

УДК 548.55 : 504:054

О. М. Кудин, д. т. н., ст. наук. співр., проф. каф.

В. К. Мунтян, к. т. н., доц., зав. каф.

Т. М. Олійник, курсант

Національний університет цивільного захисту України  
вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023

К. О. Кудин, к. т. н., наук. співр.

НТК «Інститут монокристалів» НАН України  
пр. Науки, 60, м. Харків, Україна, 61001

### РОЗРОБКА БЕЗПЕЧНОГО СПОСОБУ ОТРИМАННЯ КРИСТАЛІВ $CsI:Tl$ З РАДІОНУКЛІДАМИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В РАДІОЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ

Запропоновано безпечний спосіб отримання скінтіляторів для радіоекологічного моніторингу. Методом спрямованої кристалізації в кварцових ампулах вирощено кристали  $CsI:Tl$ , які не прилипають до матеріалу контейнера і не руйнуються при охолодженні. Спосіб виключає операцію поверхневого оплавлення злитка, що суттєво зменшує викиди шкідливих речовин і енерговитрати. Спектри коливального поглинання отриманих кристалів  $CsI:Tl$  і  $CsI$  не мають смуг, що обумовлені іонами  $OH^-$  і  $CO_3^{2-}$ , а електронне поглинання у видимій області після опромінення не має смуг центрів забарвлення  $F_-$  й  $F_A$ -типу. Спектрометричні характеристики вирощених кристалів не поступаються еталону. Метод рекомендовано для вирощування скінтіляторів з ізотопами, що введені до кристалічної ґратки, і відрізняється дегідратацією сировини при  $T \leq 40^\circ C$  в умовах, що виключають фотоліз соли.

**Ключові слова:** екологічна безпека, радіоекологічний моніторинг, ріст кристалів, поверхнєве оплавлення, скінтіляційні характеристики.

**Постановка проблеми.** Скінтілятори з внутрішніми ізотопами використовуються в радіоекологічному моніторингу і геологорозвідці, особливо вони цінні при роботі в польових умовах [1, 2]. Для моніторингу використовують кристали з внутрішнім альфа-репером, який в іноземній літературі називають пульсаром (*Am-pulsar*) [3, 4].

Положення опорного піка в шкалі енергій гамма-квантів називається гамма-еквівалентом ( $G_{eq}$ ) і використовується для стабілізації електронного тракту скінтіляційного детектора. Принцип роботи такого детектора пояснює рисунок 1, що приведено за даними каталогу [4].

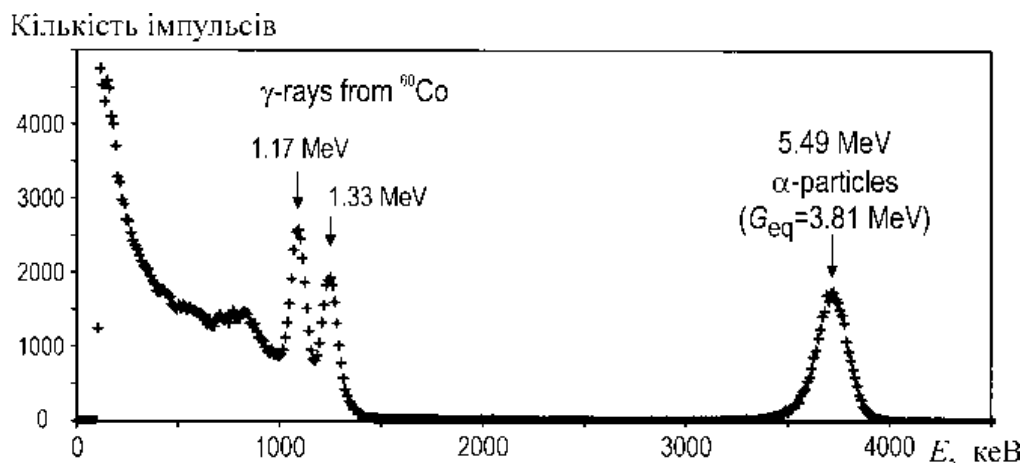


Рисунок 1 – Амплітудний спектр кристала  $CsI:Tl$  з альфа-репером  $^{241}Am$ . Положення альфа-піка в енергетичній шкалі відповідає гамма-еквіваленту 3,81 MeV. Спектр зовнішнього джерела  $^{60}Co$ , добре виділені дві лінії при 1,17 и 1,33 MeV. З каталогу [4]

У правій частині рисунка зображено опорний сигнал від альфа-часток з енергією 5,49 MeV від внутрішнього джерела  $^{241}Am$ . Максимум піку повного поглинання відповідає  $G_{eq} = 3,81$  MeV. У лівій частині рисунка розташовано спектр

невідомого джерела, що за положенням двох ліній (1,17 и 1,33 MeV) можна ідентифікувати як ізотоп  $^{60}Co$ . В деяких випадках (геологорозвідка) внутрішнім джерелом служить  $^{60}Co$  [5], а пошук

зовнішніх джерел ведуть, наприклад, за гамма-лініями 2,62 ( $^{208}\text{Th}$ ) і 1,76 MeV ( $^{241}\text{U}$ ).

Процес отримання таких кристалів пов'язаний з відповідними труднощами із-за небезпеки забруднення промислових приміщень радіонуклідами. Розміщення ростового обладнання і обслуговуючого персоналу у приміщеннях, що призначені для роботи з відкритими джерелами радіації, приводить до значних витрат. Можливе рішення проблеми запропоновано в [5] і передбачає вирощування кристалів у герметичних кварцових ампулах з використанням технічних рішень, що виключають операцію поверхневого оплавлення злитка. Незважаючи на принципову можливість отримання кристалічних злитків без оплавлення, технологія вирощування таких кристалів виявилася не відтворальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для отримання матеріалів з внутрішніми радіонуклідами невелику кількість потрібного ізотопу вводять до розплаву на стадії росту кристалів разом з іншими легуючими домішками. Сцинтилятори з внутрішніми радіонуклідами не вирощують відкритим способом, наприклад методом Киропулоса, оскільки випаровування компонентів розплаву призводить до забруднення приміщень. Зазвичай такі кристали отримують методом Стокбаргера у герметичних кварцових ампулах [5, 6].

У разі вирощування кристалів  $\text{CsI:Tl}$  ампульним методом існує принципове обмеження, пов'язане з необхідністю проведення операції поверхневого оплавлення отриманого злитка. При оплавленні порушуються герметичність ампули, виділяються пари йоду і йодиду талію, що призводить до забруднення промислових приміщень шкідливими речовинами, в том числі, і радіонуклідами. Якщо операцію оплавлення опустити, то прилипання поверхні злитка до стінки ампулі призводить до розтріскування кристала при охолодженні. Вірогідність розтріскування тим більша, чим більшого діаметра і висоти необхідно отримати кристал.

Відомо, що взаємодія злитка з кварцом обумовлена наявністю в розплаві і кристалі гідроксид-іонів [6, 7]. Розроблено способи вирощування [8, 9], що запобігають забрудненню розплаву іонами  $\text{OH}^-$  і  $\text{CO}_3^{2-}$ , в тому числі включають додаткову обробку розплаву [9, 10] катіонами з метою перевести кисневомісні домішки в нерозчинні сполуки. Недоліком цих способів є неминуче забруднення розплаву катіонами, що вводяться [10], і пов'язаний з ними негативний вплив на функціональні характеристики кристалів.

**Постановка завдання та його вирішення.** Мета роботи полягала у розробці екологічно безпечного способу вирощування досконалих кристалів  $\text{CsI:Tl}$  для радіоекологічного моніторингу. Технологія має виключати операцію оплавлення злитка і вірогідність забруднення навколишнього середовища шкідливими речовинами, а також дозволяти отримувати

кристали  $\text{CsI:Tl}$  без кисневмісних домішок з високими сцинтиляційними характеристиками.

**Методика експерименту.** Для експериментів використовувалася комерційна сіль фірми Sigma-Aldrich. Відбиралися тільки ті партії солі, що не виявляли виділення «високотемпературної» води [6] в процесі нагрівання. Методика такої перевірки за допомогою термодесорбції газів описана в роботі [11]. За висновками цієї роботи наявність «високотемпературної» води пов'язана з аквакомплексами на основі  $\text{OH}^-$  внаслідок забруднення солі цією речовиною при зберіганні, або при нагріві вологої солі вище 40 °С.

Вирощувалися кристали двох типів, які розрізнялися методикою підготовки сировини. Тип I відповідав традиційному сушінню йодиду цезію. Заповнення ампул сіллю проводилося в виробничому приміщенні з температурою 20 °С і відносною вологістю 70 % за люмінесцентним освітленням. Заповнена кварцова ампула вакуумувалася до залишкового тиску 0,7 Па і відкачувалася далі протягом 30 хв. Потім температура печі підвищувалася до  $T = 560$  °С зі швидкістю 50 °С/год. Підготовлена таким чином ампула з сіллю вважалася готовою для росту кристалу.

Для кристалів типу II сушіння солі проводилося аналогічним чином. Різниця полягала в тому, що для запобігання фотолізу всі операції по заповненню ампули вологою сіллю, її зберіганню і підготовки сировини проводилися при освітленні червоним світлом. Використовувалися ампули діаметром 45 і висотою 180 мм, оскільки для ампули таких розмірів, як правило, не вдається уникнути прилипання кристала до кварцу при стандартному сушінні солі. Висушена сіль в деяких випадках охолоджувалася до кімнатної температури і піддавалася повторній гідратації. Перевірка якості сировини, що була підготовлена таким чином, проведена за методом [11], а результати наших тестів представлено на рисунку 2.

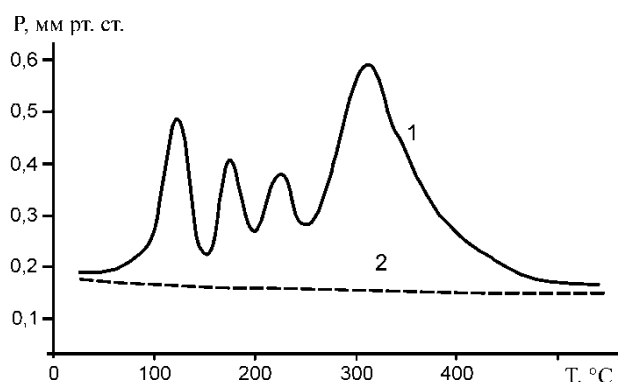


Рисунок 2 – Термічна газова десорбція із солі  $\text{CsI}$ :  
1 – традиційна підготовка сировини;  
2 – за пропонуваним методом

Порівнюючи криві 2 і 1, можна зробити висновок про відсутність піків «високотемпературної води» у разі сировини типу II. Така сіль не вмішувала іони

$OH^-$  внаслідок її забруднення при зберіганні і не придбала їх після сушіння.

Після сушіння кристали вирощувалися методом Стокбаргера в цих же ампулах. Розплав не відкачувався. Після плавлення солі, ампула на короткий час піднімалася над піччю для визначення характеру меніска (опуклий або увігнутий), як це описано у [6]. Спрямована кристалізація проводилася при опусканні ампули зі швидкістю 2 мм/год. Після закінчення кристалізації нагрівачі відключалися і злиток повільно охолоджувався разом з піччю.

Вимірювання світлового виходу проводилося на спектрометричному стенді [12] з фотодіодом S3590-08 фірми Hamamatsu відносно еталону. Точність вимірювань за даним методом становила  $\pm 3,2\%$  [13]. Вимірювання післясвічення були проведені на приладі NPG3 фірми Heilmann. Анодний струм рентгенівської трубки складав 0,6 мА за напругою 140 кВ. Величина післясвічення визначалася через 100 мс і 5 хв. після закінчення імпульсу збудження тривалістю 1 с.

Для визначення спектрометричних характеристик виготовлялися зразки розміром  $10 \times 10 \times 10$  мм, а для вимірювання післясвічення  $\varnothing 20 \times 4$  мм. Полірування виробів проводилася з урахуванням рекомендацій [14] щодо мінімізації спотвореного та запобігання утворенню мертвого шару.

Адгезія до кварцу. Найбільш чутливим тестом на наявність аніонів  $OH^-$  в розплаві і вирощеному кристалі [6, 7] є характер змочування стінки ампули і прилипання злитка до матеріалу ампули. На відміну від типу I, отримані кристали типу II не прилипали до кварцу, легко витягалися з ампули і не руйнувалися при подальшій механічній обробці. Контроль форми меніска показав, що для типу II він завжди був опуклим. З цієї точки зору, наші результати співпадають з даними [9, 10], де руйнування злитків запобігали додатковою очисткою розплаву.

На базі візуальних спостережень можна припустити, що вирощені кристали не вміщують кисневомісних домішок. Такий висновок підтверджується спектрами коливального поглинання. Дійсно, як це видно з кривої 2 на рисунку 3, вирощені кристали типу II не мають смуг поглинання в ІЧ-області спектра на відміну від типу I, для яких є характерною наявність слабких смуг поглинання, що пов'язані з іонами карбонату.

Відомо, що смуги поглинання (див. рисунок 2) відповідають деформаційним ( $880 \text{ см}^{-1}$ ) і валентним ( $1380 \text{ см}^{-1}$ ) коливанням іонів  $CO_3^{2-}$  [15, 16], а оцінка їх концентрації ( $C_K$ ) за даними [17] дає змогу заключити, що  $C_K \leq 5 \cdot 10^{-5}$  моль%.

Наведені результати відносно кристалів II співпадають з даними [9], де вивчалися кристали  $CsI$ -pure, вирощені з домішкою  $EuI_2$ . На відміну від роботи [9], отримані кристали  $CsI$  не мають смуг в УФ-частині спектра, обумовлених катіонами  $Eu^{2+}$ .

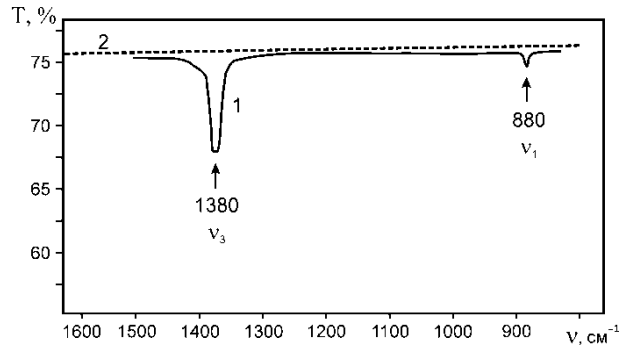
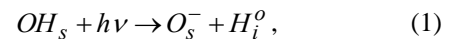


Рисунок 3 – Спектри коливального поглинання отриманих кристалів типу I (1) та II (2)

На жаль зі спектрів ІЧ-поглинання не випливає прямий висновок про відсутність іонів  $OH^-$ , внаслідок їх малої сили осцилятора [17].

*Утворення радіаційних дефектів.* Відомо, що радіаційна стійкість кристалів  $CsI:Tl$  критичним чином залежить від домішок  $OH^-$  і  $CO_3^{2-}$ . Кристали  $CsI:Tl$  легко забарвлюються на денному світлі, якщо вони містять навіть слідові кількості зазначених домішок. Пов'язано це з протіканням специфічних радіаційно-хімічних реакцій в кристалічній ґратці. Суть механізму [16] полягає в тому, що під дією радіації відбувається розкладання іонів  $OH^-$  за реакцією:



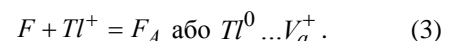
де нижні індекси s й i позначають положення частинки в вузлі або міжвузлі, відповідно.

Атоми водню завдяки великій рухливості легко дифундують по міжвузлях і реагують з іонами карбонату за реакцією:



де  $V_a^+$  – аніонна вакансія.

В результаті реакції (2) з двовалентного карбонат-іону утворюється одновалентний гідрокарбонат, а аніонна вакансія перетворюється у F-центр. У кристалах  $CsI:Tl$  утворені F-центри розташовуються поблизу  $Tl^+$  й створюють  $F_A$ -центри, що складаються з аніонної вакансії, катіона активатора і електрона [16]



Позначення  $F_A$  передбачає локалізацію електрона переважно на аніонній вакансії, а  $Tl^0 \dots V_a^+$  – на катіоні талію [17].

Спектри поглинання опромінених кристалів двох типів наведені на рисунку 4.

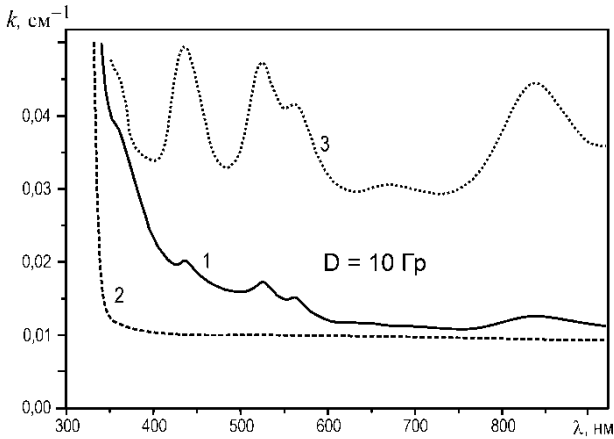


Рисунок 4 – Спектри електронного поглинання кристалів типу I (1) і II (2) (доза опромінення 10 Гр.)

Видно, що на відміну від типу I центри забарвлення  $F_A$  за описаним механізмом в кристалах типу II не утворюються. На основі цих даних можна впевнено заключити, що кристали типу II не вміщують ні  $CO_3^{2-}$  ні  $OH^-$ .

**Спектрометричні характеристики.** Можна припустити априорі, що зазначені кількості домішок не можуть негативно вплинути на світловий вихід і енергетичне розділення кристалів  $CsI:TI$ , оскільки концентрація основної домішки (талію) в них набагато більша і дорівнює  $C_{TI} \approx 1,1 \cdot 10^{-1} \%$  для зразків розміром  $10 \times 10 \times 10$  мм. Дані про характеристики представлено в таблиці для кристалів  $CsI:TI$  двох типів порівняно з еталоном.

Таблиця – Характеристики кристалів  $CsI:TI$

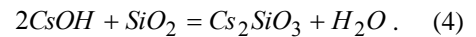
| Характеристика                       | Тип кристалів    |         |                         |
|--------------------------------------|------------------|---------|-------------------------|
|                                      | еталон           | I увіг. | II опукл.               |
| Форма меніска                        |                  | так     | ні                      |
| Адгезія до матеріалу ампули          |                  | так     | ні                      |
| Наявність ІЧ-поглинання              |                  | так     | ні                      |
| Наявність F-центрів                  | ні               | так     | ні                      |
| Світловий вихід, фот./МеВ            | 48 000           | 48700   | 48 200                  |
| Енергетичне розділення, % (по 137Cs) | 4,90             | 4,82    | 4,87                    |
| Рівень післясвічення, %              | 100 мс<br>10 хв. | 0,8     | 0,55<br>0,07<br>< 0,005 |

З даних таблиці дійсно випливає, що світловий вихід вирощених кристалів відповідає еталону. Енергетичне розділення кристалів типу I і II в межах помилки вимірювань не відрізняється від еталону і становить величину  $R \sim 4,84 \%$ . Слід зауважити, що вимірювання проведені для фіксованого часу формування сигналу  $t_{RC} = 12$  мкс.

В таблиці також надано дані про післясвічення вирощених кристалів. Відомо, що вказані домішки

суттєво впливають на тривале післясвічення (через 10 хв.) екранів на основі сцинтиляційного матеріалу  $CsI:TI$  [18]. Як видно з даних таблиці, тривале післясвічення кристалів типу II істотно зменшено, в той час коли їх мілісекундне післясвічення залишилось тим самим. Цей факт також підтверджує висновок про відсутність  $OH^-$  груп у кристалах типу II.

**Обговорення результатів.** Отже, встановлено, що запропонований метод підготовки солі до вирощування, дозволяє отримувати кристали  $CsI:TI$  високої якості, які не прилипають до стінок кварцової ампули. Однак самі по собі високі значення сцинтиляційних характеристик не є прямим доказом переваги запропонованого способу сушіння сировини. Справа в тому, що розкислювач для кварцу на розплав добре відома [6]. При тривалій витримці розплаву відбувається його очищення за реакцією



У досліджуваних умовах вода, що утворюється внаслідок реакції (4), може випаровуватися з розплаву, конденсуватися на холодних частинах ампули і не брати участі в подальших реакціях. Силікати концентруються на стінках ампули, утворюючи на межі розділу візерунки, схожі на іній. Подібна ситуація характерна для випадку зростання «чистого» кристала з «брудного» розплаву. Таке очищення розплаву матеріалом самої ампули стає неефективним при вирощуванні великогабаритних кристалів. Вище ми вже відзначали, що в даний час знайдено розкислювачі і гетери, що очищають розплав  $CsI$  більш ефективно, ніж кварц [9, 10].

Той факт, що вирощені злитки типу II не прилипали до стінок кварцової ампули, а меніск на межі розділу був опуклим, якраз і доповнює наведені дані про відсутність  $OH^-$  як в кристалі, так і в розплаві. Джерелом забруднення кристалів зазначеними домішками є процес сушіння, оскільки тестування відібраних партій солі не виявило наявності піків «високотемпературної» води. Висушена сіль в деяких випадках охолоджувалася до кімнатної температури і піддавалася повторній гідратації. Тестування зразків підготовленої солі показало, що поява піків газовиділення, що відповідають «високотемпературній» воді, буває тільки для кристалів типу I.

Таким чином, запропонований спосіб отримання кристалів  $CsI:TI$  дозволяє покращити екологічну безпеку процесу росту кристалів, як у відношенні основної домішки (йодид талію), так і радіонуклідів, що вводяться до кристалічної ґратки у випадку вирощування сцинтиляторів для радіоекологічних досліджень. Спосіб не потребує додаткового обладнання для оплавлення і відпалу злитків і, тому, дозволяє зменшити енерговитрати.

**Висновки.** Запропоновано екологічно безпечний спосіб отримання скінтіляторів для радіоекологічного моніторингу. Методом Стокбаргера в герметичних кварцових ампулах вирощені кристали  $CsI:Tl$  високої спектрометричної якості. Отримані кристали не прилипають до матеріалу ампули і не руйнуються при подальшій механічній обробці. Відсутність взаємодії між злитком і кварцом дозволяє виключити операцію поверхневого оплавлення, що покращує екологічну безпеку процесу, знижує енерговитрати і витрати на додаткове обладнання.

Спектри коливального поглинання отриманих кристалів  $CsI:Tl$  не містять смуг поглинання в ІЧ-області спектра, обумовлених іонами  $OH^-$  й

$CO_3^{2-}$ , а електронне поглинання у видимій області не має смуг поглинання центрів забарвлення  $F_-$  й  $F_A$ -типу.

Надійним критерієм придатності солі для отримання кристалів без домішок  $OH^-$  й  $CO_3^{2-}$  є відсутність піків високотемпературної десорбції води. Показано, що необхідною умовою підготовки солі є ретельна дегідратація при температурі не вище  $40^\circ C$  за виключенням фотолізу.

Такий спосіб вирощування рекомендований для отримання кристалів  $CsI:Tl$  з радіонуклідами для радіоекологічного моніторингу і геологорозвідки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Lecoq, P. Inorganic Scintillators for Detector Systems [Text] / P. Lecoq, A. Gektin, M. Korzhik // Springer. – 2017. – 408 p.
2. Grupen, C. Particle Detectors [Text] / C. Grupen, B. A. Shwartz. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 651 p.
3. Lyubynskiy, V. R. Scintillation Assemblies Based on NaI:Tl Crystals with Reference Sources [Text] / V. R. Lyubynskiy et al. // Proc. Int. Conf. Inorganic Scintillators and Their Applications. – M.: Moscow State University, 2000. – P. 735–739.
4. Catalog of the Crimatec. Scintillation Detectors. – France: Saint-Gobain Ceramiques Industrielles, 1992. – 111 p.
5. А.с. 695396 СССР МПК G 01T 1/20. Аэрогамма-спектрометр / А. В. Долгополова, В. С. Данилов, В. М. Эккерман и др. – № 2637104; заявл. 06.07.1978.
6. Горилецкий, В. И. Рост кристаллов [Текст] / В. И. Горилецкий, Б. В. Гринев, Б. Г. Заславский, Н. Н. Смирнов. – Х.: Акта, 2002. – 535 с.
7. Shpilinskaya, L. N. The effect of oxygen-containing anions on luminescent properties of CsI [Text] / L. N. Shpilinskaya et al. // SPQEO. – 2000. – Vol. 3. – P. 178–180.
8. Zaslavsky, B. G. Distinctive features of automated pulling of large scintillation alkali iodides single crystals without oxygen-containing impurities [Text] / B. G. Zaslavsky // J. Crystal Growth. – 2000. – Vol. 218. – P. 277–281.
9. Kudin, A. M. CsI crystals for the mid-IR region [Text] / A. M. Kudin et al. // J. Opt. Technology. – 2007. – Vol. 74. – P. 633–635.
10. Cherginets, V. L. Luminescence properties of CsI crystals grown from the melt treated by metals-getters [Text] / V. L. Cherginets et al. // J. Crystal Growth. – 2013. – Vol. 380. – P. 143–147.
11. Sofronov, D. S. Origin of the Thermal Desorption Peaks of Gases in NaI above  $180^\circ C$  [Text] / D. S. Sofronov et al // Inorganic Materials. – 2009. – Vol. 45. – P. 1314–1318.
12. Кудин, А. М. Спектрометрический стенд для измерения скінтіляционных характеристик детекторов на основе системы «скінтілятор – PIN фотодиод» [Текст] / А. М. Кудин, Ю. А. Борошенко, В. В. Белогуб, А. В. Диденко // Вісник ХНТУ. – Х.: ХНТУ, 2014. – № 15 (1058). – С. 87–91.
13. Sysoeva, E. Comparison of the Methods for Determination of Scintillation Light Yield [Text] / E. Sysoeva, V. Tarasov, O. Zelenskaya // NIMA. – 2002. – Vol. A486. – P. 67–73.
14. Шкоропатенко, А. В. Причины нестабильности спектрометрических характеристик кристаллов  $CsI:Tl$  с матированной поверхностью [Текст] / А. В. Шкоропатенко // Физическая инженерия поверхности. – Х., 2015. – Т. 13. – С. 175–183.
15. Grinev, B. V. Photo- and radiation-chemical transformations of carbonate ions in CsI and CsI(Tl) crystals [Text] / B. V. Grinev // Optics and Spectroscopy. – Springer, 2000. – Vol. 89. – P. 57–62.
16. Grinyov, B. V. Radiation-induced defects formation in CsI crystals containing hydroxyl and carbonate ions [Text] / B. V. Grinyov // Functional Materials. – Kh.: STC «ISC», 1997. – Vol. 4. – P. 540–543.
17. Trefilova, L. Photo- and radiation-stimulated processes in CsI:Tl crystals [Text] / L. Trefilova // IEEE Transaction on Nuclear Science. – IEEE Nuclear and Plasma Society, 2008. – Vol. 55. – № 3. – P. 1263–1269.
18. Трефілова, Л. М. Роль домішкових іонів  $CO_3^{2-}$  у процесах утворення центрів свічення і центрів забарвлення в кристалах  $CsI$ : автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.10 / Трефілова Лариса Миколаївна; Наук.-техн. концерн «Інститут монокристалів» НАН України. – Х., 2000. – 18 с.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2017 р.

**A. Kudin, V. Muntyan, T. Oliynyk, K. Kudin**

**ECOLOGY SAFETY TECHNIQUE FOR GROWTH OF CsI:Tl CRYSTALS WITH INTERNAL RADIOISOTOPES FOR RADIOECOLOGICAL MONITORING**

The ecological safety technique the obtaining of scintillator for radioecology monitoring has been proposed. *CsI:Tl* crystals have been grown by directed crystallization in quartz ampoules. Grown ingots do not interact with material of container. Crystals are not cracked during cooling and subsequent machining. The technique of crystal growth excludes the surface melting of ingot that improves the ecological safety and reduces energy costs.  $OH^-$  and  $CO_3^{2-}$  ions do not present in grown crystals according to IR spectra of vibration absorption in which the bands of noted impurities are absent. Electron absorption in visible range does not shows the presence of  $F_-$  and  $F_A$ -centers after irradiation. Spectrometric characteristics of manufactured scintillators are not inferior to standard. The developed technique is recommended to crystal growth of *CsI:Tl* with internal radioisotopes for ecological monitoring. The peculiarity of this technique is the dehydration of raw material at  $T \leq 40^\circ C$  in conditions which exclude the photolysis of salt.

**Keywords:** ecological safety, radioecology monitoring, crystal growth, surface melting, scintillation characteristics.

**А. М. Кудин, В. К. Мунтян, Т. Н. Олейник, К. А. Кудин**

**РАЗРАБОТКА БЕЗОПАСНОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ CsI:Tl С РАДИОНУКЛИДАМИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ**

Предложен безопасный способ получения сцинтилляторов для радиоэкологического мониторинга. Методом направленной кристаллизации в кварцевых ампулах выращены кристаллы *CsI:Tl*, которые не прилипают к материалу контейнера и не разрушаются при охлаждении. Способ исключает операцию поверхностного оплавления слитка, что улучшает экологическую безопасность и снижает энергозатраты. Спектры колебательного поглощения выращенных кристаллов не содержат полос, обусловленных ионами  $OH^-$  и  $CO_3^{2-}$ , а электронное поглощение после облучения не имеет полос, обусловленных центрами окраски  $F_-$  и  $F_A$ -типа. Спектрометрические характеристики выращенных кристаллов не уступают эталону. Метод рекомендован для выращивания сцинтилляторов с изотопами, введенными в кристаллическую решетку, и отличается дегидратацией сырья при  $T \leq 40^\circ C$  в условиях, исключающих фотолиза соли.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, радиоэкологический мониторинг, рост кристаллов, поверхностное оплавление, сцинтилляционные характеристики.