

MEASUREMENT OF THE EFFECTIVE ELECTRO-OPTICAL COEFFICIENT OF THIN FILMS OF LEAD ZIRCONATE DIOXIDE PRODUCED AT LOW TEMPERATURES¹*Mikhailov N.S.*, ²*Sadyk Zh.O.*¹*NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan*²*MISIS University of Science and Technology, Moscow, Russia***Corresponding author e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz***Authors information:****Mikhailov N.S.**, NPJSC “Karaganda Industrial University”, Temirtau, Kazakhstan, e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz**Sadyk Zhadiger Orysbauly**, MISIS University of Science and Technology, Moscow, Russia,<https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>; e-mail: sadzhad03@gmail.com

Abstract — The development of electro-optical (EO) modulators based on lead zirconate titanate (PZT) is crucial for integrated photonics. The high annealing temperature required for processing PZT thin films limits their compatibility with modern complementary metal oxide semiconductor (CMOS) technology. In this work, high-quality PZT films were produced on SiO₂/Si substrates at an annealing temperature below 450 °C. The PZT films showed a preferred (100) orientation and were smooth and crack-free. Based on low-temperature PZT films, we subsequently designed and developed the Mach-Zehnder interferometer (MZI) wave modulator. The measured half-wave voltage (V_{π}) was 4.8 V at a wavelength of 1550 nm, which corresponds to an EO coefficient in a device such as 66 pm/V, indicating potential use in optical devices. The results presented in this paper open up great prospects for the integration of PZT thin films with other complex systems.

Keywords — titanate film with lead zircon, low temperature, CMOS compatibility, electro-optical coefficient.

ТӨМЕН ТЕМПЕРАТУРАДА ДАЙЫНДАЛҒАН ҚОРҒАСЫН ЦИРКОНАТТЫ ТИТАНАТТЫ ЖҰҚА ПЛЕНКАЛАРДЫҢ ТИІМДІ ЭЛЕКТРО-ОПТИКАЛЫҚ КОЭФФИЦИЕНТІН ӨЛШЕУ¹*Михайлов Н.С.*, ²*Садық Ж.О.*¹*«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан*²*МИСИС ғылым және технологиялар университеті, Мәскеу, Ресей***Автор-корреспондент e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz***Авторлар туралы ақпарат:****Михайлов Н.С.**, «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Теміртау, Қазақстан,e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz**Садық Жәдігер Орысбайұлы**, МИСИС ғылым және технологиялар университеті, Мәскеу, Ресей,<https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>; e-mail: sadzhad03@gmail.com

Аңдатпа — Қорғасын цирконат титанаты (PZT) негізіндегі электро-оптикалық (ЕО) модуляторларын жасау интеграцияланған фотоника үшін өте маңызды. PZT жұқа қабықшаларын өңдеу үшін қажетті жоғары күйдіру температурасы олардың заманауи қосымша металл-оксид-жартылай өткізгіш (CMOS) технологиясымен үйлесімділігін шектейді. Бұл жұмыста SiO₂/Si субстраттарында 450 °C төмен жасыту температурасында жоғары сапалы PZT пленкалары дайындалды. PZT фильмдері артықшылықты (100) бағдар көрсетті және біркелкі және жарықтарсыз болды. Төмен температуралы PZT пленкаларына сүйене отырып, біз кейіннен Мах-Зехдер интерферометрінің (MZI) толқындық модуляторын жобалап, жасадық. Өлшенген жарты толқындық кернеу (V_{π}) 1550 нм толқын ұзындығында 4,8 В болды, бұл оптикалық құрылғыларда әлеуетті пайдалануды көрсететін 66 pm/V сияқты құрылғыдағы ЕО коэффициентіне сәйкес келеді. Бұл жұмыста берілген нәтижелер PZT жұқа пленкаларын басқа күрделі жүйелермен біріктіру үшін үлкен перспективаны көрсетеді.

Түйін сөздер — қорғасын цирконатты титанатты пленка, төмен температура, CMOS үйлесімділігі, электро-оптикалық коэффициент.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТОНКИХ ПЛЕНОК ИЗ ДИОКСИДА ЦИРКОНАТА СВИНЦА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

^{1*}Михайлов Н.С., ²Садық Ж.О.

¹НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан

²Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

*Автор-корреспондент e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz

Информация об авторах:

Михайлов Н.С., НАО «Қарағандинский индустриальный университет», Темиртау, Казахстан,

e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz

Садық Жәдігер Орысбайұлы, Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия,

<https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>; e-mail: sadzhad03@gmail.com

Аннотация — Разработка электрооптических (ЕО) модуляторов на основе цирконат-титаната свинца (PZT) имеет решающее значение для интегрированной фотоники. Высокая температура отжига, необходимая для обработки тонких пленок PZT, ограничивает их совместимость с современной технологией дополнительного металлооксидного полупроводника (CMOS). В этой работе на подложках SiO₂/Si были изготовлены высококачественные пленки PZT при температуре отжига ниже 450 °С. Фильмы PZT показали предпочтительную (100) ориентацию и были ровными и без трещин. Основываясь на низкотемпературных пленках PZT, мы впоследствии спроектировали и разработали волновой модулятор интерферометра Мах-Зехндера (MZI). Измеренное полуволновое напряжение (V_{π}) было 4,8 В на длине волны 1550 нм, что соответствует коэффициенту ЕО в таком устройстве, как 66 pm/V, что указывает на потенциальное использование в оптических устройствах. Результаты, представленные в этой работе, открывают большие перспективы для интеграции тонких пленок PZT с другими сложными системами.

Ключевые слова — титанатная пленка с цирконатом свинца, низкая температура, совместимость с CMOS, электрооптический коэффициент.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Төмен температурада дайындалған қорғасын цирконат-титанатының (PZT) жұқа қабықшаларының құрылымдық және электрооптикалық қасиеттері зерттелді. SiO₂/Si субстраттарында 450 °С температурада жоғары сапалы (100)-бағытталған PZT пленкалары дайындалып, олардың кристалдық құрылымы, морфологиясы және элементтік құрамы рентгендік дифракция (XRD), сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM), атомдық-күштік микроскопия (AFM) және энергия-дисперсиялық спектроскопия (EDS) әдістерімен талданды. Дайындалған пленкалар негізінде Mach-Zehnder интерферометрі типіндегі толқындық электро-оптикалық модулятор әзірленіп, оның жарты толқындық кернеуі (V_{π}) және тиімді электро-оптикалық коэффициенті анықталды. Алынған нәтижелер төмен температуралы PZT пленкаларының CMOS технологияларымен үйлесімді интеграцияланған фотоникалық құрылғыларда қолдануға жоғары әлеуетке ие екенін көрсетті.

КІРІСПЕ

ЭО материалдары интегралды фотоникада ерекше және шешуші рөл атқарады [1-3]. Коммерциялық орнатылған ЕО модуляторларында LiNbO₃ жұқа пленкаларының таралуына қарамастан, олардың жоғары жылдамдықты реакциясы және төмен оптикалық жоғалуы, күрделі өңдеу және жоғары құны адамдарды жақсырақ ЕО қасиеттері мен миниатюризациялауға және балама материалдарды зерттеуге итермелейді. PZT жұқа қабықшалары модуляторды жасау үшін ЕО материалы ретінде өте перспективалы болып табылады, өйткені олардың тамаша ЕО эффектісі. Дегенмен, PZT жұқа пленкаларын жоғары күйдіру температурасымен өңдеу микроэлектромеханикалық жүйелердің (MEMS) құрылғыларын CMOS құрылғыларына тікелей біріктіру үшін кедергі жасайды. Бүгінгі күні төмен температуралы PZT толқындық модуляторларын зерттеу бойынша шектеулі зерттеулер жүргізілді [4]. Төмен температура-лық PZT негізіндегі ЭО модуляторларының қасиеттерін зерттеудің шұғыл қажеттілігі бар.

Біздің білуімізше, PZT жұқа қабықшаларын әдеттегі өңдеу үшін материалды қажетті

перовскит фазасына кристалдандыру үшін әдетте 600 °C асатын күйдіру температурасы қажет, ол тамаша ЭО қасиеттерін көрсетуімен белгілі. Мысалы, Чжу т.б. 650 °C жоғары күйдіру температурасында магнетронды шашырату әдісін қолдана отырып, Corning шыны астарларында PZT жұқа пленкаларын дайындауды көрсетті [5]. Олардың зерттеуі 185,3 pm/V EO коэффициентіне қол жеткізуді анықтады. Цю жұмысы SiO₂/Si қабатында тұндырылған жоғары (100) бағытталған PZT жұқа қабықшаларын зерттеді және 133 pm/V құрылғыдағы үлкен EO коэффициентін көрсетті. Веескман және т.б. $V_{\pi} = 7,0$ В Mach-Zehnder модуляторы арқылы 60 ГГц-тен жоғары өткізу қабілеттілігіне қол жеткізе отырып, TE оптикалық режимі үшін гибриді PZT/Si құрылғысында Mach-Zehnder модуляторын жобалау үшін айырбастарды көрсетті. Дегенмен, бұл процестер үшін қажет жасыту температурасы CMOS құрылғыларымен үйлесімді максималды жылу бюджетінен айтарлықтай асып түседі, әдетте шамамен 450 °C [8].

Бұл шектеуді еңсеру үшін төмен температурада өңдеу әдістерін әзірлеуге айтарлықтай зерттеулер жүргізілді [9]. Дегенмен, төмен температуралы PZT толқындық модуляторларын зерттеу бойынша шектеулі зерттеулер жүргізілді. Ең тиімді тәсілдердің бірі ретінде төмен температуралы золь-гельмен өңделген PZT пленкаларын әзірлеу ұзақ уақыт бойы жалғасуда, тек бірнеше сәтті нәтижелерге қол жеткізілді. Пэн және т.б. [10] шамамен 450 °C ультра төмен температурада золь-гель әдісін қолданып PZT жұқа қабықшаларын жасау туралы хабарлады және шамамен 30 мкК/см² үлкен өздігінен поляризацияны және шамамен 2900 кВ/см диэлектриктің ыдырауының жоғары беріктігін көрсетті. Такамура және т.б. [11] ерітіндінің жану синтезі әдісін қолдана отырып, шамамен 450 °C температурада үлкен қалдық поляризациясы және аз ағып кету тогы бар PZT пленкаларын жасау туралы хабарлады. Соған қарамастан, алынған PZT жұқа қабықшаларының бағдарын бақылау мүмкін болмады, ал Pt төменгі электрод ретінде пайдалану оларды жоғары оптикалық жоғалтуға байланысты фотонды технологиямен үйлеспейді. EO модуляторлары үшін төмен температураларда бағдарлауды басқару мүмкіндігі бар PZT жұқа пленкаларын шығаруға қабілетті қарапайым өндіріс процесі өте қажет [12].

Бұл жұмыста жоғары (100)-бағдарланған PZT пленкалары SiO₂/Si субстраттарында төмен жасыту температурасында (450 °C) айналдыру

әдісін қолдану арқылы дайындалған. Оптикалық құрылғыларда пайдалану әлеуетін одан әрі зерттеу үшін біз төмен температуралы PZT MZI толқындық модуляторын жасадық. Модулятордың өнімділігі де көрсетілді.

Зерттеудің маңыздылығы. Интеграцияланған фотониканың қарқынды дамуы жоғары электро-оптикалық қасиеттерге ие және кремний негізіндегі микроэлектрондық технологиялармен үйлесімді материалдарды әзірлеуді талап етеді. Қазіргі уақытта PZT жұқа қабықшалары перспективалы электро-оптикалық материалдардың бірі болып саналғанымен, оларды алу үшін көбінесе 600 °C-тан жоғары күйдіру температурасы қажет, бұл CMOS технологиясының температуралық шектеулеріне сәйкес келмейді. Осыған байланысты төмен температурада дайындалатын, жоғары кристалдық сапасы мен тиімді электро-оптикалық сипаттамаларын сақтайтын PZT жұқа қабықшаларын алу ғылыми және практикалық тұрғыдан өзекті мәселе болып табылады. Бұл зерттеу төмен температуралы технологияларды қолдану арқылы PZT негізіндегі фотондық құрылғыларды микроэлектрондық жүйелермен біріктіру мүмкіндігін кеңейтеді.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылы-ми жаңалығы SiO₂/Si субстратында 450 °C температурада жоғары (100)-бағытталған PZT жұқа қабықшаларын алу технологиясын әзірлеу және олардың құрылымдық, морфологиялық әрі электро-оптикалық қасиеттерін кешенді зерттеу болып табылады. Алғаш рет төмен температурада дайындалған PZT пленкалары негізінде Mach-Zehnder типті толқындық модулятор жасалып, 1550 нм толқын ұзындығында жарты толқындық кернеудің 4,8 В және құрылғыдағы тиімді электро-оптикалық коэффициенттің 66 pm/V мәніне жететіні көрсетілді. Алынған нәтижелер төмен температуралы PZT пленкаларының CMOS технологияларымен үйлесімді интеграцияланған фотоникалық құрылғыларды әзірлеуге жарамды екенін дәлелдейді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

PZT жұқа қабықшаларын дайындау келесідей болды: субстрат қалыңдығы 3 мкм термиялық оксид SiO₂ қабаты бар коммерциялық Si вафли болды. Таза перовскиттік құрылымды PZT жұқа қабықшаларына қол жеткізу үшін вафлидің бетіне атомдық тұқымдық қабат [15] қойылды, бұл қажетті атомдық тор бағытында PZT кристалдануын жеңілдетеді. Тұқым қабаты үшін прекурсорлық ерітінді коммерциялық лантан негізіндегі еріткіш болды [Juhe Electro-Optic (Hangzhou) Tech компаниясынан сатып

алынған. Co. Ltd., Ханчжоу, Қытай]. Айналыру жабыны алдында SiO_2/Si субстраттары ацетон, этанол және ионсыздандырылған суда дәйекті түрде шайылды, содан кейін вакуумды кептіру пешінде кептірілді. Кейіннен тазартылған вафли оттегі плазмасымен өңдеуден өтті. Содан кейін тұқым қабаттары субстраттарға айналырылды және 2-ден 5 минутқа дейін 440°C температурада ыстық плитада термиялық өңдеуге ұшырады.

PZT прекурсорлық шешімдері бұрын хабарланған процедураға негізделген әдісті қолдану арқылы дайындалды [21], шамалы өзгертулер. Атап айтқанда, Pb зольі қорғасын нитраты, аммоний нитраты және трицинді 1:1:1 молярлық қатынаста 2-метоксиэтанолда еріту арқылы дайындалды, ерітінді мөлдір, біртекті ерітіндіні қалыптастыру үшін 110°C температурада 2 сағат бойы араластырылды. Zr золь цирконил нитраты, аммоний нитраты және несепнәрді 2-метоксиэтанолда азот атмосферасында (N_2) еріту арқылы дайындалды, ал Ti зольі титан тетрайзопропанолаты, аммоний нитраты және несепнәрді 2-метоксиэтанолда төмен еріту арқылы алынды. Содан кейін Zr-Ti зольі бөлме температурасында Zr золь мен Ti зольді араластыру арқылы дайындалды. Соңында Pb золь Zr-Ti зольіне 0,5 сағат араластыра отырып қосылды, нәтижесінде тұрақты PZT зольі алынды. PZT прекурсорлық ерітіндісі тұқым қабаттарына айналырылады, содан кейін вакуум жағдайында кептіріледі, содан кейін органикалық компоненттерді жою үшін ыстық пластинада 250°C температурада 20 минут пиролизден өтеді. Үлгі үшін қыздыру және салқындату рампасының жылдамдығы $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ етіп орнатылды. Содан кейін аморфты PZT жұқа қабықшалары оттегі атмосферасында алдын ала белгіленген температурада жылдам термиялық жасыту жүйесін қолдану арқылы жасатылған. Әрбір айналыру жабыны, пиролиз және жасыту қадамы қалыңдығы шамамен 100 нм қабат берді; осылайша, 200 нм пленка қалыңдығына жету үшін процесс циклі екі рет қайталанды.

Әрі қарай, MZI толқын өткізгіші фотолитография және индуктивті байланысқан плазма (ICP) ою арқылы жасалды. Айналыру жабыны арқылы дайындалған үстіңгі қаптама қабаты PZT пленкасына қойылды, содан кейін қалыңдығы 200 ± 10 нм пленканы қалыптастыру үшін 150°C температурада 2,0 сағат бойы ыстық пластинада термиялық өңдеуден өтті. Копланарлы Al электродтары термиялық булану және көтеру процесі арқылы дайындалды.

PZT жұқа қабықшаларының кристаллографиялық құрылымдары $\text{CuK}\alpha$ сәулеленуі арқылы рентгендік дифрактометрия (XRD, Bruker D8 Advance, Бремен, Германия)

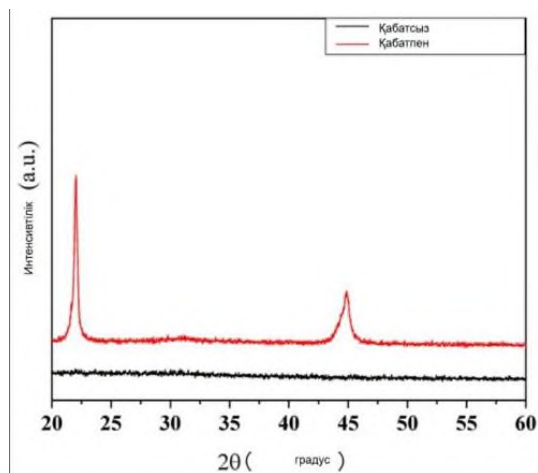
арқылы талданды. Пленкалардың көлденең қимасы мен беткі морфологиясы далалық эмиссиялық сканерлеуші электронды микроскопия (SEM, JEOL 6335F, Токио, Жапония) және атомдық күшті микроскопия (AFM) талдауымен өлшенді. PZT жұқа қабықшаларындағы құрамдас элементтердің химиялық күйлері рентгендік энергетикалық дисперсиялық спектроскоптың (EDS) көмегімен анықталды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

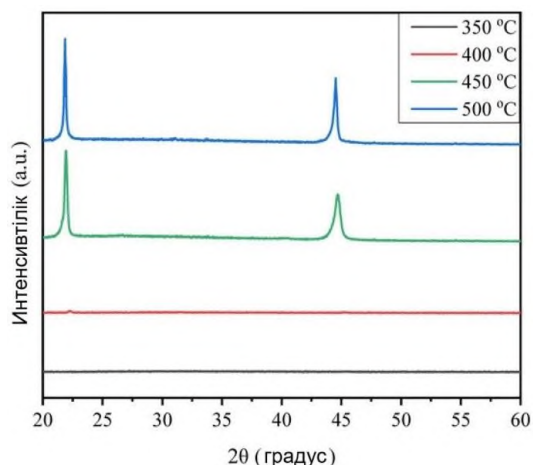
1 және 2-ші суретте 20° пен 60° аралығындағы 2θ бұрыштары үшін жазылған дифрактограммалары бар айналыру әдісі арқылы алынған PZT жұқа қабықтарының XRD үлгілері көрсетілген. 1-суретте көрсетілгендей, ол SiO_2/Si субстраттарында тұндырылған және тұқым қабаты бар немесе онсыз 450°C температурада 1,0 сағат бойы күйдірілген PZT жұқа қабықшасының XRD үлгілерін көрсетеді. Көріп отырғанымыздай, тұқымдық қабаты бар PZT жұқа қабықшасы жақсы кристалданған және жоғары консистенциялы (100) бағдар көрсетті, ал тұқым қабаты жоқ PZT қабықшасы кристалданбаған. Күтілгендей, тұқым қабатын енгізу перовскит-құрылымның қалыптасуына тиімді ықпал ете алады. $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ қабаты сыртқы ауада 440°C температурада тұқым қабатын термиялық өңдеуден кейін пайда болады деп хабарланған [9]. Бұл процесс PZT пленкасының ядролануына ықпал ететін тұрақты және жақсы анықталған тұқым қабатын құруды қамтамасыз етеді. PZT пленкасы мен $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ арасындағы тор сәйкессіздігі өте аз, теориялық тор константалары PZT үшін $4,055 \text{ \AA}$ және $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ үшін $4,076 \text{ \AA}$, нәтижесінде тордың сәйкессіздігі тек 0,505% құрайды. Бұл кішігірім сәйкессіздік PZT пленкасы мен $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ тұқымдық қабаты арасындағы жақсы тор сәйкестігін көрсетеді, бұл жоғары сапалы кристалдануға және оңтайлы электро-оптикалық өнімділікке қол жеткізуге көмектеседі. Бұл нәтижелер аралық фазаның түзілуі нуклеацияның активтену энергиясын төмендететінін көрсетеді, осылайша төмен температурада перовскит фазасын өндіруге мүмкіндік береді.

2-суретте PZT жұқа қабықшаларының оттегі атмосферасында тұқым қабаттарымен әртүрлі температурада жасытудан кейінгі фазалық эволюциясы көрсетілген. 2-суретте көрсетілген барлық PZT қабықшалары бірдей тұндырылды, содан кейін 1,0 сағат бойы 350, 400, 450 және 500°C температурада бөлек күйдірілді. PZT қабықшалары 450°C -тан төмен күйдірілген кезде аморфты болғанын және 450°C күйдірілгеннен кейін перовскит фазасына жақсы

кристалданғанын байқауға болады. Жасыту температурасы 500 °C дейін көтерілгендіктен, басқа қоспа фазасы анықталмады, бұл фазалық түрлендіру процесінің аяқталғанын көрсетеді.



Сурет 1 – Қабаты бар PZT жұқа қабықшаларының XRD үлгілері 450 °C температурада 1,0 сағат бойы күйдіруден кейін алынды.

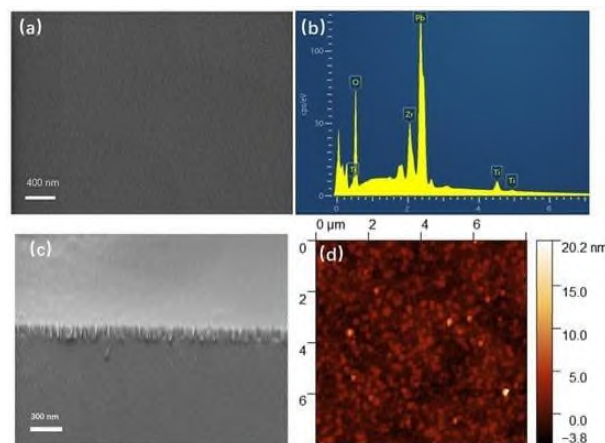


Сурет 2 – Әртүрлі температурада күйдірілген PZT жұқа пленкаларының XRD үлгілері.

Сонымен қатар, PZT пленкаларында пироксид фазасы табылмады және тұқым қабаттары сияқты (100) бағыт бойынша бірдей қолайлы бағытты бөлісетін таза перовскит құрылымы байқалды.

450 °C температурада күйдірілген PZT пленкаларының сапасын одан әрі зерттеу үшін біз элементтік құрамы мен бетінің морфологиясын көрсеттік. Жұқа қабықшалы стехиометрияны дәл бақылауды қамтамасыз ету, әсіресе Pb/Zr/Ti қатынасы, бұл жұмыста шешуші мәселе ретінде пайда болды, өйткені ол PZT жұқа қабықшаларының ЕО қасиеттеріне тікелей әсер етті. PZT жұқа қабықшаларының ЭСҚ, 3b-суретте көрсетілгендей, Pb, Zr, Ti және О болуын растайды. Бұл элементтер перовскит құрылымды PZT жұқа қабықшаларының құрамын біріктіреді.

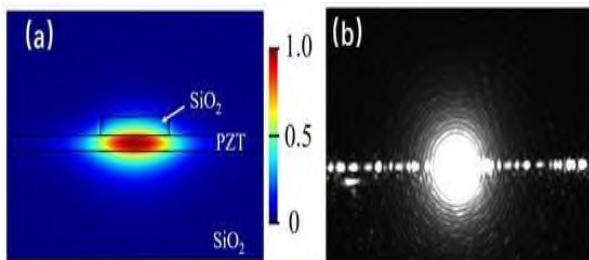
Жартылай сандық талдау одан әрі Ti және Zr мазмұнының арақатынасы шамамен 0,91 екенін көрсетеді, бұл олардың тамаша электро-оптикалық қасиеттерімен танымал морфотропты фаза шекарасы (MPB) композицияларына жақындығын көрсетеді [10]. 3c суретте пленка жақсы кристалданған және жарықтарсыз және шамамен 190 нм біркелкі қалыңдығын көрсететін PZT пленкасының көлденең қимасының SEM кескіні көрсетілген. Бетінің салыстырмалы түрде тегіс профилі болды, ол 3d-суретте көрсетілгендей, түйір өлшемі шамамен 30 нм және бетінің кедір-бұдыры шамамен 1,2 нм. Кішкентай түйір өлшемі және бетінің кедір-бұдырлығы таралу шығындарын азайтуға ықпал етті, бұл жарықтың аз шашырауына әкелді. Сонымен қатар, пленкалардың қолайлы стехиометриясы мен біртектілігі таралу шығындарын тиімді түрде азайтты, осылайша құрылғының практикалық мүмкіндіктерін арттырады.



Сурет 3 – (a) SEM арқылы бақыланатын PZT қабықшасының беткі морфологиясы. (b) PZT жұқа қабықшасының ЭСҚ. (c) Көлденең қима SEM кескіні. (d) AFM топографиялық кескіні.

Төмен температурада (450 °C) өңделген PZT жұқа қабықтарының жоғары кристалдық сапасын ескере отырып, модуляторларда тамаша электро-оптикалық әсерлер алынады деп күтілді. Фильм негізіндегі MZI толқындық модуляторы жасалды. Біздің жобамызға сәйкес, PZT пленкасының қалыңдығы 200 ± 10 нм, ал үстіңгі қаптама қабатының ені 2,0 мкм және қалыңдығы 200 ± 10 нм болды. Үстіңгі қаптау қабаты SiO₂-ден жасалған және дайындау әдісі золь-гель SiO₂ қабатын PZT пленкасына айналдыруды қамтыды, содан кейін ауада екі сатылы пісіру процесі: алдымен 120 °C температурада 2 сағат, содан кейін 150 °C температурада тағы 2 сағат. Бірлескен жазық электродтар PZT қабатының үстіне жасалды, олардың әрқайсысы қалыңдығы 200 нм алюминий қабатынан тұрады, олардың арасындағы қашықтық 6,0 мкм. 4a-суретте

Lumerical оптикалық режимді есептеу арқылы имитацияланған толқын өткізгіштегі негізгі TE режимі көрсетілген. Модельдеуде сыну көрсеткіштері PZT пленкасы үшін 2,40 және 1550 нм толқын ұзындығында SiO_2 қабаты үшін 1,44 болды [23]. Оптикалық өрістердің PZT жұқа қабықшасының ішінде 42% шектеу коэффициентімен шектелгенін көруге болады.



Сурет 4 – (а) толқындық модулятордағы модельденген оптикалық модель профилі; (b) CCD камерасы жинаған TE режимінің шығыс жарығы.

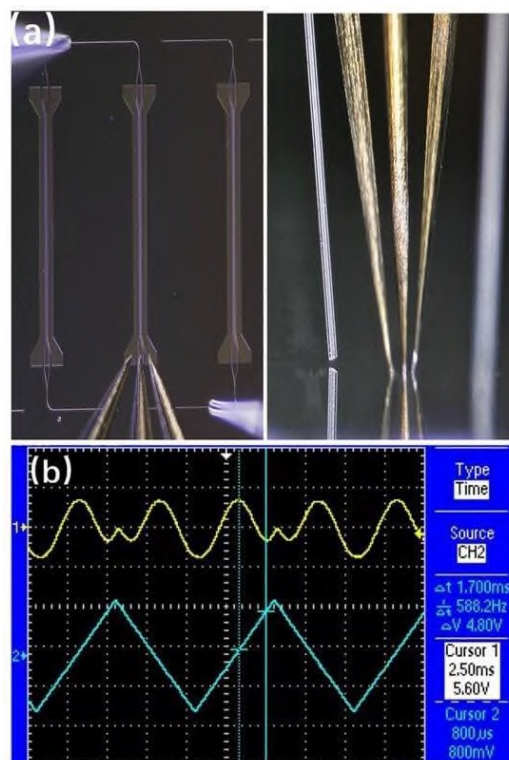
Жоғарыда сипатталған дизайн негізінде PZT MZI толқындық модуляторы 5a-суретте көрсетілгендей жасалды. Интерферометрдің егжей-тегжейлі схемалық диаграммасы енгізілген, ол толқын өткізгіш үлгісін, сондай-ақ электр контактілерінің орналасуы мен орналасуын анық көрсетеді. Кейіннен құрылғы соңғы бетті біріктіру жүйесі арқылы өлшеуден өтті. 1550 нм толқын ұзындығында жұмыс істейтін лазердің кіріс жарығы поляризацияны сақтайтын талшық арқылы құрылғыға қосылды. 4b суретінде кіріс жарығы TE бағытында поляризацияланған кезде ПЗС түсірген шығыс жарығы көрсетілген. Толқынбағдарлама ішінде TE режимінің сәтті таралуын көрсететін ерекше бір режимді үлгі байқалды. 60 °C температурада 1,0 сағат бойы 100 В оңтайландырылған жағдайда полюстен кейін модулятордың $V\pi$ мәні жіберілетін жарықтың қарқындылығы мен қолданылатын айнымалы ток кернеуі арасындағы корреляцияны өлшеу арқылы анықталды. 5b-суретте бейнеленген айқын модуляция шығыс функциясының негізінде 1 кГц жиілікте 4,8 В болатын $V\pi$ өлшенді. Құрылғыдағы ЭО коэффициентін (1) [15] теңдеуінің көмегімен есептеуге болады:

$$\gamma_{33} = -\frac{GV\pi L}{n^3GV_{\pi}L} \quad (1)$$

мұндағы λ операциялық толқын ұзындығын көрсетеді; g – электродаралық қашықтық (мұнда, $g = 6,0$ мкм); G оптикалық режим мен қолданылатын электр өрісі арасындағы қабаттасу коэффициентін білдіреді ($G = 0,5$); және n – толқын өткізгіштің тиімді сыну көрсеткіші. Құрылғыдағы ЭО

коэффициенті үшін $n^3 = n_{eff}^3 = 5,83$. Электрод ұзындығы (L) 1,0 см болғанда модулятордың кернеу-ұзындық өнімі ($V\pi L$) 4,8 В·см болды. Құрылғыдағы ЭО коэффициенті өлшенген $V\pi L$ және қолданылған теңдеу негізінде 66 pm/V деп бағаланды. Бұл ЭО модуляторларына арналған LiNbO_3 жұқа пленкаларынан екі есе үлкен. Бұл нәтижелер төмен температурада өңделген PZT жұқа пленкаларының ЭО модуляторларын қолдану үшін жарамдылығын растайтынын анық көрсетеді. Төмен температуралы PZT пленкаларының ЭО коэффициенті жоғары температуралы PZT пленкаларына қарағанда төмен болғанымен, олардың CMOS технологиясымен үйлесімділігі электронды құрылғыларға интеграцияланудың перспективасын ұсынады, осылайша қолданбалардың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

1-кестеде біз жалпы материалдардың электро-оптикалық қасиеттерін салыстырамыз, соның ішінде LiNbO_3 пленкасы, BaTiO_3 пленкасы, жоғары температуралы PZT пленкасы және осы тәжірибеде зерттелген төмен температуралы PZT пленкасы. Кестеден біздің төмен температуралы PZT пленкасының CMOS үйлесімділігі тұрғысынан айтарлықтай артықшылықтар беретіні анық.



Сурет 5 – (а) Электр контактілерінің орналасуы мен орналасуын көрсететін төмен температуралы PZT негізіндегі MZI модуляторының фотосуреті. (b) 1 КГц үшбұрышты сигналы бар жарты толқындық кернеу ($V\pi$) көрсетілген; осы қуат үшін PZT негізіндегі MZI модуляторының сипаттамалық кернеуі 1550 нм кезінде 4,8 В.

Кесте 1 – Жиі қолданылатын материал пленкаларының ЭО қасиеттері.

Материал	Өңдеу температура-сы	ЭО Коэф-цент	CMOS үйлесімділік
LiNbO ₃	--	31 pm/V	-
BaTiO ₃	660 °C	213 pm/V	-
Жоғары температура PZT	≥600 °C	133 pm/V	-
Төмен-температура PZT	450 °C	66 pm/V	+

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, біз SiO₂/Si субстратында 450 °C күйдіру температурасында жақсы кристалданған PZT жұқа қабықшаларын сәтті дайындадық. Пленкалардың құрылымдық талдауы жарықсыз және тегіс беті бар күшті артықшылықты (100) өсу бағдарларын анықтады. Төмен температуралы PZT пленкаларының негізінде MZI толқындық модуляторы жобаланған және жасалған. Атап айтқанда, өлшенген V_л 4,8 В электрод ұзындығы L 1,0 см толқын ұзындығы 1550 нм, бұл құрылымдағы әсерлі EO коэффициентін 66 pm/V дейін береді. Жоғарыда келтірілген нәтижелер төмен температуралы PZT пленкаларының перспективалы EO қасиеттерін ашады, бұл PZT негізіндегі құрылымдарды өңдеудің төмен температураларында әзірлеудегі елеулі жетістіктерді білдіреді. Бұл нәтижелер біріктірілген фотоника қолданбалары үшін айтарлықтай коммерциялық әлеуетке ие.

АВТОРЛАРДЫҢ ҮЛЕСІ

(таксономия CRediT):

Михайлов Н.С. – Концептуализация; Әдістеме; Зерттеуді басқару; Ресурстар; Қолжазбаны қарау және редакциялау.

Садық Ж.О. – Деректерді жинау; Формалды талдау; Деректерді визуализациялау; Бағдарламалық қамтамасыз ету; Қолжазба-ның бастапқы нұсқасын дайындау.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

АЛҒЫС

Автор зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін «Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ-на алғыс білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Thomaschewski, M.; Bozhevolnyi, S.I. Pockels modulation in integrated nanophotonics. Appl. Phys. Rev. 2022, 9, 021311.
- [2] Kieninger, C.; Kutuvantavida, Y.; Elder, D.L.; Wolf, S.; Zwickel, H.; Blaicher, M.; Kemal, J.N.; Lauermann, M.; Randel, S.; Freude, W.; et al. Ultra-high electro-optic activity demonstrated in a silicon-organic hybrid modulator. Optica 2018, 5, 739–748.
- [3] Hamze, A.K.; Reynaud, M.; Geler-Kremer, J.; Demkov, A.A. Design rules for strong electro-optic materials. NPJ Comput. Mater. 2020, 6, 130.
- [4] Vazimali, M.G.; Fathpour, S. Applications of thin-film lithium niobate in nonlinear integrated photonics. Adv. Photon. 2022, 4, 034001.
- [5] Qi, Y.; Li, Y. Integrated lithium niobate photonics. Nanophotonics 2020, 9, 1287–1320.
- [6] Alexander, K.; George, J.P.; Verbist, J.; Neyts, K.; Kuyken, B.; Thourhout, D.V.; Beeckman, J. Nanophotonic Pockels modulators on a silicon nitride platform. Nat. Commun. 2018, 9, 3444.
- [7] Izyumskaya, N.; Alivov, Y.I.; Cho, S.J.; Morkoç, H.; Lee, H.; Kang, Y.S. Processing, Structure, Properties, and Applications of PZT Thin Films. Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 2007, 32, 111–202.

- [8] Picavet, E.; Geest, K.D.; Lievens, E.; Rijckaert, H.; Vandekerckhove, T.; Solano, E.; Deduytsche, D.; Van Bossele, L.; Van Thourhout, D.; De Buysser, K.; et al. Solution-Processed Pb(Zr, Ti)O₃ Thin Films with Strong Remnant Pockels Coefficient. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2024, 16, 41134–41144.
- [9] George, J.P.; Smet, P.F.; Botterman, J.; Bliznuk, V.; Woestenborghs, W.; Thourhout, D.V.; Neyts, K.; Beeckman, J. Lanthanide-Assisted Deposition of Strongly Electro-optic PZT Thin Films on Silicon: Toward Integrated Active Nanophotonic Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2015, 7, 13350.
- [10] Zhu, M.; Zhang, H.; Dua, Z.; Liu, C. Structural insight into the optical and electro-optic properties of lead zirconate titanate for high-performance photonic devices. *Ceram. Int.* 2019, 45, 22324–22330.
- [11] Bassiri-Gharb, N.; Bastani, Y.; Bernal, A. Chemical solution growth of ferroelectric oxide thin films and nanostructures. *Chem. Soc. Rev.* 2014, 43, 2125–2140.
- [12] Dey, S.K.; Budd, K.D.; Payne, D.A. Thin-film ferroelectrics of PZT of sol-gel processing. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 1988, 35, 80–81.

REFERENCES

- [1] Thomaschewski, M.; Bozhevolnyi, S.I. Pockels modulation in integrated nanophotonics. *Appl. Phys. Rev.* 2022, 9, 021311.
- [2] Kieninger, C.; Kutuvantavida, Y.; Elder, D.L.; Wolf, S.; Zwickel, H.; Blaicher, M.; Kemal, J.N.; Lauermann, M.; Randel, S.; Freude, W.; et al. Ultra-high electro-optic activity demonstrated in a silicon-organic hybrid modulator. *Optica* 2018, 5, 739–748.
- [3] Hamze, A.K.; Reynaud, M.; Geler-Kremer, J.; Demkov, A.A. Design rules for strong electro-optic materials. *NPJ Comput. Mater.* 2020, 6, 130.
- [4] Vazimali, M.G.; Fathpour, S. Applications of thin-film lithium niobate in nonlinear integrated photonics. *Adv. Photon.* 2022, 4, 034001.
- [5] Qi, Y.; Li, Y. Integrated lithium niobate photonics. *Nanophotonics* 2020, 9, 1287–1320.
- [6] Alexander, K.; George, J.P.; Verbist, J.; Neyts, K.; Kuyken, B.; Thourhout, D.V.; Beeckman, J. Nanophotonic Pockels modulators on a silicon nitride platform. *Nat. Commun.* 2018, 9, 3444.
- [7] Izyumskaya, N.; Alivov, Y.I.; Cho, S.J.; Morkoç, H.; Lee, H.; Kang, Y.S. Processing, Structure, Properties, and Applications of PZT Thin Films. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2007, 32, 111–202.
- [8] Picavet, E.; Geest, K.D.; Lievens, E.; Rijckaert, H.; Vandekerckhove, T.; Solano, E.; Deduytsche, D.; Van Bossele, L.; Van Thourhout, D.; De Buysser, K.; et al. Solution-Processed Pb(Zr, Ti)O₃ Thin Films with Strong Remnant Pockels Coefficient. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2024, 16, 41134–41144.
- [9] George, J.P.; Smet, P.F.; Botterman, J.; Bliznuk, V.; Woestenborghs, W.; Thourhout, D.V.; Neyts, K.; Beeckman, J. Lanthanide-Assisted Deposition of Strongly Electro-optic PZT Thin Films on Silicon: Toward Integrated Active Nanophotonic Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2015, 7, 13350.
- [10] Zhu, M.; Zhang, H.; Dua, Z.; Liu, C. Structural insight into the optical and electro-optic properties of lead zirconate titanate for high-performance photonic devices. *Ceram. Int.* 2019, 45, 22324–22330.
- [11] Bassiri-Gharb, N.; Bastani, Y.; Bernal, A. Chemical solution growth of ferroelectric oxide thin films and nanostructures. *Chem. Soc. Rev.* 2014, 43, 2125–2140.
- [12] Dey, S.K.; Budd, K.D.; Payne, D.A. Thin-film ferroelectrics of PZT of sol-gel processing. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 1988, 35, 80–81