

Реферат

Циклу робіт Ворони І.О., Таранець Ю.В., Костенюкової О.І. “Новітні кристалічні матеріали для оптичних та біомедичних застосувань”, представленого на Премію Президента України для молодих вчених 2020 року.

Керування структурою та похідними від неї властивостями матеріалів шляхом модифікації домішкового складу є ключовим інструментом матеріалознавства, який дозволяє створювати матеріали з новими фізичними властивостями, та вдосконаленими характеристиками для практичних застосувань. У циклі робіт отримано нові фізико-хімічні закономірності, що описують домішково-обумовлені властивості високолегованої лазерної кераміки на основі складного оксиду $Y_3Al_5O_{12}$, активовану іонами групи лантаноїдів, та структурно-складних кристалів KDP і оксалату кальцію моногідрату з інкорпорованими органічними молекулами.

Цикл робіт, що подається, мав своїм підґрунтям науково-технічні роботи, що виконувались в Інституті монокристалів відповідно до: конкурсного проекту науково-дослідних робіт молодих учених НАН України (2015-2016 рр., № держреєстрації 0115U004419), цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України «Фундаментальні проблеми створення нових наноматеріалів і нанотехнологій» (№ держреєстрації 0115U003688, 2015-2019 рр.); відомчої цільової програми наукових досліджень ВФТПМ НАНУ «Перспективні конструкційні та функціональні матеріали з тривалим терміном експлуатації, фундаментальні основи їх одержання, з'єднання та обробки» (№ держреєстрації 0117U000290, 2017-2021 рр.); цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАНУ «Фундаментальні проблеми створення нових наноматеріалів і нанотехнологій» (№ держреєстрації 0117U007053С, 2017 р.); відомчої тематики НАН України (№ держреєстрації 0115U003428, 2015-2017 рр.); бюджетних тем “Оптичні гетерогенні середовища на основі кристалів фосфатів з наночастинками і люмінофорами: процеси формування та властивості” (2014-2016 рр., номер держреєстрації № 0114U003152), “Створення нових радіаційно стійких сцинтиляційних матеріалів для детекторів інтенсивних потоків іонізуючого випромінювання” (2013-2015 рр., номер держреєстрації № 01130003452); “Оптичні гетерогенні середовища на основі кристалів фосфатів з наночастинками і люмінофорами: процеси формування та властивості” (№ держреєстрації 0114U003152, 2014-2016 рр.), “Розробка науково-технологічних основ отримання нелінійно-оптичних кристалів для генерації терагерцового та інфрачервоного випромінювання” (№ держреєстрації 0117U000288, 2017-2019 рр.)

Метою даного циклу робіт було дослідження механізмів модифікації кристалічної структури керамічних та монокристалічних матеріалів

домішковими станами, та розробка відповідних методів керування властивостями таких сполук.

Першу частину циклу присвячено високолегованій лазерній кераміці легована іонами Nd^{3+} або Yb^{3+} , є одним з найперспективніших матеріалів для нових типів твердотільних лазерів. Керамічні технології консолідації нано- та субмікронних порошків у високощільну прозору кераміку виключають формування рідкої фази під час спікання, що робить можливим отримання кераміки із високою концентрацією домішок, обмеженої лише діаграмами стану відповідних оксидних систем. В межах представленого циклу робіт досліджено закономірностей впливу концентрації іонів-активаторів на структуру, оптичні та люмінесцентні властивості таких матеріалів. Для цього було розроблено комплексний підхід, що включав встановлення ролі іонів-активаторів у формуванні структури та оптичних властивостей високолегованої кераміки, які, в свою чергу, визначають люмінесцентні та лазерні характеристики цих іонів у полікристалічній матриці.

Визначено, що оптимальний температурний діапазон консолідації кераміки $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ у порівнянні з керамікою $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ зміщений в область високої температури приблизно на $50\text{ }^\circ\text{C}$. Згідно до експериментально визначеного коефіцієнту дифузії іонів-активаторів під час консолідації кераміки, іони ітербію характеризуються значно меншою дифузійною рухливістю у порівнянні з іонами неодиму, а параметр решітки a кераміки $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ лінійно зменшується зі збільшенням концентрації Yb^{3+} , у протилежність до $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, де параметр кристалічної решітки зростає зі збільшенням концентрації активатора. Ущільнення кристалічної решітки у кераміці $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ при активації ітербієм пояснює меншу дифузійну рухливість Yb^{3+} у порівнянні з Nd^{3+} . На додаток, під час спікання кераміки у вакуумі, частина іонів ітербію змінює зарядовий стан на Yb^{2+} внаслідок взаємодії з кисневими вакансіями. Присутність малорухливих комплексів іонів ітербію у стані $2+$ з вакансіями кисню додатково сповільнюють процеси спікання кераміки $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$.

Встановлено залежність оптичних та люмінесцентних характеристик кераміки $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ та $\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ від сорту та концентрації іонів-активаторів. Встановлено, що процеси супер-обмінної взаємодії в парних центрах Nd^{3+} значно інтенсифікуються при концентрації активатора >2 ат.%, призводячи до значного гасіння люмінесценції та скорочення середньої тривалості життя метастабільного рівня іонів неодиму у високолегованій кераміці $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$. Інтенсивність люмінесценції у кераміці $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ монотонно зростає зі збільшенням концентрації іонів Yb^{3+} . Таким чином показано, що іони ітербію в високолегованій кераміці $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ не проявляють тенденції до формування парних центрів, в той час як у кераміці $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ супер-

обмінна взаємодія в парних центрах обумовлює значне концентраційне гасіння люмінесценції при вмісту активатора >2 ат. %.

За сукупністю спектроскопічних та мікроскопічних досліджень встановлено, що іони-активатори у високолегованій кераміці Nd:YAG і Yb:YAG формують центри люмінесценції шляхом заміщення катіонних позицій ітрію в кристалічній структурі YAG та не проявляють тенденції до сегрегації на міжзеренних границях. Концентрація цих центрів відповідає вмісту активаторів у вихідних компонентах кераміки, що свідчить про повне ізоморфне розчинення Nd³⁺ і Yb³⁺ у кристалічній структурі кераміки в межах досліджених концентрацій. Люмінесцентні властивості кераміки визначаються електронними переходами 4f-4f в іонах-активаторах.

Встановлено, що диференційна ефективність лазерної генерації кераміки Nd³⁺:YAG залишається сталою в межах концентрації активатора ≤ 2 ат. % Nd³⁺ а при подальшому збільшенні кількості активних іонів спостерігається значна деградація лазерних характеристик, що корелює з інтенсифікацією процесів супер-обмінної взаємодії у парних центрах іонів неодиму. В свою чергу, кераміка Yb³⁺:YAG із концентрацією активатора в діапазоні 5-15 ат. % демонструє сталі характеристики лазерної генерації з диференційною ефективністю в межах 41-48%. Іони ітербію у кераміці Yb³⁺:YAG не проявляють тенденції до утворення парних центрів в межах концентрації до 15 ат. %, а збільшення концентрації активатора у такій кераміці є ефективним шляхом збільшення енергії лазерних імпульсів за незмінного об'єму активного середовища.

У другій частині циклу досліджено вплив амінокислот (L-Asp, L-Arg, L-Thr) і вітамінів (B1, B6, B12) на процеси росту кристалів кальцію оксалату моногідрату (CaC₂O₄·H₂O, calcium oxalate monohydrate, COM). COM є основним біомінералом, що утворюється в процесі патогенного каменеутворення в живих організмах. В біологічних системах кристалізація регулюється молекулами-модифікаторами, які здатні контролювати ріст кристалів. На процеси нуклеації COM і подальший ріст кристалів значний вплив надають різні органічні домішки, зокрема, амінокислоти і вітаміни. Відомо, що амінокислоти лізин, глутамінова кислота, гліцин чинять інгібуючу дію на процеси кристалізації COM, а пролін, серін, валін – промотуючу. При цьому вплив амінокислот L-Asp, L-Arg і L-Thr на процеси кристалізації COM не визначено, або дані щодо їх впливу суперечливі. Крім того, молекули L-Asp, L-Arg, L-Thr містяться у фізіологічному розчині і були виявлені у складі ниркових каменів, та в досліджуваній модельній системі COM ([Ca²⁺]/[C₂O₄²⁻] = 20:1, pH=5,8) вони мають різний зарядовий стан, відповідно, різні й особливості їх взаємодії з кристалами COM. Тим часом, незважаючи на очевидну необхідність вітамінів в організмі людини, їх роль у процесах нуклеації COM до теперішнього часу не встановлена. Відповідно до клінічних випробувань, відомо лише, що вітаміни E, A, і C здатні збільшувати екскрецію оксалату у фізіологічній рідині і підвищувати ризик кристалізації COM. Таким чином, вивчення кристалізації COM з прототипів фізіологічних

рідин та встановлення *in vitro* впливу молекул-модифікаторів росту на кристалізацію СОМ є актуальною задачею фізичного матеріалознавства, яка спрямована на пошук нових домішок, здатних пригнічувати ріст патогенних кристалів СОМ.

Встановлено інгібуючу дію амінокислот L-Asp і L-Arg на процеси росту кристалів СОМ. Показано, що додавання 20 ммоль/л L-Asp і L-Arg в розчин СОМ ($[Ca^{2+}]/[C_2O_4^{2-}]$, $s=4,6$) призводить до утворення одиночних кристалів СОМ та зменшення їх розміру, що обумовлено адсорбцією молекул амінокислот на гранях кристалів: при цьому утворюються водневі зв'язки з гранню $\{121\}$ СОМ між атомами кисню, водню і азоту молекул амінокислот і атомами водню оксалатних груп, що виходять на поверхню грані $\{121\}$ СОМ. Блокування граней $\{100\}$ молекулами L-Asp і граней $\{100\}$ і $\{010\}$ молекулами L-Arg обумовлено електростатичною взаємодією між зарядженими молекулами добавок і атомами кальцію і оксалату, що виходять на поверхню граней $\{100\}$ і $\{010\}$ кристала СОМ. Встановлено, що амінокислота L-Thr є промотором кристалізації СОМ в діапазоні концентрацій 2-20 ммоль/л: час індукції СОМ при введенні L-Thr становить 50 с, що в два рази менше часу індукції чистого СОМ (100 с).

За результатами проведених досліджень було виявлено, що вітаміни В1 і В6, інгібують процеси нуклеації кристалів СОМ. Показано збільшенню часу індукції чистого СОМ в 70 разів при їх концентрації 40-50 ммоль/л в розчині. Ступінь інгібування СОМ при введенні вітамінів В1 і В6 становить 95%, що практично повністю пригнічує ріст кристалів СОМ. Встановлено зменшення поверхневої енергії СОМ при введенні молекул-інгібіторів кристалізації (L-Asp, L-Arg, В1, В6) до 19,8-20,8 мДж/м² у порівнянні з поверхневою енергією чистих кристалів СОМ. При введенні вітамінів В1 і В6 в модельну систему СОМ на кінетичній кривій кристалізації спостерігається два участка зародження СОМ ($s=4,6-8,0$ і $s=8,0-14,0$) зі зломом при $s=8,0$, що обумовлено переходом від гетерогенного зародження до гомогенного при великих пересиченнях.

Третю частину циклу присвячено монокристалам групи КДР, які є одними з найбільш важливих матеріалів для нелінійної оптики. Використання кристалів цієї групи для створення електрооптичних елементів і для подвоєння/потроєння частоти когерентного випромінювання, незважаючи на їх відносно невисоку оптичну нелінійність, визначається наступними факторами: кристали мають високу променеву міцність до впливу лазерних імпульсів з високою щільністю потужності; монокристали групи КДР можуть бути отримані великих розмірів, що забезпечують апертуру оптичних елементів до 40 см і більше і висока оптична якість. Головними недоліками кристалів групи КДР є їх низька прозорість в інфрачервоній області спектра і порівняно низькі показники заломлення ($n = 1,46 \dots 1,49$), що визначає їх низькі нелінійні характеристики. Зокрема, величина ефективного коефіцієнта нелінійності для кристалів КДР становить $d_{36}=0.39$ пм/В. Тому пошук можливих шляхів підвищення ефективності генерації

вищих гармонік в кристалах KDP є актуальною проблемою сучасного матеріалознавства.

Останнім часом інтенсивно досліджуються гетерогенні матеріали на основі кристалів групи KDP з інкорпорованими неізоморфними органічними молекулами, які володіють великими нелінійно-оптичними коефіцієнтами, наприклад, амінокислотами. Органічні молекули входять в кристал між шарами в процесі пошарово-дислокаційного росту. Однак, незважаючи на досить великий масив експериментального матеріалу, процеси взаємодії органічних молекул з неорганічної матрицею, що призводять до збільшення ефективності генерації другої гармоніки (ГДГ) в даний час вивчені недостатньо. Тому створення нових гетерогенних матеріалів на основі кристалів KDP з високою ефективністю перетворення лазерного випромінювання у вищі гармоніки та покращеним комплексом міцнісних властивостей є актуальною задачею. Для цього було розроблено лабораторну методику вирощування кристалічних матриць KDP, допованих органічними молекулами (NN'DU, LAP та амінокислотою L-arg).

Було отримано кристали KDP:NN'DU, KDP:LAP, KDP:L-arg методом зниження температури. Усі кристали мали розвинені сектори росту піраміди і призми. Майже усі кристали були прозорі і не містили видимих включень, за винятком кристалів KDP:L-arg та KDP:LAP, з концентрацією у розчині 3,8 мас.% та з 4.4 мас. %, відповідно. Введення в розчин молекул L-arg і LAP впливає на морфологію кристалів KDP; спостерігається блокування обох граней росту кристала, зниження швидкості росту кристала і зменшення його розмірів при збільшенні концентрації органічних молекул в розчині.

Допування кристалів KDP молекулами NN'DU, LAP, L-arg призвело до зростання його мікротвердості в секторі росту $\{101\}$ на 8-20% (з похибкою вимірювання 2%), а також до розміщення в секторі $\{100\}$ кристалів KDP:NN'DU, KDP:LAP. Різний вплив NN'DU та LAP на мікротвердість секторів $\{101\}$ та $\{100\}$ допованих кристалів пов'язаний з різним входженням молекул органічної добавки у зростаючі грані та різним характером взаємодії дислокації з молекулами NN'DU, LAP в секторах зростання $\{101\}$ та $\{100\}$. Введення молекул L-arg в матрицю KDP сектора $\{101\}$ сприяло збільшенню порога лазерного руйнування кристала в обох напрямках $[100]$ і $[001]$ на ~33 % і на ~25 % (при 1,4 мас. % L-arg), в порівнянні з чистим KDP, відповідно. Таке підвищення лазерної міцності в допованому кристалі може бути пов'язано з тим, що зниження енергії ґратки в секторі піраміди кристала KDP:L-arg, ймовірно, компенсується за рахунок збільшення електростатичного притягання К-О в результаті дещо більшого зменшення параметра c в секторі піраміди, ніж в секторі призми в порівнянні з чистим KDP. В кристалах KDP:LAP величина лазерної міцності дещо зростає у секторі $\{100\}$ і залишається практично незмінною у секторі $\{101\}$.

Показано, що допування кристалів KDP молекулами NN'DU, LAP та L-arg сприяє збільшенню ефективності ГДГ в 2-3,5 рази в порівнянні з чистим

кристалом KDP, в залежності від сектору росту. Слід зазначити, що для сектору росту $\{100\}$ величина ГДГ є більшою в порівнянні з сектором росту $\{101\}$. Збільшення ефективності в кристалі KDP:NN'DU є ймовірним завдяки введенню молекул і утворенню додаткових водневих зв'язків між молекулами NN'DU та гранями росту кристала $\{100\}$. Крім того, локальне спотворення кристалічної матриці та виникнення відповідної поляризації можуть бути результатом появи органічної молекули у зростаючому кристалі, що підвищує ефективність. В кристалах KDP:L-arg збільшення ГДГ може бути обумовлено зростанням поляризаційної напруженості електричного поля в кристалі KDP з ростом концентрації L-arg, а також тим, що зміни в кристалі в напрямку $[001]$ більш істотні, ніж уздовж напрямків $[100]$ або $[010]$. Збільшення поліризованості кристала KDP:L-arg проявляється також в змінненні нелінійно-оптичних властивостей.

Наукова новизна циклу робіт полягає в наступному:

1. Встановлено, що сповільнення процесів консолідації під час вакуумного спікання кераміки $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ у порівнянні з YAG та $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ обумовлено меншою дифузійною рухливістю іонів ітербію у порівнянні з іонами неодиму та ітрію, а також утворенням у кераміці $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ комплексів з іонів Yb^{2+} і вакансій кисню. Збільшення іонного радіусу ітербію при відновленні до двозарядного стану призводить до додаткового блокування дифузійної рухливості підградки ітрію.

2. Встановлено, що центри люмінесценції Nd^{3+} та Yb^{3+} у високолегованій кераміці $\leq 4\%$ ат.% $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ і $\leq 15\%$ ат.% $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ формуються виключно шляхом ізоморфного заміщення іонами-активаторами катіонних позицій ітрію в об'ємі кристалічних зерен кераміки. Формування випромінювальних центрів іншої природи, зокрема розташованих поблизу розгалуженої підсистеми міжзеренних границь, не зафіксовано. Визначено, що концентраційно-обумовлене зниження ефективності лазерної генерації у кераміці $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ спостерігається за $C_{\text{Nd}} > 2$ ат.% та обумовлене гасінням люмінесценції внаслідок супер-обмінної взаємодії у парних центрах, сформованих іонами неодиму; у кераміці $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ концентраційне гасіння та формування парних центрів відсутні.

3. Встановлено, що введення в модельний розчин ($[\text{Ca}^{2+}]/[\text{C}_2\text{O}_4^{2-}] = 20:1$, $s=4,6$) амінокислот L-Asp і L-Arg з концентрацією 20 ммоль/л призводить до утворення одиночних кристалів СОМ розміром 4-5 мкм, а наявність вітаміну В6 (у концентрації 50 ммоль/л) – до утворення кристалів розміром 2 мкм (у порівнянні, без домішок утворюються дендритні кристали СОМ розміром 10 мкм), що обумовлено адсорбцією органічних молекул за рахунок утворення водневих зв'язків з гранню $\{121\}$ СОМ та електростатичною взаємодією між зарядженими молекулами добавок та атомами кальцію і оксалату, що виходять

на поверхню граней $\{100\}$ і $\{010\}$ кристала СОМ. Визначено діапазон концентрацій амінокислоти L-Thr (2-20 ммоль/л), при якому вона є промоутером кристалізації СОМ, що пов'язано зі збільшенням кількості зародків кристалізації у модельній системі і зменшенням часу індукції СОМ у 2 рази.

4. Встановлено, що присутність у модельній системі СОМ ($[\text{Ca}^{2+}]/[\text{C}_2\text{O}_4^{2-}] = 20:1$, $s=4,6-14,0$) вітамінів В1 і В6 з концентраціями 10-50 ммоль/л та В12 з концентраціями 20-100 мкмоль/л зменшує поверхневу енергію кристалів СОМ, при цьому відбувається перехід від гетерогенного зародження ($s=4,6-8,0$) до гомогенного при пересиченнях $s > 10$.

5. Встановлено збільшення лазерної міцності на $\sim 25-33\%$, і механічної міцності $\sim 5-18\%$ та $2-7\%$ для кристалів KDP:L-arg, KDP:LAP, в порівнянні з чистим KDP. Показано, що характер змінення міцності в секторах росту призми і піраміди кристалу відрізняється. Однак в усіх випадках зміни механічної та лазерної міцностей, які спостерігаються, корелюють між собою.

6. Встановлено, що допування кристалів KDP органічними молекулами: NN'DU, LAP та амінокислоти L-arg призводить до збільшення ефективності перетворення випромінювання в другу гармоніку кристалу $\sim 2-3,5$ рази. Ефект, що спостерігається, домінує у секторі призми $\{100\}$. Встановлено зменшення величин провідності та діелектричної проникності в кристалах KDP:L-arg в діапазоні концентрацій L-аргініну від 0,7 до 1,4 мас.%, що обумовлене зменшенням кількості протонних вакансій (L-дефектів), які утворюються в результаті входження в кристал домішкових полівалентних іонів. Найбільш сильно ефект виражено в секторі росту $\{100\}$. Зміна електричних властивостей кристала KDP:L-arg корелює з максимальним входженням органічної молекули в ґратку KDP.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- Розроблено метод аналізу розмірів та концентрації залишкових пор на основі даних оптичної мікроскопії та спектроскопії, що дозволяє визначати об'ємну частку залишкових пор у високощільній прозорій кераміці ($\rho > 99\%$). Уточнено умови консолідації та оптимізовано домішковий склад високолегованої кераміки Nd³⁺:YAG і Yb³⁺:YAG, що забезпечує високу ефективність лазерної генерації: $\eta_{\text{slope}}(\text{Nd}^{3+}:\text{YAG})=68\%$ і $\eta_{\text{slope}}(\text{Yb}^{3+}:\text{YAG})=48\%$. Отримані результати можуть бути використані для створення керамічних активних середовищ новітніх компактних твердотільних лазерів ближнього ІЧ-діапазону з високими енергоефективністю та питомою потужністю.
- Роблено оригінальний метод визначення кристалів оксалату кальцію моногідрату, який дозволяє якісно визначати наявність кристалів оксалату кальцію моногідрату в фізіологічній рідині (патент № 124338 від 10.04.2018 р.). Знайдено домішки, які впливають на кінетичні параметри кристалізації СОМ та пригнічують ріст кристалів СОМ *in vitro* в умовах близьких до фізіологічних.

Отримані закономірності впливу домішок різної природи та концентрації на кристалізацію патогенних біомінералів СОМ можуть бути використані для пояснення механізмів каменеутворення.

- Розроблено лабораторну методику вирощування кристалів фосфатів KDP:L-arg. Технологічні режими вирощування KDP:L-arg, запропоновані у дисертаційній роботі, можуть бути використані при розробці технології отримання композитних матеріалів на основі монокристалів KDP з інкорпорованими молекулами амінокислот (Патент № UA 115640 U від 25.04.2017). Отримано нові композитні матеріали: KDP:NN'DU, KDP:LAP, KDP:L-arg, придатні для використання в якості ефективного перетворювача лазерного випромінювання в наносекундному діапазоні тривалості імпульсів. В системі KDP:L-arg визначена оптимальна концентрація допantu, яка дозволяє застосувати матеріал в якості нелінійно-оптичного матеріалу.

Висновки

1. За допомогою комплексного аналізу структури, оптичних, люмінесцентних та лазерних характеристик встановлено взаємозв'язок між впливом іонів активаторів на формування мікроструктури лазерної кераміки $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ і $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ та її функціонального відгуку у якості активного лазерного середовища. На основі отриманих фізичних закономірностей визначено оптимальні умови отримання та домішковий склад такої кераміки з огляду на покращення ефективності лазерної генерації. Диференційний ККД генерації, що отримано у кераміці 2 ат.% Nd:YAG, склав 68%, за теоретичної квантової межі цього показника $\approx 75\%$.

2. Досліджено процеси кристалізації патогенних біомінералів СОМ та встановлено тенденцію впливу органічних молекул-модифікаторів росту на закономірності кристалізації, морфологію та розмір кристалів СОМ. Знайдено за сукупністю методів органічні домішки (L-Asp, L-Arg, вітаміни В1 і В6), які впливають на кінетичні параметри кристалізації СОМ та пригнічують ріст кристалів СОМ *in vitro* в умовах близьких до фізіологічних. Визначено значну інгібуючу дію молекул В1 і В6 на процеси нуклеації СОМ: при 50 ммоль/л в розчині СОМ вітаміни пригнічують ріст кристалів на $\approx 95\%$, і сприяють збільшенню часу індукції СОМ в 70 разів.

3. Проведено комплексне дослідження структури, оптичних, міцнісних, нелінійно-оптичних та електрофізичних властивостей композитних систем KDP:NN'DU, KDP:LAP и KDP:L-arg. Встановлено закономірності впливу органічних молекул на функціональні характеристики монокристалу KDP. На основі отриманих фізичних закономірностей визначено оптимальні концентрації органічних домішок у розчині, що забезпечує оптимальне поєднання оптичних, міцнісних і нелінійно-оптичних властивостей композитної системи KDP:L-arg.

Спостерігається збільшення ефективності генерації другої гармоніки 2-3,5 рази, в залежності від вмісту органічної домішки.

Цикл наукових робіт «Новітні кристалічні матеріали для оптичних та біомедичних застосувань» складається з 24 публікацій у фахових наукових виданнях, з яких 22 статті у міжнародних журналах, що є у базі Scopus, та 2 статті в українських фахових виданнях. Робота представлена у 42 тезах доповідей на конференціях. Згідно з базою даних Scopus загальний індекс цитування публікацій, що представлені у циклі робіт складає 88, h-індекс = 6, згідно бази даних Google Scholar загальна кількість посилань – 96, h-індекс (за роботою) = 6, згідно бази даних Web of Science загальна кількість посилань – 76, h-індекс (за роботою) = 5. Під час виконання циклу робіт захищено 2 кандидатських дисертації та 2 патенти України.

Науковий співробітник
відділу кристалічних матеріалів складних сполук
Інституту монокристалів
НАН України, к.ф.-м.н.

І.О. Ворона

Молодший науковий співробітник
відділу нелінійно-оптичних кристалів
Інституту монокристалів
НАН України, к.т.н.

Ю.В. Таранець

Молодший науковий співробітник
відділу нелінійно-оптичних кристалів
Інституту монокристалів
НАН України

О.І. Костенюкова

Підписи авторів засвідчую
Учений секретар
Інституту монокристалів
НАН України, к.ф.-м.н.

К.М. Кулик