (2012).
- 15 J. Qian, Z. Tao, et al, *Int J of Hydrogen Energy*, 38(5), 2407–2412 (2013).
- 16 T. Mukai, T. Fujita, et al, *J of Fuel Cell Science and Technology*, 12(3), 031002 (2015).
- 17 M. Gupta, A. Weber, N. Markocsan, & M. Gindrat, *J of the Electrochemical Society*, 163(9), F1059-F1065 (2016).
- 18 S.L. Zhang, H.X. Yu, et al, *J of Materials Chemistry A*, 4(19), 7461–7468 (2016).
- 19 Y.C. Yang, T.H. Chang, et al, *Int J of Hydrogen Energy*, 37(18), 13746–13754 (2012).
- 20 D. Waldbillig and O. Kesler, *Surface and Coatings Technology*, 205(23-24), 5483-5492 (2011).
- 21 P. Coddet, M.L. Amany, et al, *Surface and Coatings Technology*, 357, 103-113 (2018).
- 22 D. Depla, A. Besnard, and J. Lamas, *Vacuum*, 125, 118-122 (2016).
- 23 A.A. Solovyev, S.V. Rabotkin, et al, *J of Physics: Conference Series*, 552, 012010 (2014).
- 24 H. Wang, W. Ji, et al, *Solid State Ionics*, 192(1), 413-418 (2011).
- 25 H. Hidalgo, A.L. Thomann, et al, *Fuel Cells*, 13(2) 279–288 (2012).