

Препринти Інституту фізики конденсованих систем НАН України розповсюджуються серед наукових та інформаційних установ. Вони також доступні по електронній комп'ютерній мережі на WWW-сервері інституту за адресою <http://www.icmp.lviv.ua/>

The preprints of the Institute for Condensed Matter Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine are distributed to scientific and informational institutions. They also are available by computer network from Institute's WWW server (<http://www.icmp.lviv.ua/>)

Роман Романович Левицький  
Анатолій Степанович Волошиновський  
Степан Васильович Мягкота  
Андрій Степанович Вдович

АГРЕГАТУВАННЯ РТУТЕПОДІБНИХ ТА РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ІОНІВ В  
ЛУЖНО-ГАЛОЇДНИХ КРИСТАЛАХ ЯК МОДЕЛЬ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ В  
ЛПВМ

Роботу отримано 2 липня 2007 р.

Затверджено до друку Вченою радою ІФКС НАН України

Рекомендовано до друку семінаром відділу теорії модельних  
спінових систем

Виготовлено при ІФКС НАН України  
© Усі права застережені

Національна академія наук України



ІНСТИТУТ  
ФІЗИКИ  
КОНДЕНСОВАНИХ  
СИСТЕМ

ICMP-07-07U

Р.Р. Левицький, А.С. Волошиновський, С.В. Мягкота,  
А.С. Вдович

АГРЕГАТУВАННЯ РТУТЕПОДІБНИХ ТА  
РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ІОНІВ В ЛУЖНО-ГАЛОЇДНИХ  
КРИСТАЛАХ ЯК МОДЕЛЬ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ В ЛПВМ

ЛЬВІВ

УДК: 535, 538.9

PACS: 78.60.Цb, 78.67.Bf

### Агрегування ртутеподібних та рідкісноземельних іонів в лужно-галоїдних кристалах як модель кластеризації в ЛПВМ

Р.Р. Левицький, А.С. Волошиновський, С.В. Мягкота, А.С. Вдович

**Анотація.** На основі результатів дослідження спектрально-люмінесцентних характеристик діелектричних кристалів різної структури, активованих іонами свинцю, показана можливість утворення свинцевомісних нанокристалів, що може моделювати механізм та причини утворення різних кристалічних включень в ЛПВМ. Спектрально-люмінесцентні параметри моно- та нанокристалів типу  $K_2LaCl_5$ , активованих іонами  $Ce^{3+}$  дозволяють висунути гіпотезу, що кристалічні включення типу  $U_zZr_yO_x$ ,  $ZrSiO_4$ ,  $FeSiO_4$ ,  $U_{1-x}Zr_xSiO_4$  можуть бути концентраторами джерел  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - опромінення ( $^{239}Pu$ ,  $^{241}Am$ ,  $^{244}Cm$ ,  $^{137}Cs$ ). Механічне руйнування лави під впливом  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - опромінення може сприяти виходу з лави кристалічних включень вищеназваного формульного складу.

### Agregating of mercury-like and rare-earth ions in the alkali halide crystals as model of clasterization in LFCM

R.R.Levitsky, A.S. Voloshinovskii, S.V. Myagkota, A.S.Vdovych

**Abstract.** On the basis of results of spectral-luminescent characteristics research for dielectric crystals of different structure, activated by lead ions, possibility of creation of lead-containing nanocrystals is shown, that can model mechanism and reasons of creation of different crystalline inclusions into LFCM. Spectral-luminescent parameters of  $K_2LaCl_5$ -type mono- and nanocrystals, activated by  $Ce^{3+}$  ions, let us suppose, that crystalline inclusions of  $U_zZr_yO_x$ ,  $ZrSiO_4$ ,  $FeSiO_4$ ,  $U_{1-x}Zr_xSiO_4$ -type may concentrate the sources of  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - rays ( $^{239}Pu$ ,  $^{241}Am$ ,  $^{244}Cm$ ,  $^{137}Cs$ ). Mechanical destruction of lava under influence of  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - rays may promote going out of lava the crystalline inclusions of above-named composition.

Подается в Журнал фізичних досліджень

Submitted to Journal of Physical Studies

© Інститут фізики конденсованих систем 2007

Institute for Condensed Matter Physics 2007

## 1. Вступ

Недостатня екологічна безпека об'єкту "Укриття" ставить проблему утилізації лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ), які утворилися в технологічному просторі під 4-им енергоблоком Чорнобильської АЕС в результаті техногенної аварії, як одну з важливих у державному масштабі.

Однією з причин гостроти екологічної ситуації, пов'язаної з ЛПВМ, є утворення радіоактивного пилу, який безперешкодно виходить за межі об'єкту "Укриття", розсіюється на навколишній території у залежності від рози вітрів, попадаючи при цьому, в дихальні шляхи людей і тварин, що може бути причиною різного виду захворювань. Тому пояснення хімічного складу ЛПВМ та прогноз їх поведінки є вкрай важливими для розуміння даної ситуації.

## 2. Процес наноутворення в ЛПВМ

В роботах [1-7] було встановлено, що в процесі довготривалого високотемпературного остигання лави, в якій були розчинені багаточисельні домішки, котрі утворилися в результаті хімічної взаємодії ядерного палива з конструкційними матеріалами реактора, будівельними матеріалами та матеріалами засипок (пісок, карбід бору, мармурова крупа, цеоліт, глина, свинець, доломіт), могли виникнути сприятливі умови для агрегування Al, Fe, Mg, Na, Zr, U з утворенням оксидів. Таке агрегування пояснює утворення цілого ряду кристалічних сполук, в склад яких входять вищеназвані домішки. Властивості таких кристалічних утворень можуть значно відрізнятися від властивостей подібних природних і штучних мінералів.

Рушійною силою утворення чужорідних агрегатних фаз є прямування системи "матриця+домішка" до стану з мінімальною вільною енергією. В реальних об'єктах рівноважний стан системи "матриця+домішка" досягається не завжди і тому в більшості випадків реалізуються метастабільні утворення. Зміну вільної енергії системи "матриця+домішка" при кластероутворенні можна записати у вигляді:

$$\Delta F = -\Delta F_e + \Delta F_{\pi} + \Delta F_{кл},$$

де  $\Delta F_e$  - зміна вільної енергії внаслідок переходу системи в більш вигідний енергетичний стан,  $\Delta F_{\pi}$  - зміна вільної енергії, зумовлена формуванням поверхні кластера,  $\Delta F_{кл}$  - зміна вільної енергії, зумовлена пружною деформацією кластера та оточуючої матриці [8].

Можливість утворення нанокристалічних включень у лаві було змодельовано нами на прикладі процесу агрегування йонів  $Pb^{2+}$  в галогідних кристалічних матрицях різної структури [9-27].

Для прикладу розглянемо цей процес детальніше для кристала  $CsCl:Pb$  [10, 14-16, 19, 25].

Високотемпературна обробка цього кристала приводить до активації руху аніонних і катіонних вакансій, що супроводжується структурною перебудовою координаційного аніонного оточення окремих випромінювальних центрів  $Pb^{2+}-v_c^-$  із восьмикратного до шестикратного. В результаті цього утворюється кластер типу молекули  $CsPbCl_3$  (Рис.1) [28].

Схильність молекулярних центрів  $CsPbCl_3$  до агрегації приводить до утворення спочатку нано-, а далі і мікрокристалів  $CsPbCl_3$ , диспергованих у матриці  $CsCl$ .

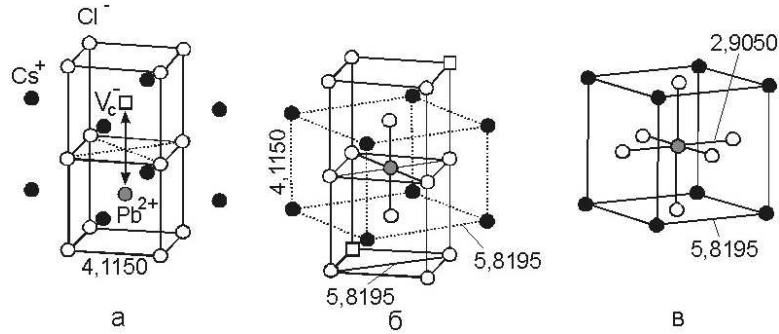


Рис. 1. Механізм утворення елементарної комірки  $CsPbCl_3$  у  $CsCl$ , активованому  $Pb^{2+}$ - йонами: а)  $Pb^{2+}$ - йон у ґратці  $CsCl$  з розташованою поруч вакансією, б) трансформація локальної структури до елементарної комірки  $CsPbCl_3$ , в) типова елементарна комірка  $CsPbCl_3$ .

В реальності не всі одиничні центри  $Pb^{2+}-v_c^-$  в кристалі  $CsCl:Pb$  агрегуються, тому нанокристали  $CsPbCl_3$  і одиничні центри  $Pb^{2+}-v_c^-$  співіснують. Відповідно, в спектрі люмінесценції співіснують смуги випромінювання одиничних свинцевих центрів і нанокристалів  $CsPbCl_3$  (Рис.2).

Просторове обмеження руху екситонів приводить до появи дискретних рівнів дірки і електрона, в результаті чого реалізується квантово-розмірний ефект. Його реалізація приводить до коротко-

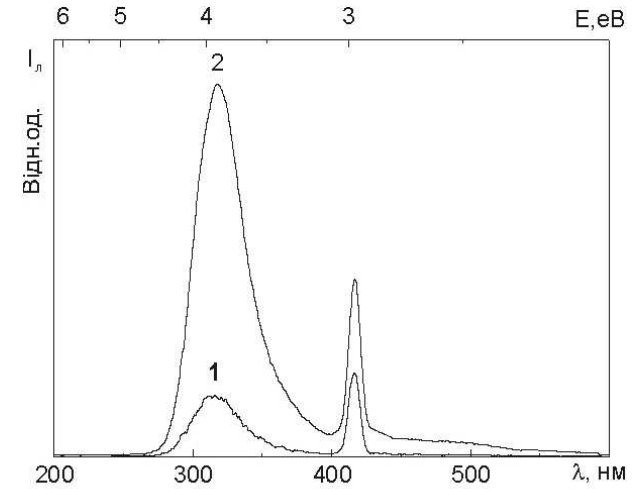


Рис. 2. Швидка (крива 1) та повільна (крива 2) компоненти люмінесценції кристала  $CsCl-0,5$  мол.%  $Pb$  при  $\lambda_{36}=170$  нм.  $T=10$  К.

хвильового зсуву смуги випромінювання вільного екситона нанокристала  $CsPbCl_3$  відносно смуги випромінювання вільного екситона цього монокристала на величину  $\Delta E$  (Рис.3).

Використання співвідношення між величиною короткохвильового зсуву і середнім радіусом нанокристала  $R_{QD}$  [29]:

$$\Delta E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2\mu R_{QD}^2}, \quad (1)$$

де зведена маса екситона  $\mu=0,65m_0$  [30, 31] монокристала  $CsPbCl_3$  ( $m_0$ —маса вільного електрона) дозволило визначити середній радіус нанокристалів типу  $CsPbCl_3$ , диспергованих в матриці  $Rb_{0,95}Cs_{0,05}Cl$  ( $R_{QD} \approx 2,3$  нм). Згідно теоретичних розрахунків, квантово-розмірний ефект проявляється в таких агрегатах, коли їх радіус  $R_{QD} < 10 r_{ex}$  [32]. Враховуючи чисельне значення радіуса екситона ( $r_{ex}=9,8$  Å [31] для кристала  $CsPbCl_3$ ), можна перекопатися, що отримана величина середнього радіуса нанокристалів  $R_{QD}$  задовольняє умові прояву квантово-розмірного ефекту.

Використовуючи формулу (1) було оцінено середній радіус нанокристалів  $CsPbCl_3$  диспергованих в матриці  $CsCl$  (4,7 нм).

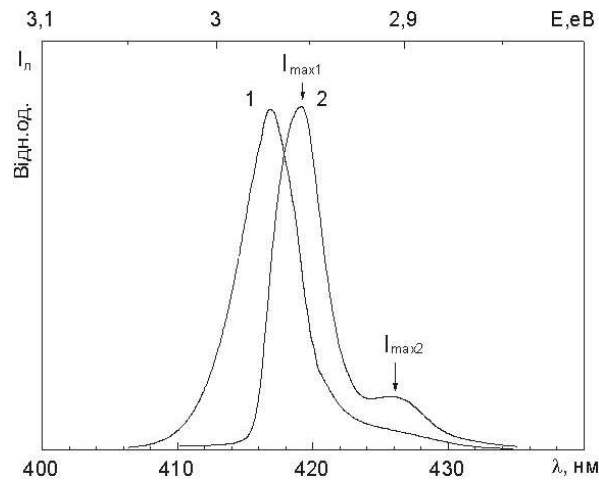


Рис. 3. Спектри люмінесценції кристала CsCl-0,5 мол.% Pb (крива 1) і монокристала CsPbCl<sub>3</sub> (крива 2) при  $\lambda_{36}=242$  нм. T=10 К.

Подібний короткохвильовий зсув у спектрах фотолюмінесценції був зареєстрований і для кристалів Rb<sub>0,95</sub>Cs<sub>0,05</sub>Cl-Pb і Rb<sub>0,8</sub>Cs<sub>0,2</sub>Cl-Pb, збуджених в області прозорості матриці ( $\lambda_{36}=310$  і 240 нм), поза смугами поглинання одиничних свинцевих центрів (Рис.4) [23, 26, 27].

Утворення таких агрегатів в кристалічних матрицях Rb<sub>1-x</sub>Cs<sub>x</sub>Cl-Pb ( $x=0,05\div 0,2$ ), де іони Rb<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>, а відповідно і йон домішки Pb<sup>2+</sup> характеризується шестикратним оточенням аніонів Cl<sup>-</sup>, виглядає логічним, оскільки для утворення октаедра [PbCl<sub>6</sub>]<sup>4-</sup> не потрібна структурна перебудова, на відміну від кристалічних матриць типу CsCl, де восьмикратне оточення аніонів Cl<sup>-</sup> повинно змінитися на шестикратне в процесі формування кластера типу молекули CsPbCl<sub>3</sub>. Октаедр [PbCl<sub>6</sub>]<sup>4-</sup> є основою молекулярного кластера CsPbCl<sub>3</sub> і тому його наявність в матриці сприяє утворенню нано- і мікрокристалів типу CsPbCl<sub>3</sub> в кристалах Rb<sub>1-x</sub>Cs<sub>x</sub>Cl-Pb. Крім цього, присутність зарядово-компенсаційної вакансії  $v_c^-$  поряд із йоном активатора Pb<sup>2+</sup> сприяє рухливості йонів Pb<sup>2+</sup> з подальшим утворенням свинцевовмісних агрегатів.

Розміри R<sub>QD</sub> нанокристалів CsPbCl<sub>3</sub>, утворених в результаті аналогічного високотемпературного відпалу в кристалах Rb<sub>0,95</sub>Cs<sub>0,05</sub>Cl-Pb ( $C_{Pb}=1$  мол. %) і Rb<sub>0,8</sub>Cs<sub>0,2</sub>Cl-Pb ( $C_{Pb}=1$  мол. %) складають від-

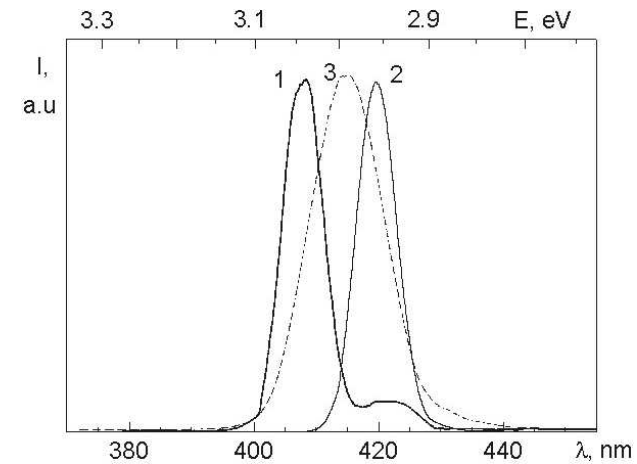


Рис. 4. Спектри люмінесценції кристалів Rb<sub>0,95</sub>Cs<sub>0,05</sub>Cl-Pb (крива 1), Rb<sub>0,8</sub>Cs<sub>0,2</sub>Cl-Pb (крива 3), збудженої в області прозорості матриці ( $\lambda_{36}=310$  і 240 нм), і спектр люмінесценції монокристала CsPbCl<sub>3</sub> при  $\lambda_{36}=310$  нм (крива 2).

повідно 2,3 і 4,7 нм. Таке співвідношення між розмірами нанокристалів в матрицях Rb<sub>0,95</sub>Cs<sub>0,05</sub>Cl і Rb<sub>0,8</sub>Cs<sub>0,2</sub>Cl-Pb ( $C_{Pb}=1$  мол. %) пояснюється тим, що із зменшенням кількості іонів Cs<sup>+</sup> в сполучі, ймовірність утворення нанокристалів CsPbCl<sub>3</sub> в матриці Rb<sub>0,95</sub>Cs<sub>0,05</sub>Cl зменшується. З другого боку, збільшення кількості іонів Cs<sup>+</sup> в кристалічній розчині Rb<sub>1-x</sub>Cs<sub>x</sub>Cl від величини  $x=0,05$  до  $x=0,2$  приводить до утворення в матриці Rb<sub>0,8</sub>Cs<sub>0,2</sub>Cl нанокристалів CsPbCl<sub>3</sub> більшого розміру, ніж у матриці Rb<sub>0,95</sub>Cs<sub>0,05</sub>Cl. Дійсно, середній радіус нанокристалів CsPbCl<sub>3</sub>, що утворились в кристалі Rb<sub>0,8</sub>Cs<sub>0,2</sub>Cl-Pb, в результаті однакового, як і у випадку кристала Rb<sub>0,95</sub>Cs<sub>0,05</sub>Cl-Pb високотемпературного відпалу, обрахований за формулою (1), рівний 4,7 нм. При цьому максимум люмінесценції нанокристалів CsPbCl<sub>3</sub> в матриці Rb<sub>0,8</sub>Cs<sub>0,2</sub>Cl з  $\lambda_{max}=415$  нм (рис. 1, крива 3) є зсунутий в довгохвильову сторону відносно максимуму люмінесценції з  $\lambda_{max}=401$  нм нанокристалів CsPbCl<sub>3</sub>, диспергованих в матриці Rb<sub>0,95</sub>Cs<sub>0,05</sub>Cl. Співпадіння величини середнього радіуса нанокристалів CsPbCl<sub>3</sub>, що утворились в кристалах Rb<sub>0,8</sub>Cs<sub>0,2</sub>Cl-Pb ( $C_{Pb}=1$  мол. %) і CsCl-Pb ( $C_{Pb}=1$  мол. %) в результаті однакового високотемпературного відпалу, вказує на те, що зменшена кіль-

кість іонів Cs в сполуці  $\text{Rb}_{0,8}\text{Cs}_{0,2}\text{Cl}$  в порівнянні із сполукою  $\text{CsCl}$ , котра сповільнює швидкість утворення нанокристалів  $\text{CsPbCl}_3$ , компенсується наявністю в матриці  $\text{Rb}_{0,8}\text{Cs}_{0,2}\text{Cl}$  октаєдрів  $[\text{PbCl}_6]^{4-}$ , присутність котрих пришвидшує процес утворення нанокристалів  $\text{CsPbCl}_3$ .

Висновки, зроблені про наявність квантово-розмірного ефекту нанокристалів  $\text{CsPbCl}_3$  підтверджуються даними кінетики загасання їх люмінесценції. А саме: крива кінетики загасання люмінесценції нанокристалів  $\text{CsPbCl}_3$ , диспергованих в кристалах  $\text{Rb}_{0,95}\text{Cs}_{0,05}\text{Cl-Pb}$ , збудженої в області прозорості матриці, описується експонентою з основним часом загасання  $\tau=0,15$  нс, тоді як кінетика загасання люмінесценції монокристала  $\text{CsPbCl}_3$ , збудженої в цьому ж спектральному діапазоні, описується експонентою з часом загасання  $\tau=0,48$  нс. Таким чином, основний час загасання смуги люмінесценції нанокристалів є суттєво меншим, ніж основний час загасання смуги екситонної люмінесценції монокристала  $\text{CsPbCl}_3$ . Таке скорочення часу загасання люмінесценції нанокристалів є ще одним доводом прояву квантово-розмірного ефекту.

З використанням методу атомно-силової мікроскопії (AFM) була досліджена топологія площини сколу кристала  $\text{Rb}_{0,95}\text{Cs}_{0,05}\text{Cl-Pb}$  (Рис.5) [26, 27].

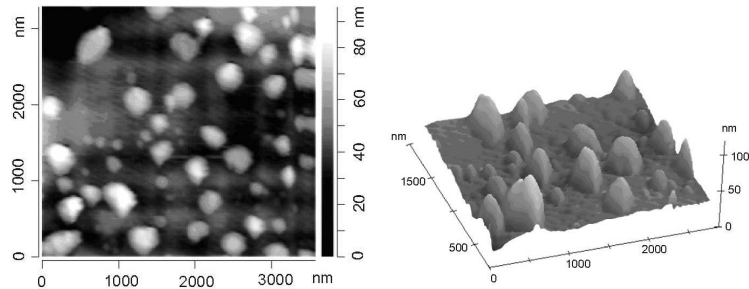


Рис. 5. AFM картинка площини сколу кристала  $\text{Rb}_{0,95}\text{Cs}_{0,05}\text{Cl-Pb}$  (зліва). Просторова картинка розміщення Pb-вмісних нанокристалів на поверхні сколу кристала  $\text{Rb}_{0,95}\text{Cs}_{0,05}\text{Cl-Pb}$  (справа).

Розміри Pb-вмісних нанокристалів в площині сканування є спотвореними внаслідок так званого tip convolution effect, який обумовлений тим, що скануюча голка має певний діаметр ( $\sim 50$  нм). Це приводить до завищення лінійних розмірів нанокристалів. Унаслідок

до цього, коректною є лише оцінка розмірів наночастинок по  $z$ -компоненті. Оцінені таким чином розміри Pb-вмісних нанокристалів в кристалічній матриці  $\text{Rb}_{0,95}\text{Cs}_{0,05}\text{Cl}$  знаходяться в межах 4-30 нм.

Статистичний розподіл Pb-вмісних нанокристалів на поверхні сколу кристала  $\text{Rb}_{0,95}\text{Cs}_{0,05}\text{Cl-Pb}$  приведений на рис.6 і є близьким до розподілу Ліфшиця-Слезова [33]:

$$P(u) = \frac{3eu^2 \exp[-1/(1-2u/3)]}{2^{5/3}(u+3)^{7/3}(1.5-u)^{11/3}}, \quad u < 3/2, \quad (2)$$

$$P(u) = 0, \quad u > 3/2, \quad (3)$$

де  $u = a/a_k$  ( $a_k$  – критичний радіус зародка).

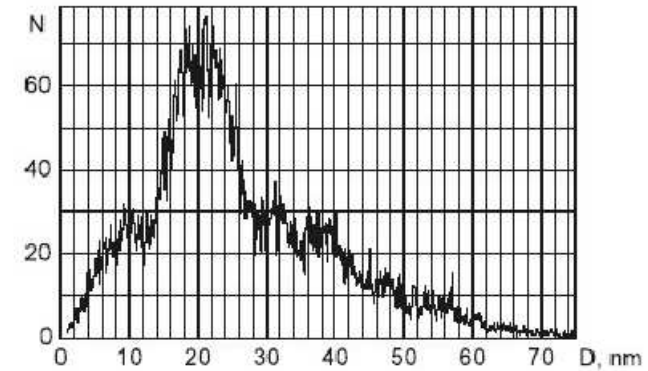


Рис. 6. Статистичний розподіл нанокристалів за розмірами (D-діаметр нанокристалів).

Ця формула описує розподіл частинок за розмірами у випадку перекоонденсаційної стадії дифузійного фазового розпаду перенасичених твердих розчинів.

Таким чином, процес утворення Pb-вмісних нанокристалів у діелектричних матрицях різної кристалічної структури може моделювати механізми утворення кристалічних включень типу  $\text{U}_z\text{Zr}_y\text{O}_x$ ,  $\text{ZrSiO}_4$ ,  $\text{U}_{1-x}\text{Zr}_x\text{SiO}_4$  та інших в ЛПВМ.

### 3. Процес пилоутворення в ЛПВМ

Поряд з вищевказаними кристалічними включеннями, ЛПВМ включає в себе незначну кількість таких елементів, як  $^{239}\text{Pu}$ ,

$^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ . Ці матеріали, разом з  $^{137}\text{Cs}$  є джерелом потужного  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -опромінення. Таке високоенергетичне самоопромінення ЛПВМ стимулює появу різного роду аніонних і катіонних вакансій, які, в свою чергу, з одного боку – сприяють процесу агрегування вищевказаних домішок і їх оксидів, а. з другого – приводять до деструкції утворених агрегатів.

Згідно з результатами роботи [34], нано- та мікрочастинки, втілені в аморфну матрицю - типова будова ЛПВМ. Під впливом самоопромінення в ЛПВМ утворюються дефекти, які переростають в мікротріщини. Внаслідок цього ЛПВМ руйнуються. Наночастинки є стійкіші, ніж аморфна матриця. Встановлено, що вони вилітають з лави. Такі частинки або кластери вилітають внаслідок зіткнення з  $\alpha$ -частинками або з іонами які утворюються внаслідок радіоактивного розпаду палива. Серед частинок, що вилітають з лави, є сполуки урану, зокрема  $\text{UO}_2$ .

Враховуючи переважачу кількість  $\text{UO}_2$  в порівнянні з  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ , постає питання, чи можуть утворені агрегати типу  $\text{U}_z\text{Zr}_y\text{O}_x$ ,  $\text{ZrSiO}_4$ ,  $\text{U}_{1-x}\text{Zr}_x\text{SiO}_4$ ,  $\text{FeSiO}_4$  концентрувати в собі джерела високоенергетичного опромінення, типу  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$  і під дією їхнього високоенергетичного опромінення перетворюватись у субмікронні частинки.

Входження актиноїдів у агрегати на основі сполук урану може бути промодельована на входженні іонів лантаноїдів у складні кристалічні структури на основі солей лантану. Підставою до цього є певна схожість зовнішніх електронних оболонок іонів лантаноїдів та актиноїдів.

З цією метою нами розроблено методику синтезу мікрофаз  $\text{K}_2\text{LaX}_5$ , вкраплених в матрицю AX (A=Cs, K, Rb; X=F, Cl, Br, I). Проведено комплекс спектрально-кінетичних досліджень люмінесцентних характеристик чистих та активованих домішками  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$  мікрофаз  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$ ,  $\text{K}_2\text{LaI}_5$ , вбудованих в матриці KCl, KI у порівнянні з їх об'ємними аналогами.

Об'ємні кристали  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$ ,  $\text{K}_2\text{LaCl}_5:\text{Ce}$ , а також кристалічні системи KCl-LaCl<sub>3</sub> і KCl-LaCl<sub>3</sub>-CeCl<sub>3</sub> з різними долями домішок LaCl<sub>3</sub> і CeCl<sub>3</sub> були вирошені в кварцевих ампулах методом Стокбаргера, використовуючи попередньо очищені матеріали KCl, LaCl<sub>3</sub> і CeCl<sub>3</sub>. Після вирощування кристалів, було проведено подальший високотемпературний відпал для того, щоб сприяти термічно-активованому переміщенню іонів, внаслідок чого утворюються чисті та активовані  $\text{Ce}^{3+}$  мікрофази  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$ , втілені в матрицю KCl. Дослідження рентгенівської дифракції на кристалах KCl не виявили змін в дифрак-

тограмах спричинених наявністю домішок LaCl<sub>3</sub> і CeCl<sub>3</sub>. Тому для виявлення ефектів фазоутворення були використані люмінесцентні методики, які чутливі до наявності домішок (мікрочасточек) навіть при їх надзвичайно малій кількості.

За допомогою оптичного мікроскопа із збільшенням  $100\times$  і  $500\times$  досліджувалась поверхня сколу кристала KCl-LaCl<sub>3</sub>(1 мол.%). На рис. 7 приведено зображення двох різних ділянок поверхні кристала. Чітко видно утворені мікрочастинки  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$  різного розміру (порядку 2 – 10 мікрон), дисперговані в матриці KCl. Для поверхні кристала із меншим вмістом Ln, а саме KCl-LaCl<sub>3</sub>(0,1 мол.%), утворення мікрочастин не виявлено. Не виявлено і наночастин, оскільки цього не дозволяла зареєструвати використана методика. Безпосереднє підтвердження утворення нанофаз може бути отримане при використанні методів атомної силової мікроскопії, або опосередковано на основі аналізу оптичних характеристик об'єктів. Для оцінки розмірів фази  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$ , вкрапленої в KCl, досліджувались спектри збудження власної люмінесценції фази  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$  в системі KCl-LaCl<sub>3</sub>(2; 1; 0,5; 0,1 і 0,05 мол.%)

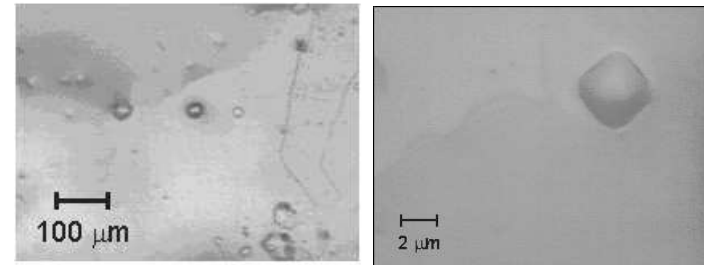


Рис. 7. Фотографія мікрофази  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$  на поверхні кристала KCl-LaCl<sub>3</sub>(1 мол.%). Збільшення мікроскопа:  $100\times$  (зліва) і  $500\times$  (справа).

Ідентичне спектральне положення максимуму спектра збудження власної люмінесценції об'ємного кристала  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$  та в мікрочастинці цього ж типу для випадку, коли кількість активатора LaCl<sub>3</sub> в матриці KCl становить 2; 1 і 0,5 моль% підтверджує факт утворення фази  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$  мікронного розміру (рис.8, криві 1-3). Виходячи з умови прояву квантово-розмірного ефекту ( $R < 10R_{ex}$ , де R – радіус утвореної наночастинки,  $R_{ex}$  – радіус екситона відповідного об'ємного аналога) [32], можна стверджувати, що радіус утвореного агрегата становить більше 5-6 нм, оскільки радіус екситона в кристалі

$K_2LaCl_5$  становить приблизно 5-6 Å. Враховуючи той факт, що процес агрегування іонів лантану в матриці KCl приводить до утворення нано- і мікрочастин різного розміру, утворення мікрочастин  $K_2LaCl_5$  мікронного розміру не викликає сумніву.

Значний короткохвильовий зсув максимуму спектра збудження власної люмінесценції мікрочастин  $K_2LaCl_5$  для випадку, коли кількість активатора  $LaCl_3$  в матриці KCl становить 0,05 і 0,1 мол. % (рис.8, криві 4 і 5), відносно спектра збудження власної люмінесценції об'ємного кристала  $K_2LaCl_5$ , вказує на утворення наночастин  $K_2LaCl_5$ . Згідно вище приведених оцінок прояву квантово-розмірного ефекту та числового значення радіуса екситона в кристалі  $K_2LaCl_5$ , середній радіус наночастин може становити менше, ніж 5-6 нм.

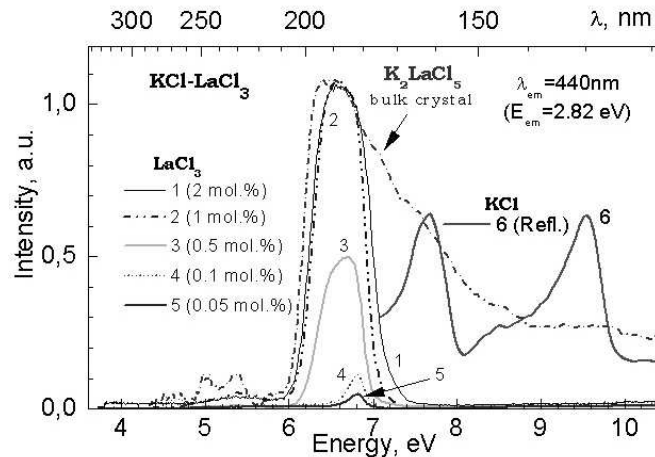


Рис. 8. Спектри збудження власної люмінесценції об'ємного  $K_2LaCl_5$  кристала та фази  $K_2LaCl_5$  (криві 1-5) в матриці KCl, крива 6 – спектр відбивання матриці KCl.  $T=300K$ .

Спектр люмінесценції об'ємного кристала  $K_2LaCl_5:Ce$  (0,1 мол.%) під впливом збудження в межах діапазону збудження  $4f \rightarrow 5d$  переходів іона  $Ce^{3+}$  (Рис. 9а, крива 1) проявляється характерною для люмінесценції  $Ce^{3+}$  дублетною структурою з максимумами при 344 і 373 нм.

Спектр збудження швидкої компоненти люмінесценції  $K_2LaCl_5:Ce$  (0.1 мол.%) виміряний для  $\lambda_{em}=340$  нм (Рис. 10а, крива 1) показує головні максимуми при 3.83, 4.93, 5.15 і 5.60 еВ, відтворюючи  $4f \rightarrow 5d$  поглинальні переходи в іоні  $Ce^{3+}$ , і нерозділену широку зону в діапазоні 5.85-6.65 еВ.

Люмінесценція іонів  $Ce^{3+}$  в об'ємному кристалі  $K_2LaCl_5:Ce$  (0.1 мол.%) має характерний час загасання 24 нс при збудженні в діапазоні 3.7-5.8 еВ.

Структура спектра збудження швидкої  $Ce^{3+} 4f \rightarrow 5d$  люмінесценції (Рис. 10а, крива 1) є нечітка в межах 5.85-6.65 еВ внаслідок вкладу збудження компоненти повільного свічення (Рис. 10а, крива 2), яка домінує в діапазоні 6.2-8.1 еВ і відповідає рекомбінаційним механізмам збудження  $Ce^{3+}$ .

При збудженні в діапазоні 6.2-8.1 еВ в спектрі люмінесценції кристала  $K_2LaCl_5:Ce$  (0.1 мол.%) домінує широка смуга з максимумом при 430 нм (Рис. 9а, крива 2). Ця широка смуга має максимум збудження при  $E_{exc}=6.72$  еВ (Рис. 10а, крива 3) і відповідає випромінюванню автолокалізованих екситонів (АЛЕ) матриці  $K_2LaCl_5$  [35]. Спектр люмінесценції кристала KCl- $LaCl_3$  (2 мол.%) збудженого при 6.7 еВ (Рис. 9б) має подібну широку смугу з максимумом при 430 нм.

В діапазоні 6.1-7.4 еВ спектр збудження цієї смуги (Рис. 10б, крива 1) відтворює особливості його форми для люмінесценції АЛЕ в об'ємному кристалі  $K_2LaCl_5$  (Рис. 10а, крива 3). Головний максимум для обох спектрів збудження має максимум при 6.72 еВ. Такі подібності в люмінесценції АЛЕ і спектрах збудження кристалів KCl- $LaCl_3$  (2 мол.%) і  $K_2LaCl_5:Ce$  (0.1 мол.%) підтверджують формування мікрофази  $K_2LaCl_5$  в системі KCl- $LaCl_3$  (2 мол.%).

Ефективне збудження для люмінесценції АЛЕ мікрофази  $K_2LaCl_5$  виявлено в енергетичному діапазоні до 7.7 еВ (Рис. 10б, крива 1), що відповідає області прозорості матриці KCl. Зменшення інтенсивності збудження люмінесценції АЛЕ реєструється в діапазоні фундаментального поглинання KCl (Рис. 10б, крива 2). Встановлено, що пік збудження при 7.62 еВ є чіткіший для випромінювання АЛЕ в мікрофазі  $K_2LaCl_5$  (Рис. 10б, крива 1), ніж в об'ємних кристалах  $K_2LaCl_5:Ce$  (0.1 мол.%) (Рис. 10а, крива 3). Таке ефективне збудження люмінесценції АЛЕ при  $E_{exc}=7.62$  еВ можна розглядати як доказ структурної однорідності мікрофази  $K_2LaCl_5$ .

Люмінесцентно-кінетичні дослідження системи KCl- $LaCl_3$  (2 мол.%) -  $CeCl_3$  (0,02 мол.%) дало додаткове підтвердження формування мікрофази  $K_2LaCl_5$ , втіленої в матрицю KCl для випадку KCl- $LaCl_3$  (2 мол.%). При збудженні 5.6 еВ спектр люмінесценції

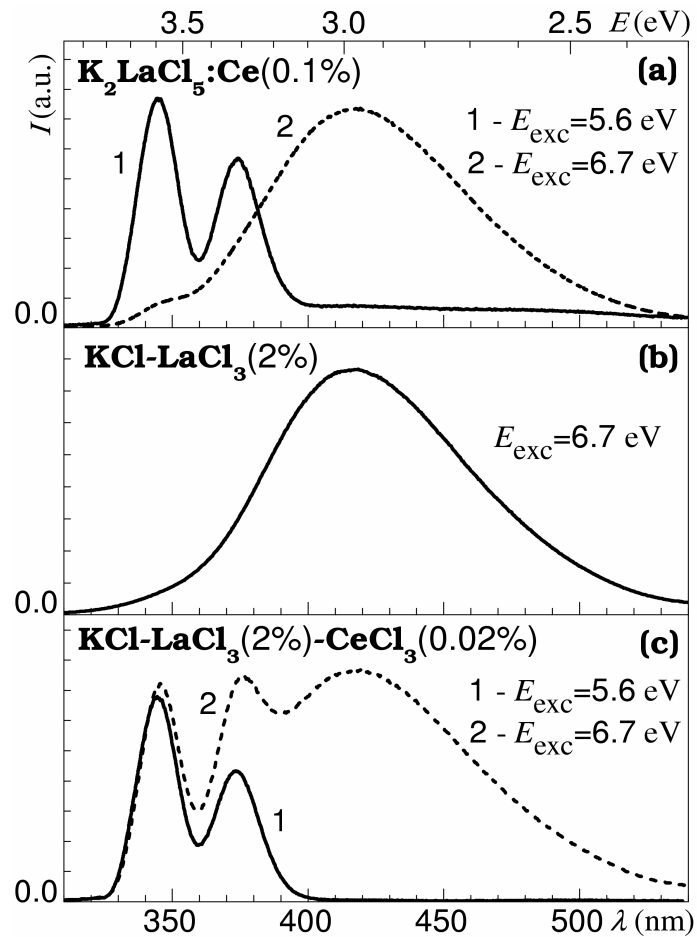


Рис. 9. Інтегральні спектри люмінесценції для об'ємного кристала  $\text{K}_2\text{LaCl}_5:\text{Ce}$  (а), чистої (б) і з домішками  $\text{Ce}^{3+}$  (с) мікрофази  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$  при  $T=8$  К.

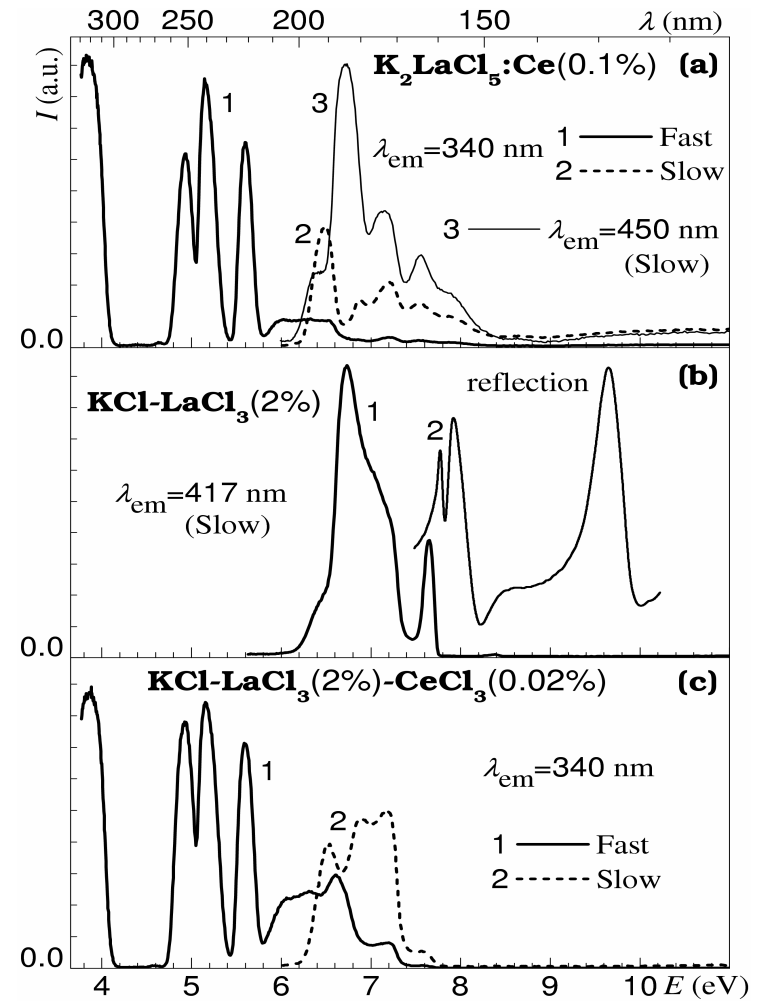


Рис. 10. Спектр збудження об'ємного кристала  $\text{K}_2\text{LaCl}_5:\text{Ce}$  (а), а також чистої (б) і з домішками  $\text{Ce}^{3+}$  (с) мікрофази  $\text{K}_2\text{LaCl}_5$  при  $T=8$  К.



кристала  $\text{KCl-LaCl}_3(2 \text{ мол.}\%)\text{-CeCl}_3(0.02 \text{ мол.}\%)$  (Рис. 9с, крива 1) має дублетну структуру з такими самими положеннями максимумів (344 і 373 нм) як і у випадку  $5d \rightarrow 4f$  випромінювання  $\text{Ce}^{3+}$  в об'ємному кристалі  $\text{K}_2\text{LaCl}_5\text{:Ce}(0.1 \text{ мол.}\%)$  (Рис. 9а, крива 1).

В діапазоні енергій 3.8-5.8 еВ спектр збудження швидкої  $5d \rightarrow 4f$  компоненти люмінесценції  $\text{Ce}^{3+}$  в системі  $\text{KCl-LaCl}_3(2 \text{ мол.}\%)\text{-CeCl}_3(0.02 \text{ мол.}\%)$  (Рис. 10с, крива 1) відтворює структуру відповідного спектра для кристалів  $\text{K}_2\text{LaCl}_5\text{:Ce}(0.1 \text{ мол.}\%)$  (Рис. 10а, крива 1). Добре видно збіг перших 4 піків  $4f \rightarrow 5d$  поглинання  $\text{Ce}^{3+}$ . Крім того, константа загасання (24 нс) для люмінесценції йонів  $\text{Ce}^{3+}$  в системі  $\text{KCl-LaCl}_3(2 \text{ мол.}\%)\text{-CeCl}_3(0.02 \text{ мол.}\%)$  виявляється такою ж як і для об'ємного кристала  $\text{K}_2\text{LaCl}_5\text{:Ce}(0.1 \text{ мол.}\%)$  при збудженні фотонами з енергією в діапазоні 3.8-5.8 еВ.

Таким чином, в системі  $\text{KCl-LaCl}_3(2 \text{ мол.}\%)\text{-CeCl}_3(0.02 \text{ мол.}\%)$  формується активована мікрофаза  $\text{K}_2\text{LaCl}_5\text{:Ce}$ .

Кінетика загасання люмінесценції йонів  $\text{Ce}^{3+}$  для об'ємного кристала  $\text{K}_2\text{LaCl}_5\text{:Ce}(0.1 \text{ мол.}\%)$  (Рис. 11, крива 1) містить в основному повільну (4 мкс) компоненту загасання при збудженні  $E_{exc}=7.09 \text{ еВ}$  ( $T=300 \text{ К}$ ).

Для випадку мікрофази  $\text{K}_2\text{LaCl}_5\text{:Ce}$  відповідна кінетика загасання (Рис. 11, крива 2) показує в основному швидку (43 нс) компоненту, тоді як вклад повільної компоненти значно зменшується. Зменшення вкладу повільної компоненти загасання люмінесценції у випадку рекомбінаційної люмінесценції йонів  $\text{Ce}^{3+}$  вказує зменшення пасток для носіїв заряду та більшу досконалість кристалічної структури мікрофази  $\text{K}_2\text{LaCl}_5\text{:Ce}$  у порівнянні із об'ємним аналогом [36, 37].

#### 4. Висновки

1. Спектрально-люмінесцентні властивості діелектричних матриць різної кристалічної структури, активованих іонами свинцю, підтвердили можливість утворення Рb-вмісних нанокристалів у діелектричних матрицях різної кристалічної структури, що може моделювати механізм та причини утворення кристалічних включень типу  $\text{U}_z\text{Zr}_y\text{O}_x$ ,  $\text{ZrSiO}_4$ ,  $\text{U}_{1-x}\text{Zr}_x\text{SiO}_4$ ,  $\text{FeSiO}_4$  в ЛПВМ. А саме: у процесі довготривалого високотемпературного остигання лави, в якій були розчинені багаточисельні домішки (пісок, карбід бору, мармурова крупа, цеоліт, глина, свинець, доломіт), могли виникнути сприятливі умови для агрегування Al, Fe, Mg, Na, Zr, U з утворенням різних оксидів. Таке агрегування пояснює утворення також цілого ряду кристалічних сполук, в склад яких входять вищезгадані домішки.

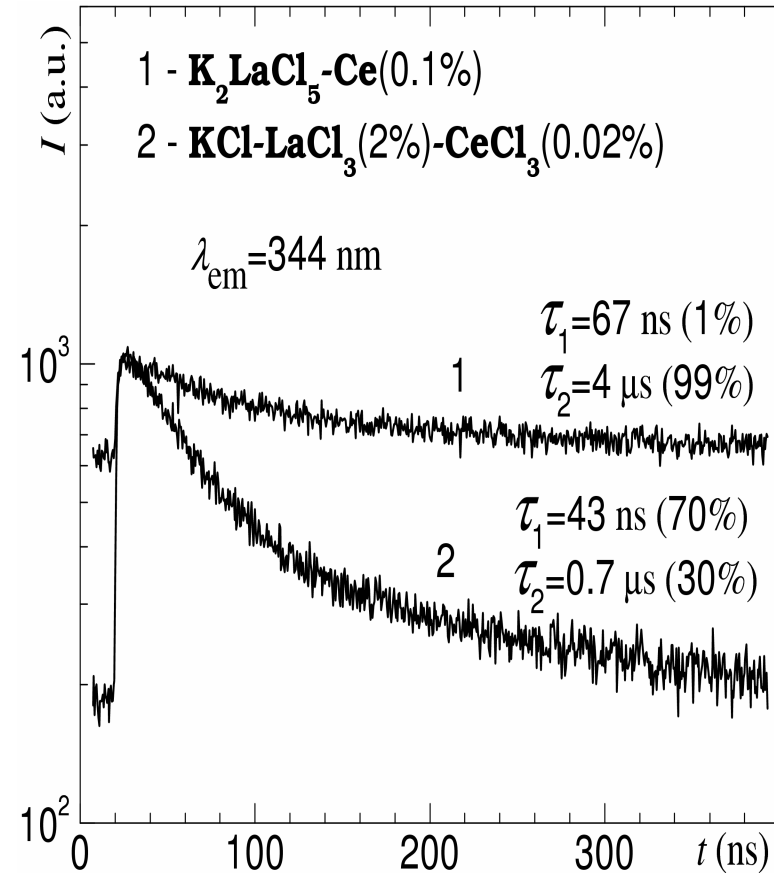


Рис. 11. Кінетика загасання люмінесценції  $\text{Ce}^{3+}$  в мікрофазі  $\text{K}_2\text{LaCl}_5\text{:Ce}$  і об'ємному кристалі, збуджена при  $E=7.09 \text{ еВ}$ .  $T=300 \text{ К}$ .

Властивості таких кристалічних утворень можуть значно відрізнятися від властивостей подібних природних і штучних мінералів.

2. Спектрально-люмінесцентні параметри кристалів KCl-LaCl<sub>3</sub>-CeCl<sub>3</sub> підтвердили здатність входження іонів Ce<sup>3+</sup> у мікрочастинки типу K<sub>2</sub>LaX<sub>5</sub> (X=Cl, Br, I). Це, в свою чергу, дозволяє висунути гіпотезу, що кристалічні включення типу U<sub>z</sub>Zr<sub>y</sub>O<sub>x</sub>, ZrSiO<sub>4</sub>, FeSiO<sub>4</sub>, U<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>SiO<sub>4</sub> можуть бути концентраторами джерел високоенергетичного  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -опромінення (<sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Am, <sup>244</sup>Cm, <sup>137</sup>Cs). Механічне руйнування лави під впливом високоенергетичного  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -опромінення може сприяти виходу з лави кристалічних включень вищезазначеного формульного складу.

## Література

1. Боровой А.А. и др. // Радиохимия. 1990, т.32, в. 6, с.103-113.
2. Андерсен Е.В. и др. // Радиохимия. 1990, т.32, в. 5, с.144-155.
3. Дубасов Ю.В., Савоненков В.Г., Смирнова Е.А. Систематизация радиоактивных продуктов аварии на Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1996, т.32, в. 2, с.101-116.
4. Пазухин Э.М. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования // Радиохимия. 1994, т.36, в. 2, с.97-142.
5. Пазухин Э.М. Лавоподібні паливовмісні маси 4-го блоку Чорнобильської АЕС: фізико-хімічні властивості, сценарій утворення, вплив на навколишнє середовище. Автореф. дис. докт. техн. наук / МНТЦ "Укриття" НАН України. Чорнобиль, 1999, 36 с.
6. Боровой А.А., Лагуненко А.С., Пазухин Э.М. Новые оценки количества ядерного топлива, находящегося на нижних отметках объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобыля (Problems of Chernobyl). 2002, в. 6, с.13-16.
7. Жидков А.В. Топливосодержащие материалы объекта "Укрытие" сегодня: Актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния // Проблемы Чернобыля. 2001, т.7, с.23-40.
8. Мильвидский М.Г., Чалдышев В.В. Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках – новый подход к формированию свойств материалов. Обзор. // Физика и техн. полупроводников. 1998, т.32, №5, с.513-522.
9. S.V.Myagkota (1999) "X-Ray Luminescence Spectral of Pb<sup>2+</sup> Aggre-

- gates in CsX(X=Cl,Br) Crystals" // Optics and Spectroscopy, v.87, p. 290-294.
10. Мягкота С.В., Глосковский А.В., Габа В.М., Волошиновский А.С., Стефанский И.В. Рентгенолюминесценция Pb-содержащих микрокристаллов, диспергированных в матрице CsCl // Журн. прикл. спектр., 2000, т.67, №4, с.480-482.
  11. Волошиновский А.С., Мягкота С.В., Глосковский А.В. Люминесцентно-кинетичні властивості Pb-вмісних мікрочастинки, диспергованих у матрицях АІ (А=Cs, Rb, К) // Журн. фіз. досл., 2000, т.4, №3, с.335-341.
  12. Myagkota S., Gloskovsky A., Voloshinovskii A., Govor M., Khapko Z. Luminescence of Pb-based microcrystals dispersed in CsI matrix // Func. Mater., 2000, v.7, №4(2), p.774-777.
  13. Волошиновський А.С., Мягкота С.В., Глосковский А.В., Стефанський І.В. Люмінесцентно-кінетичні характеристики кристалів PbCl<sub>2</sub>-Cs при синхротронному збудженні // Вісник ЛНУ (сер. фізична), 2000, вип. 33, с.60-65.
  14. Voloshinovskii A., Myagkota S., Gloskovsky A., Zazubovich S. Luminescence of CsPbCl<sub>3</sub> nanocrystals dispersed in CsCl crystal under high-energy excitation // HASYLAB Annual report, 2000, p.2550.
  15. Волошиновский А.С., Мягкота С.В., Глосковский А.В., Зазубович С.Г. Люминесценция нанокристаллов CsPbCl<sub>3</sub> в кристаллах CsCl:Pb и PbCl<sub>2</sub>:Cs при синхротронном возбуждении // Физ. тверд. тела, 2001, т.43, в.10, с. 1808-1814.
  16. Voloshinovskii A., Myagkota S., Gloskovsky A., Zazubovich S. Luminescence of CsPbCl<sub>3</sub> nanocrystals dispersed in a CsCl crystal under high-energy excitation // Phys. Stat. Sol. B, 2001, v.225, №2, p. 257-264.
  17. Voloshinovskii A., Myagkota S., Gloskovsky A., Gaba V. Spectral-luminescence parameters of CsPbCl<sub>3</sub> nanocrystals, dispersed in perovskite-like matrix // J. Phys.: Condens. Matter, 2001, v.13, p. 8207-8215.
  18. Мягкота С.В., Глосковский А.В., Стефанський І.В., Гаранин І.В., Габа В.М. Спектрально-люмінесцентні характеристики Pb-вмісних агрегатів, диспергованих у матриці CsBr // Журн. фіз. досл., 2002, т.6, №2, с. 213-217.
  19. Myagkota S., Gloskovsky A., Stefanskii I., Mel'nik O. Luminescence characteristics of CsPbCl<sub>3</sub> single- and nanocrystals in 4 to 26 eV energy range // Func.Mater., 2002, v.9, №2, p. 196-201.
  20. Voloshinovskii A., Myagkota S., Gloskovsky A., Zazubovich S. Luminescence of CsPbCl<sub>3</sub> microcrystals dispersed in PbCl<sub>2</sub>:Cs crystals

- studied under high-energy excitation // *J. Lumin.*, 2002, v.197, №9-10, p. 198-204.
21. Voloshinovskii A., Myagkota S., Gloskovskii A., Garapin I. The spectral- luminescence characteristics of RbPbCl<sub>3</sub>:Cs crystals in 4÷20eV region // *Phys. Stat. Sol. B*, 2003, v.236, №3, p. 687-693.
  22. Myagkota S.V., Khapko Z.A., Novosad I.S., Stefanskiy I.V., Garapin I.V. Luminescence and kinetic characteristics of CsPbCl<sub>3</sub> nanocrystals dispersed in CsCdBr<sub>3</sub> matrix // *Func. Mater.*, 2003, v.10, №1, p. 136-139.
  23. S. Myagkota, A. Gloskovskii, R. Gladyshevskii, A. Voloshinovskii. Luminescent-kinetic characteristics of CsPbCl<sub>3</sub> aggregates dispersed in Rb<sub>1-x</sub>Cs<sub>x</sub>Cl (x=0.05÷0,2) matrices // *Condens. Matter. Physics*, 2003, v.6, №2(34), p. 325 -332.
  24. Волошиновський А.С., Мягкота С.В., Левицький Р.Р., Вдович А.С. Агрегування домішкових іонів як один із можливих механізмів утворення мікрокристалічних включень в лавоподібних паливовмісних матеріалах // Препринт ІФКС НАН України, Львів, 2003, ІСМР-03-16U.
  25. Волошиновський А.С., Мягкота С.В. Агрегування іонів свинцю в кристалічних матрицях зі структурою типу CsCl // Препринт ІФКС НАН України, Львів, 2003, ІСМР-03-17U.
  26. Myagkota S., Gloskovskiy A., Gladyshevskii R., Voloshinovskii A. Luminescent kinetic characteristics of CsPbCl<sub>3</sub> aggregates dispersed in Rb<sub>1-x</sub>Cs<sub>x</sub>Cl (x=0,05-2) matrices. // *Optic Communications* 2004, v.229, №1-6, p. 264-272.
  27. Myagkota S., Gloskovskii A., Gladyshevskii R., Voloshinovskii A, Rodnyi P. Luminescent kinetic characteristics of lead-containing aggregates dispersed in Rb<sub>1-x</sub>Cs<sub>x</sub>Cl (x=0,05-2) matrices // *J. Phys.: Condens. Matter*, 2004, v.16, p. 483-490.
  28. M. Nikl, K. Polak, K. Nitsch: et al. Optical properties of Pb<sup>2+</sup>-based aggregated phase in CsCl host crystals: Quantum-confinement effects // *Phys. Rev. B*, 1995, v.51, №8, p. 5192-5199.
  29. Эфрос Ал.Л., Эфрос А.Л. Межзонное поглощение света в полупроводниковом шаре // *Физика и техника полупр.*, 1982, т.16, №7, с.1209-1214.
  30. Амитин Л.Н., Анистратов А.Т., Кузнецов А.И. Об электронной структуре и оптических свойствах перовскита CsPbCl<sub>3</sub> в области фундаментального поглощения // *Физ. тверд. тела*, 1979, т.21, в.12, с.3535-3541.
  31. Пащук И.П., Пидзырайло Н.С., Мацко М.Г. Экситонное поглощение, люминесценция и резонансное комбинационное рассеяние

- света кристаллов CsPbCl<sub>3</sub> и CsPbBr<sub>3</sub> при низких температурах // *Физ. тверд. тела*, 1981, т.23, в.7, с.2162-2165.
32. Itoh T., Ywabuchi Y., Kataoka M. Study on the size and shape of Cu-Cl microcrystals embedded in alkali-chloride matrices and their correlation with exciton confinement // *Phys.St.Solidi B*,- 1988,v.145, №2, p.567-577.
  33. Лифшиц И.М., Слезов В.В. О кинетике диффузионного распада пересыщенных твердых растворов // *Журн. эксперим. и теорет. физики*,- 1958, т.35, №2, с.479-492.
  34. Baryakhtar V., Gonchar V., Zhidkov A., Zhidkov V. Radiation damages and self-sputtering of high-radioactive dielectrics: spontaneous emission of submicronic dust particles // *Cond. Mat. Phys.* 2002, v. 5, №3(31), p. 1-23.
  35. E.V.D. van Loef, P. Dorenbos, C.W.E. van Eijk, K.W. Kramer, H.U. Gudel. Scintillation properties of K<sub>2</sub>LaX<sub>5</sub>: Ce (X=Cl, Br, I) // *Nucl. Instrum and Methods in Physics Research*, 2005, A537, p.232-236.
  36. A. Voloshinovskii, G. Stryganyuk, G. Zimmerer, P. Rodnyi, O. Antonyak, S. Myagkota, P.Savchyn. Luminescent characteristics of pure and Ce doped K<sub>2</sub>LaCl<sub>5</sub> phase in KCl host // *Physica status solidi (a)*, 2005, v.202, Issue 9, p.R101-R103.
  37. R. Levitskii, S. Myagkota, A. Voloshinovskii Creation of K<sub>2</sub>LaX<sub>5</sub>-Ce (X=Cl, Br, I) microcrystals as a model of aggregation processes in lava-like fuel containing materials // *Statistical Physics 2005: Modern Problems*. 2005.Lviv; Ukraine. Book of abstracts. P. 148.

# CONDENSED MATTER PHYSICS

The journal **Condensed Matter Physics** is founded in 1993 and published by Institute for Condensed Matter Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**AIMS AND SCOPE:** The journal **Condensed Matter Physics** contains research and review articles in the field of statistical mechanics and condensed matter theory. The main attention is paid to physics of solid, liquid and amorphous systems, phase equilibria and phase transitions, thermal, structural, electric, magnetic and optical properties of condensed matter. Condensed Matter Physics is published quarterly.

---

## ABSTRACTED/INDEXED IN:

- Chemical Abstract Service, Current Contents/Physical, Chemical&Earth Sciences
- ISI Science Citation Index-Expanded, ISI Alerting Services
- INSPEC
- Elsevier Bibliographic Databases (EMBASE, EMNursing, Compendex, GEOBASE, Scopus)
- "Referativnyi Zhurnal"
- "Dzhereho"

---

**EDITOR IN CHIEF:** Ihor Yukhnovskii

**EDITORIAL BOARD:** T. Arimitsu, *Tsukuba*; J.-P. Badiali, *Paris*; B. Berche, *Nancy*; J.-M. Caillol, *Orsay*; C. von Ferber, *Freiburg*; R. Folk, *Linz*; D. Henderson, *Provo*; Yu. Holovatch, *Lviv*; M. Holovko, *Lviv*; O. Ivankiv, *Lviv*; M. Korynevskii, *Lviv*; Yu. Kozitsky, *Lublin*; M. Kozlovskii, *Lviv*; H. Krienke, *Regensburg*; R. Levitskii, *Lviv*; V. Morozov, *Moscow*; I. Mryglod, *Lviv*; O. Patsahan (Assistant Editor), *Lviv*; N. Plakida, *Dubna*; G. Röpke, *Rostock*; Yu. Rudavskii, *Lviv*; I. Stasyuk (Associate Editor), *Lviv*; M. Tokarchuk, *Lviv*; I. Vakarchuk, *Lviv*; M. Vavrukh, *Lviv*; A. Zagorodny, *Kyiv*.

## CONTACT INFORMATION:

Institute for Condensed Matter Physics  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
1 Svientsitskii Str., 79011 Lviv, Ukraine  
Tel: +380(322)760908; Fax: +380(322)761158  
E-mail: cmp@icmp.lviv.ua    <http://www.icmp.lviv.ua>