

FTAMP 29.17.33  
ЭОЖ 538.958[DOI 10.53002/092](https://doi.org/10.53002/092)

Михайлов Н. С.

*Қарағанды индустриялық университеті, г. Темиртау, Қазақстан  
(E-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz)***Төмен температурада дайындалған қорғасын цирконатты титанатты жұқа пленкалардың тиімді электро-оптикалық коэффициентін өлшеу**

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 SiO<sub>2</sub>/Si субстраттарында 450 °С 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 ( $V\pi$ ) 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.

*Кіріспе.*

ЭО материалдары интегралды фотоникада ерекше және шешуші рөл атқарады [1,2,3]. Коммерциялық орнатылған ЕО модуляторларында LiNbO<sub>3</sub> жұқа пленкаларының таралуына қарамастан, олардың жоғары жылдамдықты реакциясы және төмен оптикалық жоғалуы [4,5], 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 [6,7,8,9]. 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. Төмен температуралық 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 °С асатын күйдіру температурасы қажет, ол тамаша ЭО қасиеттерін көрсетуімен белгілі [10,11,12,13,14]. Мысалы, Чжу т.б. [10] 650 °С жоғары күйдіру температурасында магнетронды шашырату әдісін қолдана отырып, Corning шыны астарларында PZT жұқа пленкаларын дайындауды көрсетті. Олардың зерттеуі 185,3 pm/V ЕО коэффициентіне қол жеткізуді анықтады. Цю жұмысы SiO<sub>2</sub>/Si қабатында тұндырылған жоғары (100) бағытталған PZT жұқа қабықшаларын зерттеді және 133 pm/V құрылғыдағы үлкен ЕО коэффициентін көрсетті [15]. 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 [16]. Дегенмен, бұл процестер үшін қажет жасыту температурасы CMOS құрылғыларымен үйлесімді максималды жылу бюджетінен айтарлықтай асып түседі, әдетте шамамен 450 °С [17].

## Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

Бұл шектеуді еңсеру үшін төмен температурада өңдеу әдістерін әзірлеуге айтарлықтай зерттеулер жүргізілді [18,19]. 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. [20] шамамен 450 °C ультра төмен температурада золь-гель әдісін қолданып PZT жұқа қабықшаларын жасау туралы хабарлады және шамамен 30 мкК/см<sup>2</sup> үлкен өздігінен поляризацияны және шамамен 2900 кВ/см диэлектриктің ыдырауының жоғары беріктігін көрсетті. Такамура және т.б. [21] 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 [22]. EO модуляторлары үшін төмен температураларда бағдарлауды басқару мүмкіндігі бар PZT жұқа пленкаларын шығаруға қабілетті қарапайым өндіріс процесі өте қажет.

Бұл жұмыста жоғары (100)-бағдарланған PZT пленкалары SiO<sub>2</sub>/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.

### Методология.

PZT жұқа қабықшаларын дайындау келесідей болды: субстрат қалыңдығы 3 мкм термиялық оксид SiO<sub>2</sub> 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]. Айналдыру жабыны алдында SiO<sub>2</sub>/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 айналдырылды 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 зольі цирконил нитраты, аммоний нитраты және несепнәрді 2-метоксиэтанолда азот атмосферасында (N<sub>2</sub>) еріту арқылы дайындалды, ал Ti зольі титан тетраизопропанолаты, 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 айналдырылады, 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 °C/мин етіп орнатылды. Содан кейін аморфты PZT жұқа қабықшалары оттегі атмосферасында алдын ала белгіленген температурада жылдам термиялық жасыту жүйесін қолдану арқылы жасытылған. Әрбір айналдыру 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. Айналдыру 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. Ко-планарлы Al электродтары термиялық булану және көтеру процесі арқылы дайындалды.

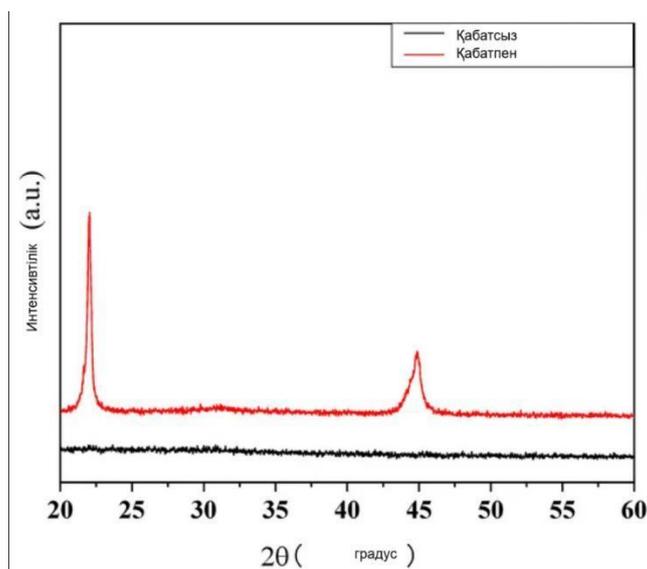
## Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

PZT жұқа қабықшаларының кристаллографиялық құрылымдары CuKa 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.

### Зерттеу нәтижелері.

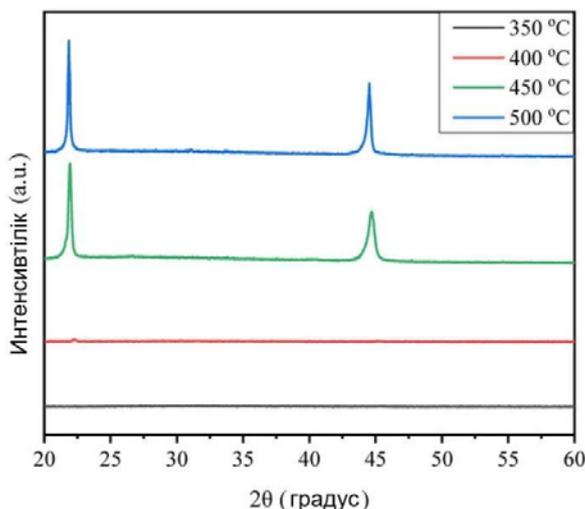
1-сурет пен 2-суретте  $20^\circ$  пен  $60^\circ$  аралығындағы  $2\theta$  бұрыштары үшін жазылған дифрактограммалары бар айналдыру әдісі арқылы алынған PZT жұқа қабықтарының XRD үлгілері көрсетілген. 1-суретте көрсетілгендей, ол SiO<sub>2</sub>/Si субстраттарында тұндырылған және тұқым қабаты бар немесе онсыз  $450^\circ\text{C}$  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. La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> қабаты сыртқы ауада  $440^\circ\text{C}$  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 La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> арасындағы тор сәйкессіздігі өте аз, теориялық тор константалары PZT үшін  $4,055 \text{ \AA}$  және La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> үшін  $4,076 \text{ \AA}$ , нәтижесінде тордың сәйкессіздігі тек  $0,505\%$  құрайды. Бұл кішігірім сәйкессіздік PZT пленкасы мен La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 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 жасырудан кейінгі фазалық эволюциясы көрсетілген. 2-суретте көрсетілген барлық PZT қабықшалары бірдей тұндырылды, содан кейін  $1,0$  сағат бойы  $350$ ,  $400$ ,  $450$  және  $500^\circ\text{C}$  температурада бөлек күйдірілді. PZT қабықшалары  $450^\circ\text{C}$ -тан төмен күйдірілген кезде аморфты болғанын және  $450^\circ\text{C}$  күйдірілгеннен кейін перовскит фазасына жақсы кристалданғанын байқауға болады. Жасыту температурасы  $500^\circ\text{C}$  дейін көтерілгендіктен, басқа қоспа фазасы анықталмады, бұл фазалық түрлендіру процесінің аяқталғанын көрсетеді. Сонымен қатар, PZT пленкаларында пироклорлы фаза табылмады және тұқым қабаттары сияқты (100) бағыт бойынша бірдей қолайлы бағытты бөлісетін таза перовскит құрылымы байқалды.



**Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»**

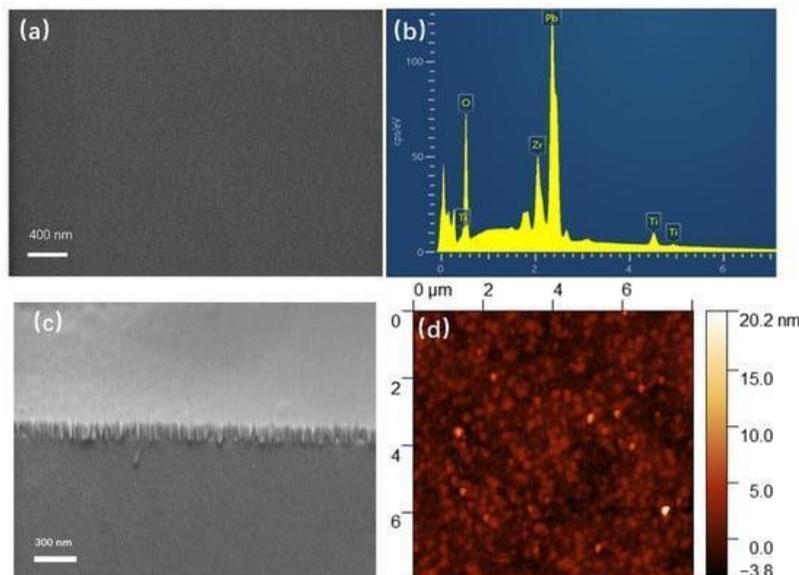
Сурет 1. Қабаты бар PZT жұқа қабықшаларының XRD үлгілері 450 °С температурада 1,0 сағат бойы күйдіруден кейін алынды.



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

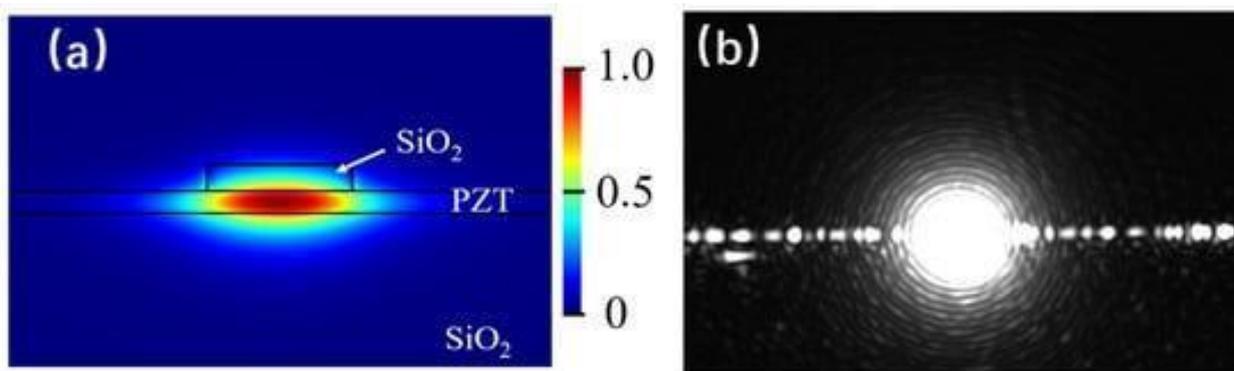
450 °С температурада күйдірілген PZT пленкаларының сапасын одан әрі зерттеу үшін біз элементтік құрамы мен бетінің морфологиясын көрсеттік. Жұқа қабықшалы стехиометрияны дәл бақылауды қамтамасыз ету, әсіресе Pb/Zr/Ti қатынасы, бұл жұмыста шешуші мәселе ретінде пайда болды, өйткені ол PZT жұқа қабықшаларының ЕО қасиеттеріне тікелей әсер етті. PZT жұқа қабықшаларының ЭСК, 3b-суретте көрсетілгендей, Pb, Zr, Ti және O 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]. 3с 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.

**Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»**



Сурет 3. (a) SEM арқылы бақыланатын PZT қабықшасының беткі морфологиясы. (b) PZT жұқа қабықшасының ЭСК. (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  $200 \pm 10$  нм, ал үстіңгі қаптама қабатының ені 2,0 мкм және қалыңдығы  $200 \pm 10$  нм болды. Үстіңгі қаптау қабаты SiO<sub>2</sub>-ден жасалған және дайындау әдісі золь-гель SiO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> қабаты үшін 1,44 болды [23]. Оптикалық өрістердің PZT жұқа қабықшасының ішінде 42% шектеу коэффициентімен шектелгенін көруге болады.



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

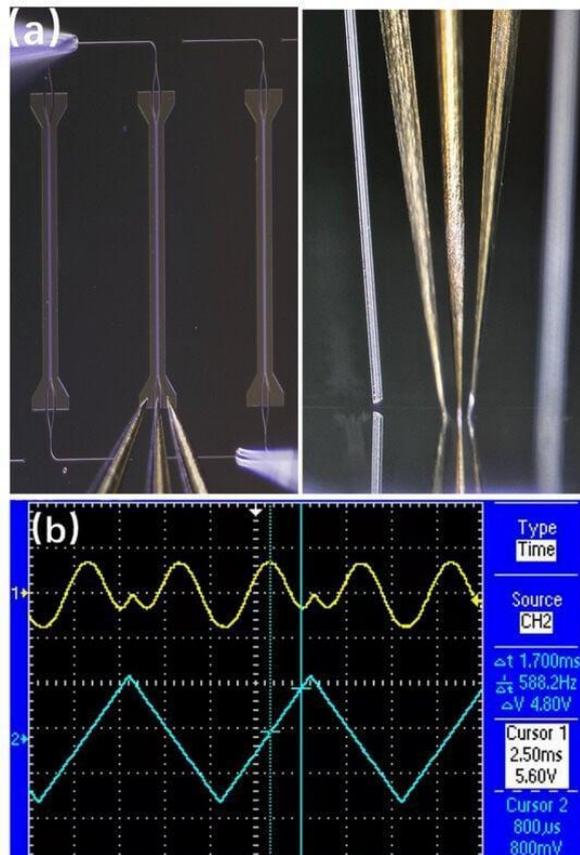
Жоғарыда сипатталған дизайн негізінде PZT MZI толқындық модуляторы 5a-суретте көрсетілгендей жасалды. Интерферометрдің егжей-тегжейлі схемалық диаграммасы енгізілген, ол толқын өткізгіш үлгісін, сондай-ақ электр контактілерінің орналасуы мен орналасуын анық көрсетеді. Кейіннен құрылғы соңғы бетті біріктіру жүйесі арқылы өлшеуден өтті. 1550 нм толқын ұзындығында

## Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

жұмыс істейтін лазердің кіріс жарығы поляризацияны сақтайтын талшық арқылы құрылғыға қосылды. 4b суретінде кіріс жарығы ТЕ бағытында поляризацияланған кезде ПЗС түсірген шығыс жарығы көрсетілген. Толқынбағдарлама ішінде ТЕ режимінің сәтті таралуын көрсететін ерекше бір режимді үлгі байқалды. 60 °С температурада 1,0 сағат бойы 100 В оңтайландырылған жағдайда полустен 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:

$$\gamma_{33} = \Gamma V \pi L \frac{\lambda g}{n^3 \Gamma V \pi L}$$

мұндағы  $\lambda$  операциялық толқын ұзындығын көрсетеді;  $g$  – электродаралық қашықтық (мұнда,  $g = 6,0$  мкм);  $\Gamma$  оптикалық режим мен қолданылатын электр өрісі арасындағы қабаттасу коэффициентін білдіреді ( $\Gamma = 0,5$ ); 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<sub>3</sub> 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 перспективалы жолын ұсынады, осылайша қолданбалардың жаңа мүмкіндіктерін ашады.



Сурет 5. (а) Электр контактілерінің орналасуы мен орналасуын көрсететін төмен температуралы PZT негізіндегі MZI модуляторының фотосуреті. (б) 1 КГц үшбұрышты сигналы бар жарты

**Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»**

толқындық кернеу ( $V\pi$ ) көрсетілген; осы қуат үшін PZT негізіндегі MZI модуляторының сипаттамалық кернеуі 1550 нм кезінде 4,8 В.

1-кестеде біз жалпы материалдардың электро-оптикалық қасиеттерін салыстырамыз, соның ішінде LiNbO<sub>3</sub> пленкасы, BaTiO<sub>3</sub> 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.

Кесте 1. Жиі қолданылатын материал пленкаларының ЭО қасиеттері.

Материал	Өңдеу температурасы	ЭО коэффициент	CMOS үйлесімділік
LiNbO <sub>3</sub>	--	31 pm/V	-
BaTiO <sub>3</sub>	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 SiO<sub>2</sub>/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  $V\pi$  4,8 В электрод ұзындығы  $L$  1,0 см толқын ұзындығы 1550 нм, бұл құрылғыдағы әсерлі EO коэффициентін 66 pm/V дейін береді. Жоғарыда келтірілген нәтижелер төмен температуралы PZT пленкаларының перспективалы EO қасиеттерін ашады, бұл PZT негізіндегі құрылғыларды өңдеудің төмен температураларында әзірлеудегі елеулі жетістіктерді білдіреді. Бұл нәтижелер біріктірілген фотоника қолданбалары үшін айтарлықтай коммерциялық әлеуетке ие.

*Әдебиет*

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.

**Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»**

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)O<sub>3</sub> 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.

Михайлов Н. С.

**Измерение эффективного электрооптического коэффициента тонких пленок из диоксида цирконата свинца, изготовленных при низких температурах**

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 SiO<sub>2</sub>/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-Зехдера (MZI). Измеренное полуволновое напряжение ( $V_{\pi}$ ) 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.

Mikhailov N. S.

**Measurement of the effective electro-optical coefficient of thin films of lead zirconate dioxide produced at low temperatures**

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 SiO<sub>2</sub>/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 ( $V_{\pi}$ ) 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.

**Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»**

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

## 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)O<sub>3</sub> 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.