

Реферат

Циклу робіт «Синтез та дослідження неорганічних і органо-неорганічних матеріалів для систем перетворення та зберігання енергії» авторів наукового співробітника Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України Плутенко Тетяни Олександрівни та наукового співробітника Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України Торчинюка Павла Васильовича для участі в конкурсі на здобуття премії Президента України для молодих учених.

Актуальність. На сьогодні велика частка енергії в світі виробляється із невідновлювальних видів викопного палива, що супроводжується викидом в атмосферу великої кількості вуглекислого газу. Для отримання значної кількості енергії з мінімальним впливом на навколишнє середовище необхідно максимально використовувати відновлювальні джерела енергії (сонце, вітер). Директивою (ЄС) 2018/2001 щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел від 21 грудня 2018 року передбачено досягнення 32% відновлювальних джерел енергії в світі до 2030 року.

Сьогодні принцип електрохімічного зберігання енергії за допомогою акумуляторів, суперконденсаторів, паливних елементів та електростатичних конденсаторів, технологія яких базується на багат шарових керамічних системах, розглядається як основний для перетворення сонячної енергії фотовольтаїчними, фотокаталітичними і фотосинтетичними методами. Органо-неорганічні перовськіти мають надзвичайно великі перспективи для створення на їх основі вискоєфективних і відносно недорогих перетворювачів сонячної енергії в електричну. Ефективність перетворення сонячної енергії елементами на основі даних матеріалів становить 25,2%. Органо-неорганічні перовськіти характеризуються високою рухливістю та великою довжиною дифузії носіїв заряду, високим коефіцієнтом оптичного поглинання. Для отримання органо-неорганічних перовськітів використовують дешеві та широко доступні вихідні реагенти і відносно прості методи синтезу. Але для їх широкого впровадження необхідно вирішувати цілий ряд завдань, пов'язаних з дослідженням впливу умов

синтезу на властивості перовськітів та підвищенням стійкості до зовнішніх чинників (вологи, температури, ультрафіолетового випромінювання).

Оскільки електроенергія з відновлюваних джерел енергії виробляється нерівномірно протягом дня і залежить від погодних умов, необхідним для покращення безпеки енергопостачання є використання систем накопичення і зберігання енергії. Керамічні конденсатори характеризуються високою діелектричною проникністю і корисною ємністю і є перспективними для створення елементів накопичення енергії за рахунок поляризаційного ефекту створюючи багат шарові структури. Для виготовлення конденсаторів з високою питомою ємністю та «колосальною» діелектричною проникністю ($\epsilon > 1000$) використовують сегнетоелектричні матеріали на основі спонтанно поляризованих систем BaTiO_3 , матеріали на основі складних оксидів перехідних металів $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ та літій-провідні оксидні системи $(\text{La,Li})\text{TiO}_3$.

Метою роботи було: а) Дослідження особливостей утворення плівкових матеріалів на основі органо-неорганічних перовськітів $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ при різних співвідношеннях вихідних реагентів PbI_2 та $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ в розчиннику диметилформаміді (DMF) та диметилсульфоксиді (DMSO), дослідження властивостей плівок, та пошук шляхів підвищення стійкості плівок органо-неорганічних перовськітів до зовнішніх чинників для систем перетворення сонячної енергії; б) Розробка та одержання різними методами синтезу (твердофазний, напівоксалатний) нових конденсаторних матеріалів, які проявляють «колосальну» діелектричну проникність ($\epsilon > 1000$) на основі твердих розчинів $\text{Ba}_{(1-x)}(\text{M}_{0,5}\text{Vi}_{0,5})_x\text{TiO}_3$ ($\text{M} = \text{Li, Na, K}$), $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, $(\text{La,Li,Na})(\text{Ti,Al})\text{O}_3$ для систем зберігання і накопичення енергії.

Робота присвячена актуальній науковій задачі – розробці нових матеріалів для перетворення сонячної енергії та діелектричних матеріалів з «колосальною» діелектричною проникністю для систем накопичення і зберігання електричної енергії.

Синтез і дослідження органо-неорганічних перовськітів для елементів
перетворення сонячної енергії

Проведено синтез органо-неорганічних перовськітів $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ при різному співвідношенні вихідних реагентів $\text{PbI}_2:\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (1:1, 1:2, 1:3) у розчинниках DMF і DMSO методом одностадійного осадження з подальшим отриманням плівок методом spin-coating. Встановлено, що співвідношення вихідних реагентів суттєво впливає на властивості перовськітів: кристалічність, мікроструктуру, структурні характеристики. Показано, що кристалічність плівок залежить від співвідношення вихідних реагентів, розчинника та температури обробки плівки. На залежності кристалічності від температури обробки плівки спостерігаються два максимуми: перший – зумовлений внеском кристалічних проміжних сполук та перовськіту, другий – зумовлений внеском кристалічної фази перовськіту. Мікроструктура плівок перовськітів залежить від співвідношення реагентів. Показано, що зі збільшенням співвідношення вихідних реагентів відбувається збільшення об'єму комірки для плівок перовськіту. Об'єм комірки для плівок перовськіту, отриманих у розчиннику DMSO є меншим, ніж при використанні DMF.

Встановлено, що залежно від співвідношення вихідних реагентів у розчиннику DMF утворення однофазного перовськіту $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ відбувається за різними схемами: через утворення 3 проміжних сполук (1:1), 4 та 2 проміжних сполук при співвідношенні 1:2 та 1:3 відповідно. Проміжними сполуками при використанні DMF є $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2(\text{DMF})_x\text{PbI}_4$, $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2(\text{DMF})_2\text{Pb}_3\text{I}_8$, $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_3(\text{DMF})\text{PbI}_5$, $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2(\text{DMF})_2\text{Pb}_2\text{I}_6$. Встановлено, що структура перовськіту починає формуватися при температурі 20–25 °С. Початок утворення однофазного перовськіту залежно від співвідношення вихідних реагентів у DMF відбувається при різних температурах: 1:1 – 115 °С, 1:2 – 170 °С, 1:1 – 175 °С. Незалежно від співвідношення вихідних реагентів органо-неорганічний перовськіт $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ утворюється одного хімічного складу.

Встановлено, що при використанні розчинника DMSO незалежно від співвідношення вихідних реагентів PbI_2 та $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ у розчиннику DMSO утворення перовськіту $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ відбувається через утворення 4 проміжних

сполук: $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2(\text{DMSO})_x\text{PbI}_4$, $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2(\text{DMSO})_2\text{Pb}_3\text{I}_8$, $\text{PbI}_2 \cdot 2\text{DMSO}$, $\text{PbI}_2 \cdot \text{DMSO}$. При співвідношенні вихідних реагентів 1:1 у розчиннику DMSO не вдалося отримати однофазний продукт перовськиту, завжди присутні сліди сполуки $(\text{CH}_3\text{NH}_3)_2(\text{DMSO})_2\text{Pb}_3\text{I}_8$. Встановлено, що структура перовськиту починає формуватися при температурі 60 °C для плівок, отриманих при співвідношенні вихідних реагентів 1:1, 1:2 та при 70 °C – при співвідношенні 1:3. Утворення однофазного перовськиту відбувається при різних температурах залежно від співвідношення вихідних реагентів: 1:2 – 190 °C, 1:3 – 205 °C.

Проведено порівняльні дослідження стійкості плівок перовськиту, отриманих при різному співвідношенні вихідних реагентів у розчинниках DMF, DMSO. Показано, що використання DMSO при синтезі перовськиту $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ призводить до утворення більш щільних та стійких плівок до дії вологи та опромінення порівняно з використанням розчинника DMF. При цьому найстійкішими до зовнішніх дій є плівки, отримані при співвідношенні $\text{PbI}_2:\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I} - 1:3$. Показано, що для підвищення стійкості перовськиту до дії вологи, кисню можна використовувати полімери: полівінілбутираль (PVB), циклоолефін кополімер (COC) та полівініліденхлорид (PVDC).

Досліджено електрофізичні властивості органо-неорганічних перовськитів і показано, що ширина забороненої зони залежить від співвідношення вихідних реагентів та розчинника, який використовується в синтезі. Для плівок органо-неорганічних перовськитів, отриманих при співвідношенні $\text{PbI}_2:\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I} - 1:1, 1:2$ і $1:3$ у розчиннику DMF ширина забороненої зони складає 1,59; 1,62 і 1,57 eV відповідно. При використанні розчинника DMSO та різного співвідношення вихідних реагентів ширина забороненої зони плівок перовськитів складає 1,57 (1:1); 1,53 (1:2) та 1,54 eV (1:3).

Показано, що плівки органо-неорганічного перовськиту $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ мають велику порівняно з товщиною плівки довжину дифузії неосновних носіїв заряду, яка становить при використанні розчинника DMF – 4,42 мкм (1:1), 1,19 мкм (1:2) та 4,75 мкм (1:3). Довжина дифузії неосновних носіїв заряду для плівок перовськитів, отриманих при використанні розчинника DMSO та співвідношення реагентів 1:1,

1:2 і 1:3 складає 1,20 мкм, 2,58 мкм та 1,61 мкм відповідно. Показано, що біля краю поглинання для перовськітів проявляється ефект Урбаха. Визначено характеристичні параметри ефекту Урбаха і величини граничного значення густини струму короткого замикання для плівок, отриманих при різному співвідношенні $\text{PbI}_2:\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ в розчиннику DMF, DMSO.

Досліджено вплив розчинника на електрофізичні властивості плівок перовськітів, отриманих при співвідношенні реагентів 1:2, і встановлено, що рухливість носіїв заряду в плівці перовськіту, отриманій в DMSO ($\mu = 67 \pm 5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) на порядок вища, ніж для плівок, отриманих при використанні розчинника DMF ($\mu = 9,1 \pm 0,7 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$). Густина носіїв заряду становить $n = (3,8 \pm 0,3) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ та $n = (2,9 \pm 0,2) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при використанні розчинника DMF та DMSO відповідно. Встановлено, що плівка органо-неорганічного перовськіту, отримана при використанні DMSO, має вищу провідність, ніж плівка отримана з розчинника DMF.

Матеріали з «колосальною» діелектричною проникністю для систем накопичення та зберігання енергії

Вперше показано, що тверді розчини зі структурою перовськіту в системі $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{Li}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ утворюються в концентраційних межах $0 \leq x \leq 0,6$. Встановлено, що утворення твердих розчинів в системі $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{Li}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ проходить через формування проміжних фаз $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, Li_4TiO_4 , $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Знайдено, що сингонія твердих розчинів в системі $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{Li}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ при $0 \leq x < 0,5$ є тетрагональною, в той час як при більш високих концентраціях титанату літію-вісмуту $0,5 \leq x \leq 0,6$ сингонія стає кубічною. Було показано, що нестабільний при кімнатній температурі титанат літію-вісмуту $\text{Li}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ є кубічним з параметром елементарної комірки $a_{\text{куб}} = 4,0013 \text{ \AA}$, додавання якого до титанату барію призводить до суттєвого зниження температури спікання кераміки та розмиття температури фазового переходу.

В

системі

$(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{Li}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($0,08 \leq x \leq 0,15$) значення діелектричної проникності

становить $4 \cdot 10^3$ при 100 кГц, зміна діелектричної проникності не перевищує 30% в температурному діапазоні 100–145 °С.

В системі $(1-x)\text{BaTiO}_3 - x\text{M}_{0,5}\text{Vi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($\text{M} = \text{Na}, \text{K}$) показано, що додавання титанатів натрію- та калію-вісмуту призводить до зростання температури Кюрі твердих розчинів. При цьому розмір зерен спеченої кераміки зменшується, що пов'язано з сегрегацією іонів Vi^{3+} , Na^+ , K^+ на границі зерен. Виявлено, що використання напівоксалатного методу синтезу твердих розчинів $(1-x)\text{BaTiO}_3 - x\text{M}_{0,5}\text{Vi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($\text{M} = \text{Na}, \text{K}$) дозволяє зменшити втрати вісмуту, натрію та калію при спіканні та підвищити температуру Кюрі порівняно з твердофазним методом синтезу.

Знайдено, що спікання кераміки у атмосфері повітря призводить до утворення твердих розчинів на основі $(1-x)\text{BaTiO}_3 - x\text{M}_{0,5}\text{Vi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($\text{M} = \text{Na}, \text{K}$), що характеризуються «колосальною» діелектричною проникністю $\epsilon > 10^3$ і низьким значенням тангенсу кута діелектричних втрат. Збільшення вмісту x в твердих розчинах на основі титанату барію призводить до розмиття фазового переходу, що пов'язано з сегнеторелаксаторними властивостями титанатів вісмуту-натрію та вісмуту-калію. Показано що матеріали систем, що містять калій та натрій, характеризуються низькою зміною діелектричної проникності в широких температурних інтервалах. Знайдено, що найширший температурний інтервал де зміна діелектричної проникності не перевищує 15 % в системі $(1-x)\text{BaTiO}_3 - x\text{Na}_{0,5}\text{Vi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($0,1 \leq x \leq 0,2$) спостерігається на частотах 0,1 Гц (20–300 °С) та 10^5 Гц (120–300 °С). В той час як в системі $(1-x)\text{BaTiO}_3 - x\text{K}_{0,5}\text{Vi}_{0,5}\text{TiO}_3$ найширший температурний інтервал де зміна діелектричної проникності не перевищує 15 % проявляється в частотному діапазоні 10^2 – 10^4 Гц (25–300 °С) при $x = 0,1$ та при 10^6 Гц (70–270 °С) при $x = 0,2$. Отримані високотемпературні діелектричні конденсаторні матеріали зі стабільною діелектричною проникністю у температурному інтервалі до 250 °С можуть бути використані у гібридних електромобілях, авіаційній промисловості, розвідках нафти та газу, аерокосмічних системах.

Показано, що при спіканні керамічних матеріалів $(1-x)\text{BaTiO}_3 - x\text{M}_{0,5}\text{Vi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($\text{M} = \text{Na}, \text{K}$) у відновній атмосфері з послідуочим окисненням на повітрі в матеріалах проявляється ефект позитивного температурного коефіцієнту опору (ПТКО). Знайдено, що зерна кераміки твердих розчинів $(1-x)\text{BaTiO}_3 - x\text{M}_{0,5}\text{Vi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($\text{M} = \text{Na}, \text{K}$) складаються з напівпровідникового ядра, діелектричної границі та приграничної області. Використання напівоксалатного методу синтезу дозволяє знизити мінімальне значення опору позисторних матеріалів.

З метою порівняння позисторних властивостей безсвинцевих і свинецьвмісних матеріалів, проведено синтез і вивчено структурні особливості свинецьвмісних твердих розчинів $(1-x)(\text{Ba}, \text{Y})\text{TiO}_3 - x\text{PbTiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0,55$) з додаванням склоутворюючої домішки $\text{V}_2\text{O}_3 - \text{PbO} - \text{SiO}_2$. Виявлено, що основний внесок в ефект ПТКО свинецьвмісних матеріалів вносять границя зерна і пригранична область. Проведено порівняльний аналіз електрофізичних властивостей синтезованих безсвинцевих твердих розчинів систем $(1-x)\text{BaTiO}_3 - x\text{M}_{0,5}\text{Vi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($\text{M} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) із свинецьвмісними твердими розчинами $(1-x)(\text{Ba}, \text{Y})\text{TiO}_3 - x\text{PbTiO}_3$. Знайдено, що синтезовані напівоксалатним методом безсвинцеві матеріали не поступаються відомим свинецьвмісним за електрофізичними властивостями, причому кратність зміни опору $\rho_{\text{max}}/\rho_{\text{min}}$ і максимальне значення опору ρ_{max} у натрієвмісній системі є вищими аніж у свинецьвмісній. Це дозволяє рекомендувати їх для використання на практиці в якості нагрівних елементів та датчиків температури наряду з матеріалами для накопичення енергії.

Було розроблено новий метод синтезу карбонатним осадженням матеріалів на основі оксидів перехідних металів $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. Показано, що однофазний матеріал $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ характеризується кубічною елементарною коміркою з просторовою групою Im-3m з параметром $a = 7,3939(1) \text{ \AA}$. Знайдено, що максимальну густину (93%) мають матеріали, синтезовані при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ і спечені при $1080 \text{ }^\circ\text{C}$. Зі збільшенням температури синтезу відбувається зниження щільності кераміки, що пов'язано з меншою активністю порошку і підвищенням

кристалічності частинок. Збільшення температури синтезу призводить до збільшення розміру керамічного зерна кераміки. Методом комплексного імпедансу було показано, що кераміка $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, синтезована методом сумісного осадження є електрично неоднорідною: зерно кераміки має низький опір, границі зерен – високий опір. Це може бути пов'язано з наявністю титану та міді у двох ступенях окиснення в ядрі зерна, що обумовлює напівпровідникові властивості через втрату кисню при спіканні при високих температурах. В той же час при охолодженні кисень дифундує по границях зерен, утворюючи діелектричні границі зерен. Синтезована методом осадження кераміка характеризується зменшенням ϵ і $\text{tg } \delta$ з частотою і показує високі діелектричні характеристики ($\epsilon \geq 10^4$, $\text{tg } \delta = 0,15$ на частоті 1 кГц) для використання в якості конденсаторних матеріалів. Отримані діелектричні параметри пояснюються переважно малим розміром керамічних зерен і, відповідно, більшою кількістю діелектричних границь зерен.

Керамічні зразки системи $\text{La}_{0,5}\text{Li}_{0,5-x}\text{Na}_x\text{TiO}_3$ були синтезовані методом твердофазних реакцій. Показано, що тверді розчини утворюються при температурі вище 1100 °С. Проміжними фазами при утворенні перовськітної фази $\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ є $\text{Li}_2\text{Ti}_2\text{O}_5$, $\text{Li}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ і $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$. За допомогою скануючої електронної мікроскопії було встановлено, що розмір зерен кераміки у твердих розчинах $\text{La}_{0,5}\text{Li}_{0,5-x}\text{Na}_x\text{TiO}_3$ зменшується з 4,7 до 3 мкм для $x = 0,1$ та 0,4 відповідно.

Діелектричні властивості досліджували в кераміці $\text{La}_{0,5}\text{Li}_{0,5-x}\text{Na}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0,5$) методом імпедансної спектроскопії. Діелектричні втрати зростають зі збільшенням концентрації натрію, що можна пояснити тим, що заміна іонів Li^+ на Na^+ зменшує рух іонів літію та провідність у зразках системи $\text{La}_{0,5}\text{Li}_{0,5-x}\text{Na}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0,5$). Діелектрична проникність проходить через максимум ($\epsilon \sim 4 \cdot 10^3$ при 1 Гц) в кераміці $\text{La}_{0,5}\text{Li}_{0,4}\text{Na}_{0,1}\text{TiO}_3$. Цей максимум можна пояснити двома протилежними процесами, а саме збільшенням рухливості іонів літію через збільшення розміру “вузького місця” в структурі та зменшенням вмісту та рухливості літію через зменшення кількості вакансій.

Показано, що однофазні тверді розчини в системі $\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ в концентраційному інтервалі $0,15 \leq x \leq 0,3$, синтезовані методом твердофазних

реакцій, утворюються при температурах вище 1200 °С. Тверді розчини $\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ (де $0,15 \leq x \leq 0,3$) мають ромбодричну структуру перовськіту. Параметри елементарної комірки залежать від концентрації літію та алюмінію. З ростом концентрації x об'єм елементарної комірки лінійно зменшується через різницю в іонних радіусах алюмінію та титану. Ця залежність підпорядковується закону Вегарда, що вказує на утворення неперервного ряду твердих розчинів $\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ (де $0,15 \leq x \leq 0,3$).

Методом оптичної спектроскопії було показано, що розмір зерен кераміки $\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ незначно зростає зі збільшенням концентрації літію та алюмінію. Цей факт можна пояснити підвищенням температури спікання зі збільшенням вмісту x . Зі зростанням температури спікання в $\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ збільшується розмір зерен, що супроводжується зменшенням кількості зерен, отже загальна площа границь зерен зменшується.

Дослідження за допомогою методу комплексного імпедансу продемонстрували три півкола на діаграмі Коул-Коула, які можна віднести до електрично неоднорідних за властивостями ділянок зерен кераміки. Поява трьох півкіл на діаграмах Коул-Коула вказує на те, що існує три механізми релаксації. Півколо при високій частоті відноситься до об'ємної частини зерна, на низькій частоті – до поляризації електродів, а область середньої частоти – до властивостей границі зерен. Діелектричну проникність розраховували за даними вимірювань комплексного імпедансу. Показано, що зразки системи $\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ мають велике значення діелектричної проникності $\epsilon > 10^5$ на низьких частотах ($f \leq 10$ Гц). В той же час зразок $\text{La}_{0,5}\text{Li}_{0,5}\text{TiO}_3$ має високе значення діелектричної проникності $\epsilon > 10^4$ на низьких частотах ($f \leq 10$ Гц), що можна пояснити високою іонною провідністю цього матеріалу. Синтезовані матеріали, леговані алюмінієм $\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ мають вищу діелектричну проникність, ніж $\text{La}_{0,5}\text{Li}_{0,5}\text{TiO}_3$. Діелектричні втрати зростають зі збільшенням концентрації літію у $\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$, що можна пояснити зменшенням розмірів структурних доменів зі збільшенням температури відпалу. Встановлено, що найкращими діелектричними характеристиками серед літій-вмісних матеріалів володіють тверді розчини

$\text{La}_{0,5}\text{Li}_{0,5-x}\text{Na}_x\text{TiO}_3$ ($x = 0,1$): $\varepsilon = 24000 - 7000$, $\text{tg } \delta \approx 0,25$ при $f = 1$ Гц – 10 кГц;

$\text{La}_{0,67}\text{Li}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_3$ ($x = 0,15$): $\varepsilon = 568000 - 23000$, $\text{tg } \delta \approx 0,45$ при $f = 1$ Гц – 10 кГц.

Публікації : За матеріалами роботи опубліковано 1 розділ монографії, 23 статті у фахових виданнях (з них 14 індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus), 31 тези доповідей та 3 патенти на корисну модель. Сумарний h-індекс авторів: 4. Загальна кількість цитувань робіт авторів: 28.

Н.с, к.х.н.



Тетяна ПЛУТЕНКО

Н.с., PhD



Павло ТОРЧИНЮК