

Технолошки факултет Нови Сад

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовao комисију 07.07.2017. Наставно-научно веће Технолошког факултета Нови Сад, Универзитет у Новом Саду</p> <p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Председник: Горан Стојановић, редовни професор, Електроника, изабран 21.10.2015., Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду - Ментор/члан: Владимир В. Срдић, редовни професор, Неорганске технологије и материјали, изабран 19.10.2006., Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду - члан: Марија Милановић, доцент, Инжењерство материјала, изабрана 01.10.2015., Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду - члан: Иван Стијеповић, научни сарадник, Техничко-технолошке науке, Технолошко инжењерство, изабран 25.09.2013., Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду - члан: Јелена Бобић, виши научни сарадник, Природно-математичке науке-Хемија, изабрана: 31.10.2018. Институт за мултидисциплинарна истраживања, Универзитет у Београду
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Јелена (Ђорђе) Вукмировић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: 08.11.1987. Сомбор, Србија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив Универзитет у Новом Саду, Технолошки факултет Нови Сад, Инжењерство материјала, Мастер инжењер технологије</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија 2012, Инжењерство материјала, , Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду</p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:</p> <p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:</p>
III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:
<p>Добијање нанокристалних баријум титанатних филмова дефинисане структуре и својстава за примену у микроталасним тунабилним уређајима</p>

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Докторска дисертација маг. инж. технол. Јелене Вукмировић је подељена у шест поглавља:

Увод (стр. 1–2),

Теорисјки део (стр. 3–25),

Експериментани део (стр. 26–40),

Резултати и дискусија (стр. 41–81),

Закључак (стр. 82–84),

Литература (стр. 85–95).

Докторска дисертација кандидата написана је на 95 страна А4 формата, садржи 96 слика, 5 табела и 118 литературних навода. Кључу докумантација и кратак извод (на српском и енглеском) дати су на почетку тезе.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

У *Уводу* је укратко описан значај минијатуризације електронских компоненти у савременом животу, као и улога танких фероелектричних филмова на бази баријум титаната у таквим компонентама, са посебним освртом на примену у микроталасним технологијама.

Структура и својства танких фероелектричних филмова на бази баријум титаната обрађени су у *Теоријском делу* тезе. Утицај допаната стронцијума и цирконијума, који су коришћени за модификацију структуре и својстава баријум титанатних танких филмова у оквиру тезе, представљен је кроз литературни преглед. Такође, објашњен је значај процесних параметара током синтезе и депозиције танких филмова, као и значај одабира супстрата на структурна и функционална својства танких баријум стронцијум титанатних и баријум цирконијум титанатних филмова. Значај дизајна функционалног слоја и електрода специфичних геометрија, за примену у микроталасним технологијама, као и за мерење тунабилности, је такође описан кроз литературни преглед. У теоријском делу обрађене су и технике депозиције континуалних танких филмова (спин техника), као и филмова специфичних геометрија (инкџет штампа и фотолитографија).

Експериментални део тезе описује сам ток извођења експеримената, од избора техника синтезе и депозиције танких филмова на бази чистог и допираног баријум титаната до карактеризације. У првом делу обрађена је синтеза баријум титанатних прекурсорских солова сол-гел методом, са додатком адитива глицерола и формамида у циљу прилагођавања њихових реолошких својстава техници инкџет штампе. Такође, обрађена је и синтеза солова где је део Ba^{2+} или Ti^{4+} јона, замењен јонима Sr^{2+} или Zr^{4+} , респективно, за припрему филмова спин депозицијом. Детаљно су описани услови током депозиције филмова (функционалног слоја и електрода) спин техником, инкџет штампом и фотолитографијом, при чему је шематски представљен дизајн електрода специфичних геометрија које су припремљене у оквиру рада.

У поглављу *Резултати и дискусија* прво је представљени су танки филмови на бази баријум титаната добијени техником инкџет штампе. Показано је да се модификација реолошких својстава солова може вршити додатком адитива формамида и/или глицерола да би се добили притабилни солови. Приказана је карактеризација од одштампаних филмова на бази баријум титаната, при чему је штампа извршена са различитим размаком између две суседне капљице и утврђено је да штампа са преклапањем на половини пречника капљице обезбеђује најбољу покривеност супстрата филмом, без присуства дефеката на површини. Такође је утврђено да је могуће одштампати линије минималне ширине 60 μm . У другом делу приказани су резултати структурне и функционалне карактеризације петослојних танких $BaTiO_3$, $Ba_{1-x}Sr_xO_3$ ($x = 0,1, 0,2, 0,3$ и $0,4$) и $BaTi_{(x-1)}Zr_xO_3$ ($x = 0,1$ и $0,2$) припремљених спин техником. Скенирајућа електронска микроскопија и микроскопија атомских сила потврдиле су да припремљени филмови поседују веома фину структуру са величином зрна од неколико десетина нанометара, док дебљина филма износи око 300 nm. Рентгеноструктурна анализа показала је формирање баријум титаната код филмова без допаната, док је код филмова са додатком Sr^{2+} или Zr^{4+} потврђено да су се уградиле у структуру. Раманова спектроскопија је указала на смањење тетрагоналности са додатком Sr^{2+} или Zr^{4+} , што су накнадно потврдиле и фероелектрична мерења. Финално, приказани су резултати припреме електрода специфичних геометрија различитим техникама. Техника спатеровања у комбинацији са ласерски

уклањањем (Nd:YAG ласер) показала се као неадекватна за припрему електрода на $Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO_3$ танким филмовима услед нагомилавања уклоњеног материјала у виду острваца на површини самог филма. Кружне електроде припремљене инкџет штампом показале су да ова техника може бити корисна код припреме комплексних геометрија са деловима ширине од неколико десетина до неколико стотина микрометара, док се фотолитографија показала као погодна техника за израду најфинијих структура где поједини делови имају ширину од свега 3 – 4 nm.

У последњем поглављу сумирани су закључци добијени на основу теоријских сазнања и урађених истраживања, при чему је потврђена постављена хипотеза која је дефинисана приликом пријаве ове тезе.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Научни радови у часописима категорије M21

1. Dj. Tripkovic, J. Vukmirovic, B. Bajac, N. Samardzic, E. Djurdjic, G. Stojanovic, V. V. Srdic, Inkjet patterning of in situ sol-gel derived barium titanate thin films, *Ceramics International*, 42 (2016) 1840-1846

Научни радови у часописима категорије M22

1. J. Vukmirović, Dj. Tripković, B. Bajac, S. Kojić, G. M. Stojanović, V. V. Srdić, Comparison of barium titanate thin films prepared by inkjet printing and spin coating, *Processing and Application of Ceramics* 9 [3] (2015) 151-156
2. B. Bajac, J. Vukmirović, Dj. Tripković, E. Djurdjić, J. Stanojević, Ž. Cvejić, B. Škorić, V. V. Srdić, Structural characterization and dielectric properties of $BaTiO_3$ thin films obtained by spin coating, *Processing and Application of Ceramics* 8 [4] (2014) 219-224
3. B. Bajac, J. Vukmirović, I. Tokić, S. Ognjanović, V. V. Srdić, Synthesis and characterization of $BaTiO_3/NiFe_2O_4$ *Processing and Application of Ceramics* 7 [1] (2013) 15-20

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру тезе презентовани су резултати структурне и функционалне карактеризације танких филмова на бази чистог баријум титаната и филмова где је део Ba^{2+} или Ti^{4+} јона, замењен јонима Sr^{2+} или Zr^{4+} , респективно, као и специфичан дизајн филмова и електрода, све у циљу примене у микроталасним технологијама.

Истраживања су показала да је додатком формамида и/или глицерола могуће модификовати реолошка својства баријум титанатних солова концентрација од 0,25 М до 1 М и прилагодити их потребама инксет штампе. 0,5 М солова сад додатком оба адитива показали су оптимална реолошка својства за штампу, при чему дебљина одштампаних филмова након термичког третмана на $750\text{ }^\circ\text{C}$ износи око 200 nm, површина је хомогена, без присуства пукотина, док структурна карактеризација потврђује формирање нанокристалног баријум титаната. Истраживања везана за утицај размака између две суседне капљице током штампе, показала су да оптималан размак одговара половини пречника појединачне капљице, при чему се добијају хомогени филмови.

Спин техником су припремљени петослојни танки филмови BaTiO_3 , $\text{Ba}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{O}_3$ ($x = 0,1, 0,2, 0,3$ и $0,4$) и $\text{BaTi}_{(x-1)}\text{Zr}_x\text{O}_3$ ($x = 0,1$ и $0,2$) који су синтеровани на температурама од 750 до 1000 $^\circ\text{C}$. Скенирајућа електронска микроскопија и микроскопија атомских сила показале су да дебљина припремљених петослојних филмова износи ~ 300 nm, да су филмови наноструктурни са величином зрна од неколико десетина нанометара, као и да величина зрна и густина филмова расту са порастом температуре синтеровања. Структурном карактеризацијом потврђено је формирање тетрагоналне фазе баријум титаната код узорака без додатка стронцијума и цирконијума, што је потврђено и функционалном карактеризацијом. Локално фероелектрично понашање чистог BaTiO_3 потврђено је микроскопијом са пиезоелектричним ефектом из чега се закључује како су зрна носиоци фероелектричног понашања, док хистерезисна зависност поларизације од јачине електричног поља указује на фероелектричну природу целог филма. Са порастом концентрације допаната Sr^{2+} или Zr^{4+} у BaTiO_3 танким филмовима уочено је смањење тетрагоналности, што је потврђено фероелектричним мерењима где су уочене промене хистерезиса које указују на смањење фероелектричности. На основу структурне и функционалне карактеризације потврђено је да $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3$ и $\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3$ танки филмови имају потенцијално велику примену при изради тунабилних микроталасних уређаја.

Припрема електрода на површини $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3$ танких филмова извршена је техником спатеровања у комбинацији са ласерским уклањањем, инксет штампом и фотолитографијом. Све наведене технике показале су се корисним у припреми електроде специфичних геометрија, међутим разликују се у прецизности. Техником спатеровања припремљене су електроде задатих димезија, међутим примећују се наслаге материјала у виду острва на самој површини филма настале таложењем уклоњеног материјала, те је закључено да коришћена снага ласера није била погодна за припрему електрода на $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3$ танким филмовима. Инксет штампа се показала као погодна техника за израду електрода специфичних геометрија са ширином појединих делова димензија од неколико десетина до неколико стотина микромететара. Такође, код електрода одштампаних са размаком од 24 μm између две суседне капљице потврђена је велика прецизност депозиције, па је на ивицама електрода могуће уочити и појединачне капљице. Фотолитографијом су припремљене електроде са деловима ширине од 3-4 μm , међутим уочени су и дефекти на површини настали у процесу депозиције. Резултати су показали да је контрола параметара током фотолитографије кључна за успешну припрему електрода на филмовима fine структуре. На основу резултата закључује се да је фотолитографија најпогоднија за израду комплексних геометрија са деловима на наноскали.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Кандидаткиња Јелена Вукмировић у потпуности је испунила циљеве представљене у пријави ове докторске дисертације. Резултати су јасно приказани, објашњени и повезани са литературним сазнањима. Комисија позитивно оцењује начин приказивања и тумачења резултата.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

<p>Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.</p>
<p>2. Да ли дисертација садржи све битне елементе</p> <p>Комисија је утврдила да дисертација садржи све битне елементе. Теоријски део пружа увид у тренутно стање у области кроз литературни преглед, као и основне податке о структури и својствима истраживаних материјала. Експериментални део је јасно написан и укључује детаљан опис рада током израде тезе од синтезе узорака до њихове карактеризације. Добијени резултати су јасно представљени, док закључци представљају сажетак сазнања добијених на основу резултата и литературних података.</p>
<p>3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци</p> <p>Докторска дисертација кандидаткиње Јелене Вукмировић представља оригиналан допринос науци са аспекта припреме дизајна уређаја на бази танких филмова, који имају примену у микроталасним технологијама, на релативно једноставан начин. Припрема функционалних слојева на бази баријум титаната сол-гел методом, као и употреба релативно једноставних техника депозиције попут спин технике или инкџет штампе имају позитиван утицај на економски аспект производње компоненти специфичног дизајна. Структурна и функционална карактеризација танких филмова код којих је део Ba^{2+} или Ti^{4+} јона, супституисан јонима Sr^{2+} или Zr^{4+}, респективно показала је промене у структури и својствима, што чини ове материјале погодним за примену у микроталасним технологијама. Оптимизацијом процесних параметара, и комбинацијом спин технике и техника депозиције дводимензоналних специфичних геометрија могуће је припремити дизајн погодан за функционалну карактеризацију материјала. Инкџет штампа има велику потенцијалну примену у изради специфичних геометрија на скали од неколико десетина до неколико стотина микрометара. Доказано је да инкџет штампа у поменутом опсегу димензија може да замени софистициране и компликоване технике депозиције, које се најчешће користе у изради електрода комплексног облика, док је за припрему специфичних геометрија мањих димензија погоднија фотолитографија.</p>
<p>4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања</p> <p>Недостаци дисертације нису примећени.</p>
<p>X ПРЕДЛОГ:</p>
<p>На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:</p>
<p>На основу укупне оцене дисертације са темом „Добијање нанокристалних баријум титанатних филмова дефинисане структуре и својстава за примену у микроталасним тунабилним уређајима“, кандидаткиње Маст. инж. технол. Јелене Вукмировић, комисија предлаже да се прихвати извештај о оцени докторске дисертације, а кандидату одобри одбрана дисертације.</p>

др Горан Стојановић, редовни професор, председник
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду

др Владимир В. Срдич, редовни професор, ментор
Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду

др Марија Милановић, доцент, члан
Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду

др Иван Стијеповић, научни сарадник, члан
Технолошки факултет Нови Сад, Универзитет у Новом Саду

др Јелена Бобић, виши научни сарадник, члан
Институт за мултидисциплинарна истраживања, Универзитет у Београду