

4. Матвійчук А.В. Аналіз та прогнозування розвитку фінансово-економічних систем із використанням теорії нечіткої логіки : монографія. – К. : Центр навч. літ-ри, 2005. – 206 с.
5. Матвійчук А.В. Аналіз і управління економічним ризиком : навч. посіб. – К. : Центр навч. літ-ри, 2005. – 224 с.
6. Сулим М.В. Моделювання інвестиційних проектів в умовах нечіткої інформації // Вісник Львівської комерційної академії. Серія економічна. – Львів : Вид-во ЛКА, 2007. – Вип. 25.
7. Ястремський О.І. Основи теорії економічного ризику : навч. посіб. – К. : Вид-во "Артек", 1997. – 248 с.

УДК 535.343.2

*Проф. З.П. Чорний, д-р фіз.-мат. наук; асист. І.Б. Пірко;
доц. В.М. Салапак, канд. фіз.-мат. наук; асист. М.В. Дячук –
НЛТУ України, м. Львів*

РАДІАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ІОННИХ ЛАНЦЮГАХ, ЛЕГОВАНИХ ЧУЖОРІДНИМИ ІОНАМИ ТА ІОННІ ЛАНЦЮГИ З ТОЧКОВИМИ ДЕФЕКТАМИ ДИПОЛЬНОГО ТИПУ

В одномірній моделі виконано розрахунки ймовірності утворення центрів забарвлення у кристалах $\text{CaF}_2\text{-Me}^+$. Досліджено вплив домішкових іонів на ефективність забарвлення кристалів.

*Prof. Z.P. Chorniy; assist. I.B. Pirko; assoc. prof. V.M. Salapak;
assist. M.V. Dyachuk – NUFWT of Ukraine, L'viv*

Radiation processes in ionic chains, alloyed by alkalines ions. and ionic chains with point defects of dipol type

The calculations of possibility of colouring centers creations in crystals $\text{CaF}_2\text{-Me}^+$ were conducted in one-dimension model. The influence of doping ions on the effectiveness of crystal colouring was researched.

Вступ. Радіаційна фізика вивчає взаємодію іонізуючої радіації з матрицею кристала. Загальновідомо, що поглинута кристалом енергія збуджуючої радіації реалізується в кристалі трьома способами:

- поглинена енергія витрачається на нагрів кристалічної ґратки;
- на збудження іонів матриці, що обумовлює виникнення радіюлюмінесценції;
- на створення в кристалі радіаційних дефектів (центрів забарвлення).

Енергетичний вихід радіюлюмінесценції та концентрація центрів забарвлення в кристалі залежать від структури кристалу, електронної конфігурації іонів основи, структури власних точкових дефектів, наявності в кристалі чужорідних іонів, їхнього зарядового стану та концентрації.

У зв'язку із стохастичним поглинанням квантів збуджуючої радіації в кристалі і статистичним розподілом точкових дефектів у ґратці кристала здійснити теоретичні розрахунки енергетичного виходу радіюлюмінесценції та концентрації центрів забарвлення в загальному вигляді неможливо. За таких умов (відсутності теорії) доцільно моделювати радіаційні процеси в кристалі. Як показано у наших попередніх роботах [1-6], перспективним є одномірна модель іонного кристала, в якій реальний кристал представлений у вигляді замкнутого іонного кільця, який містить точкові дефекти. У цій моделі відкривається можливість класифікувати радіаційні властивості кристалів залежно від зарядового стану точкових дефектів, їхньої концентрації та мобільності.

У нашій роботі наведено результати теоретичних розрахунків концентрації центрів забарвлення та енергетичного виходу радіолюмінесценції в іонних ланцюгах, що містять дефекти дипольного типу.

1. Іонні кристали з домішково-вакансійними диполями. Цей клас кристалів містить:

- кристали $\text{MeF}_2\text{-Me}^+$, де $\text{Me}=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$; $\text{Me}^+=\text{Li}^+, \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Rb}^+, \text{Cs}^+$;
- кристали $\text{MeF}_2\text{-O}^{2-}$;
- кристали $\text{SrCl}_2\text{-Me}^+$;
- $\text{BaX}_2\text{-Me}^+$, де $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$.

Відомо [7-10], що після низькотемпературного опромінювання іонізуючою радіацією ($T=78\text{ K}$) в даних кристалах утворюються $(V_K\text{-}F_A)$ і $(V_{KD}\text{-}F_A)$ -комплементарні пари центрів забарвлення, де V_K – автолокалізована дірка, V_{KD} – дірка, локалізована в околі диполя, F_A – домішково-вакансійний диполь (ДВД, який захопив зонний електрон).

Моделі ДВД і центрів забарвлення (ЦЗ) зображено на рис. 1.

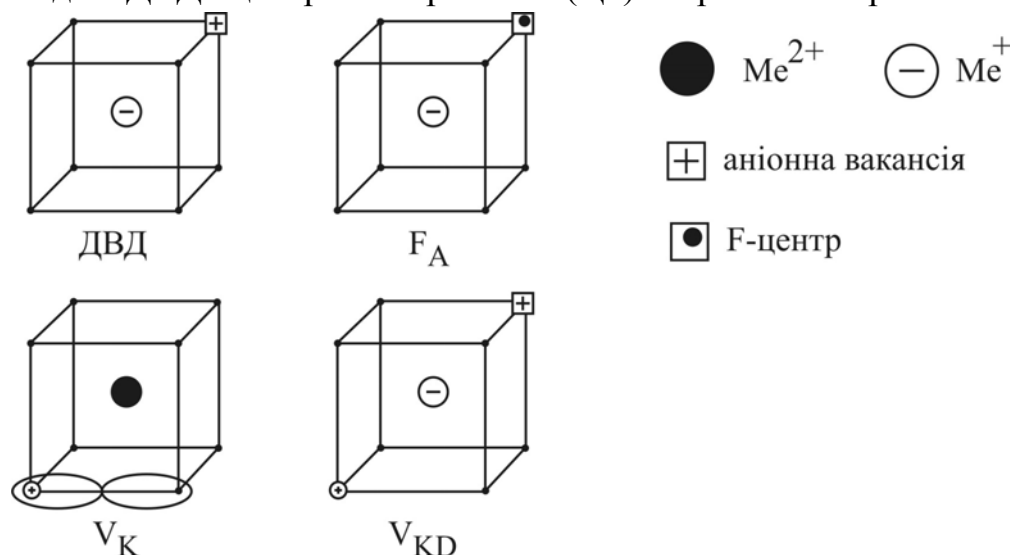
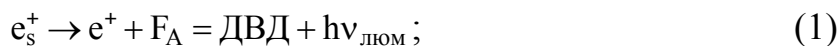


Рис. 1. Моделі центрів забарвлення та домішково-вакансійного диполя:
 Me^{2+} – іон основи; Me^+ – іон лужного металу

Під час нагрівання забарвленого кристала до температури T_m , за якої автолокалізовані дірки набувають рухливості, мобільні дірки рекомбінують на F_A – центрах або пере захоплюються ДВД:



Рівняння (1) описує рекомбінаційну анігіляцію $(F_A\text{-}V_K)$ пари, яка супроводжується частковим знебарвленням кристалу і виникненням α -люмінесценції, рівняння (2) – процес локалізації дірки на диполі. Таким чином, внаслідок прогріву кристала до температури T_m опромінений кристал містить лише $(F_A\text{-}V_{KD})$ -пари ЦЗ.

Дослідження спектрів наведеного поглинання показують, що $(F_A\text{-}V_{KD})$ -пари ЦЗ генеруються в кристалі також під час його опромінення за температур $T > T_m$. Утворення V_{KD} – центрів протікає згідно з реакцією (2), а утворення F_A – центрів – по схемі, яка описується рівнянням (3):



2. Генерування (F_A - V_{KD})-комплементарних пар центрів забарвлення. На рис. 2 схематично зображено одновірну модель іонного кристала. Крпками позначені іони основи, а ДВД – у вигляді $\boxed{+} \ominus$ комплексу, в якому символом $\ominus$ позначено іон лужного металу, а символом $\boxed{+}$ – аніонна вакансія. У такому комплексі аніонна вакансія може мати зафіксоване положення відносно домішкового іона (ДВД заморожений) або здійснювати ротаційний рух в околі домішкового іона (реорієнтація ДВД). У розрахунках, наведених в цій роботі, вибрано вузький інтервал температур: $T_m < T < T_r$, де T_m – температура міграції дірки, T_r – температура реорієнтації ДВД. У цьому інтервалі температур існує лише чотири способи розташування диполів один відносно одного (рис. 2), причому кожний із зазначених способів реалізується в іонно-ланцюгу з однаковою ймовірністю.

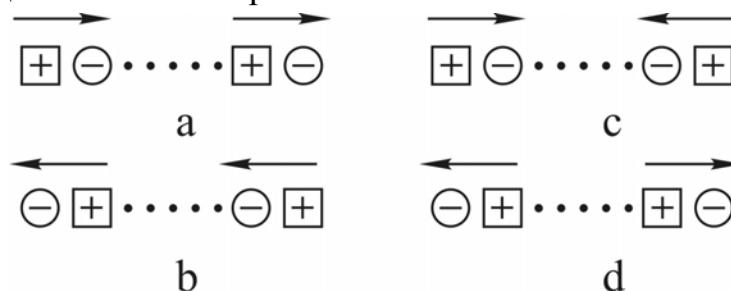


Рис. 2. Фрагменти ділянок іонного ланцюга, довжину якого обмежують домішково-вакансійні диполі (ДВД): $\rightarrow$, $\leftarrow$ – напрями дипольних моментів; $\ominus$ – лужний іон; $\boxed{+}$ – аніонна вакансія

Конфігурація диполів, які наведено на рис. 2 а і 2 б, дипольні моменти співнапрямлені, у випадку 2 с і 2 д – дипольні моменти антипаралельні. Як показано в наших попередніх роботах, ЦЗ генеруються лише в тих іонних ланцюгах, які обмежені ДВД з паралельними дипольними моментами. В іонних ланцюгах, в яких ДВД мають антипаралельні напрями, анігіляція електронно-діркових пар відбувається внаслідок рекомбінації без утворення ЦЗ.

3. Радіаційне утворення центрів забарвлення та висвітлювальна дія іонізуючої радіації. Відомо [7-11], що радіаційне виникнення центрів забарвлення в кристалах ГДМ легованих лужними металами, є результатом захоплення носіїв заряду диполями (реакція 2 і 3). Схематично процес забарвлення зображений на рис. 3 а.

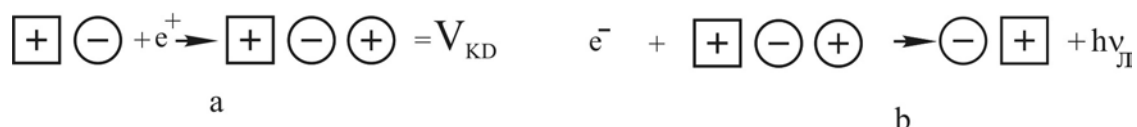
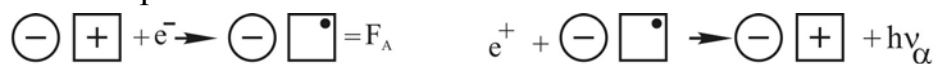


Рис. 3. Схематичне зображення генерації (F_A - V_{KD}) – пар центрів забарвлення (3 а) та їх радіаційне знебарвлення (3 б)

У процесі опромінення концентрація центрів забарвлення (F_A - V_{KD})-пар зростає, а відповідно, вступають у дію процеси, які обумовлюють висвітлювальну дію радіації (рис. 3 б) реакції (4), (5).



Внаслідок сумісного перебігу (реакції 2 і 3) (генерування ЦЗ) та реакції (4, 5) (висвітлювальна дія радіації) у кристалі встановлюється динамічна рівновага між ДВД і ЦЗ.

У цій роботі ми поставили завдання, яка частка енергії радіації, поглинутої кристалом, затрачається на створення ЦЗ (рівняння 2 і 3), на радіолюмінесценцію (реакції 4, 5) та на теплові втрати (реакція (6)):



Рівняння (6) описує безвипромінювальну рекомбінацію зонних електронів з мобільними V_K -центрами.

4. Генерування (F_A - V_{KD})-пар центрів забарвлення. Ця задача зводиться до розрахунку поведінки електронно-діркової пари, яку утворила радіація в іонному ланцюгу, довжина якого обмежена ДВД з паралельними дипольними моментами (рис. 2 а і 2 б).

Вихідними положеннями цієї теорії є таке твердження:

- кванти радіації з однаковою ймовірністю поглинаються в кожному із вузлів іонного ланцюга;
- ефективна маса дірки на декілька порядків за величиною є більшою за ефективну масу електрона, тому вважається, що початкове положення дірки збігається в іонному ланцюгу з місцерозташуванням поглинутого кванта радіації;
- термалізований електрон з однаковою ймовірністю може знаходитися в будь-якому із положень іона основи.

Задача розв'язується в два етапи. На першому етапі досліджують міграцію термалізованого електрона в електростатичному полі, створеним діркою і ДВД. У випадку, коли сила взаємодії електрона з діркою є більшою за його взаємодію з диполем, то електрон безвипромінювально рекомбінує з діркою (рівняння 6), що зумовлює локальний нагрів кристала. В іншому випадку електрон захоплюється диполем з утворенням F_A -центра (рівняння 3).

На другому етапі розглядають міграцію дірки вздовж іонного ланцюга в електростатичному полі, яке створене ДВД і F_A -центром. Мобільні дірки можуть захоплюватися як ДВД, так і F_A -центром. У першому випадку утворюється V_{KD} -центр (рівняння 2), а в другому – α -люмінесценція (рівняння 5).

Результати розрахунків наведено в табл. 1.

Табл. 1. Результати розрахунків ефективності каналів анігіляції електронно-діркових пар в іонних ланцюгах типу ДВД...ДВД

C , мол.%	l	w_I	w_2	w_α	w_L	C_D / C_{D0}	E , eB
0,5	6 а	0,08	0,58	0,22	0,12	84,5	187
0,1	10 а	0,0675	0,71	0,14	0,08	85	260
0,01	21 а	0,03	0,82	0,11	0,04	92	500

Імовірність того, що створена радіацією електронно-діркова пара анігілює: з утворенням центру забарвлення (F_A - V_{KD})-комплементарної пари – w_1 ; з виділенням теплоти – w_Q ; шляхом збудження люмінесценції локалізованих

екситонів – w_L ; α -люмінесценція – w_α ($w_1 + w_Q + w_L + w_\alpha = 1$); C – молярна концентрація ДВД; $l = na$ – відстань між ДВД в іонному ланцюгу; a – параметр ґратки; C_D / C_{D0} – відношення концентрації диполів на стадії насичення забарвлення кристала (C_D) до концентрації диполів перед опроміненням (C_{D0}); E – енергія, яка витрачається на створення пари центрів забарвлення.

5. Висвітлювальна дія іонізуючої радіації. Радіація не тільки створює ЦЗ в кристалі, але й їх руйнує. Висвітлювальна дія іонізуючої радіації реалізується внаслідок рекомбінації носіїв заряду на центрах забарвлення (рівняння 4, 5). Розрахунки ефективності висвітлювальної дії радіації виконують за тією самою схемою, яку розглянуто в попередньому параграфі.

Відмінність полягає в тому, що в цьому випадку довжина ланцюга обмежується не ДВД, а центрами забарвлення (порівняти рис. 3 а і 3 б). Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Табл. 2. Результати розрахунків ефективності каналів анігіляції електронно-діркових пар в іонних ланцюгах типу $F_A \dots V_{KD}$.

C , мол. %	l	w_2	w_Q	w_α	w_L	$C_{ЦЗ} / C_{D0}$	n_∞	E , еВ
0,5	6 а	0,435	0,565	0,435	0,435	0,165	$3,75 \cdot 10^{18}$	34,5
0,1	10 а	0,39	0,61	0,39	0,39	0,15	$0,675 \cdot 10^{18}$	38
0,01	21 а	0,36	0,64	0,36	0,36	0,08	$4,0 \cdot 10^{16}$	42

Імовірність того, що створена радіацією електронно-діркова пара анігілює: з відновленням іонного ланцюга типу ДВД...ДВД – w_2 ; з виділенням теплоти – w_Q ; шляхом збудження люмінесценції локалізованих екситонів – w_L ; α -люмінесценція – w_α ; ($w_2 + w_Q + w_L + w_\alpha = 1$); C – молярна концентрація ДВД; $l = na$ – відстань між ДВД в іонному ланцюгу; a – параметр ґратки; $C_{ЦЗ} / C_{D0}$ – відношення концентрації центрів забарвлення диполів на стадії насичення забарвлення кристала ($C_{ЦЗ}$) до концентрації диполів перед опроміненням (C_{D0}); E – енергія, яка затрачається на знебарвлення пари центрів забарвлення; n_∞ – концентрація центрів забарвлення в 1 см^3 кристалу на стадії насичення забарвлення.

6. Гранична концентрація центрів забарвлення. Центри забарвлення виникають внаслідок локалізації носіїв заряду на ДВД. Отже, у процесі опромінення концентрація диполів C_D зменшується. З іншого боку, зруйновані радіацією диполі виступають центрами забарвлення. На стадії насичення забарвлення кристала настає динамічна рівновага між кількістю знищених радіацією диполів і кількістю висвітлених радіацією ЦЗ. Наведені в табл. 1 і 2 дані відображають концентрацію центрів забарвлення $C_{ЦЗ}$, так і концентрацію диполів на стадії насичення забарвлення кристала C_D :

$$\frac{C_{ЦЗ}}{C_{D0}} = \frac{w_1}{w_1 + w_2}; \quad \frac{C_D}{C_{D0}} = \frac{w_2}{w_1 + w_2}, \quad (7)$$

де C_{D0} – концентрація диполів в іонному ланцюгу до його опромінення.

7. Люмінесценція на стадії насичення забарвлення кристала. У табл. 1 наведено відносний квантовий вихід радіолюмінесценції (виникнення

кванта світла при розпаді електронно-діркової пари для локалізованих екситонів та α -люмінесценції). Розрахунки наведено для випадку, коли фрагмент іонного ланцюга обмежений по довжині ДВД, що відповідає початковій стадії опромінення кристалу. Результати аналогічних розрахунків для фрагменту ланцюга, довжина яких обмежена ЦЗ, наведено в табл. 2.

На стадії насичення забарвлення кристала в безконечно довгому іонному ланцюгу трапляються як фрагменти ланцюга типу ДВД...ДВД (рис. 3 а), так і ділянки типу ЦЗ...ЦЗ (рис. 3 б) у співвідношенні w_2/w_1 . Зі врахуванням цього співвідношення в табл. 3 наведено результати розрахунків виходу радіолюмінесценції на стадії насичення забарвлення кристалу.

Табл. 3. Результати розрахунків ймовірності безвипромінювальної анігіляції електронно-діркової пари (w_D) в іонному ланцюгу на стадії насичення забарвлення та її випромінювальної анігіляції з утворенням люмінесценції локалізованих екситонів (w_L) або α -свічення (w_α)

C , мол. %	l	w_D	w_α	w_L
0,5	6 а	0,58	0,26	0,17
0,1	10 а	0,74	0,15	0,10
0,01	21 а	0,80	0,13	0,13

Обговорення результатів досліджень

Утворення центрів забарвлення (F_A - V_{KD})-пар ЦЗ в кристалах ГДМ, легированих іонами лужних металів, є наслідком локалізації носіїв заряду на ДВД (реакції 2 і 3). Внаслідок перебігу реакцій 2 і 3 концентрація ДВД зменшується, а відповідно синхронно концентрація ЦЗ зростає. Паралельно із забарвленням в кристалі протікають зворотні реакції (висвітлювальна дія іонізуючої радіації, реакції 4 і 5): створені радіацією електрони та дірки рекомбінують на ЦЗ. Внаслідок висвітлювальної дії ЦЗ зникають, а відповідно ДВД відновлюються. При цьому виникнення кожної пари ЦЗ супроводжується руйнуванням пари ДВД. І навпаки, кожне висвітлення пари ЦЗ відновлює пару ДВД. Таким чином, число центрів забарвлення в кристалі збігається з числом зруйнованих радіацією диполів:

$$C_{ЦЗ} = C_{D0} - C_D, \quad (8)$$

де: $C_{ЦЗ}$ – концентрація центрів забарвлення в кристалі; C_{D0} – концентрація ДВД до опромінювання кристалу (початкова концентрація ДВД); C_D – концентрація ДВД в кристалі після його опромінювання.

1. На початковій стадії опромінювання кристалу процес генерації центрів забарвлення є домінуючим і концентрація $C_{ЦЗ}$ швидко збільшується. У міру зростання концентрації $C_{ЦЗ}$ швидкість наростання ЦЗ зменшується, а відповідно, ефект висвічувальної дії радіації зростає. На стадії насичення забарвлення кристала настає динамічна рівновага між процесами генерації ЦЗ та висвічувальною дією променів. Граничні концентрації ЦЗ наведено в табл. 2 і складають в високолегованих кристалах величину порядку 10^{18} 1/см^3 .

2. Енергія, яка затрачується на створення комплементарної пари ЦЗ. У табл. 1 наведено енергії, які затрачаються на створення ЦЗ у випадку,

коли електронно-діркова пара розпадається в іонному ланцюгу типу ДВД...ДВД із співнапрямленими дипольними моментами. Оскільки в нескінченно довгому ланцюгу фрагменти ланцюгів із співнапрямленими і протилежно напрямленими дипольними моментами проявляються з рівною ймовірністю, то наведені значення енергії в табл. 1 потрібно вдвічі збільшувати. Зі врахуванням даного факту енергія, затрачена на створення ЦЗ, рівна 0,37; 0,52; 1,0 кеВ для концентрації диполів 0,5; 0,1 і 0,01 мол. %.

3. Розрахунки енергетичного виходу люмінесценції локалізованих екситонів. Кінетика наростання і затухання радіолюмінесценції. У попередніх наших публікаціях [1-6] основну увагу приділено дослідженню механізму генерації центрів забарвлення в крсталах ГДМ, легованих лужними металами. У цій роботі вперше в літературі виконано розрахунки тієї частки енергії іонізуючої радіації, яка витрачається на нагрів кристала (w_Q) та збудження радіолюмінесценції (w_L і w_α). Розрахунки здійснено як для фрагментів іонного ланцюга типу ДВД...ДВД (табл. 1), так і для ланцюга типу $F_A...V_{KD}$ (табл. 2). З даних, наведених у табл. 1 і 2, випливає, що енергетичний вихід люмінесценції в ланцюгах типу $F_A...V_{KD}$ значно вищі порівняно з ланцюгами ДВД...ДВД. Тому під час опромінення кристала іонізуючою радіацією наростання люмінесценції відбувається інерційно (табл. 4). Характер і зростання величини I_0 (початкова інтенсивність люмінесценції) до I_∞ (інтенсивність люмінесценції на стадії насичення забарвлення кристала наведено на рис. 4).

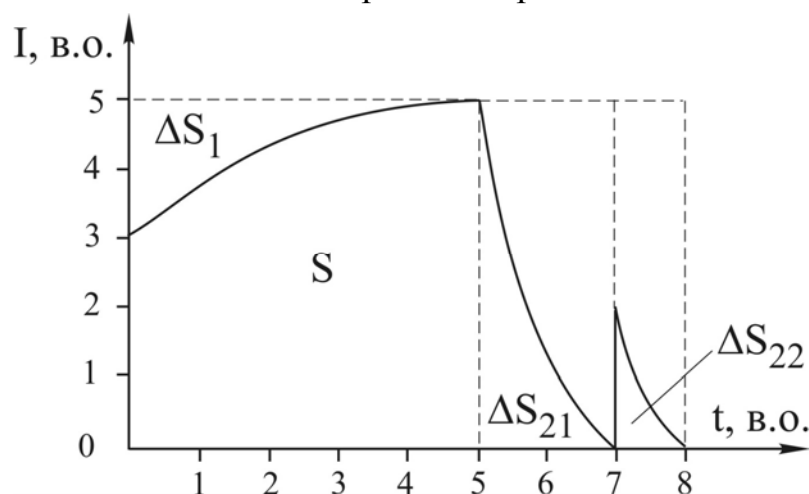


Рис. 4. Кінетика наростання і затухання α -люмінесценції в іонному ланцюгу типу ДВД...ДВД

Табл. 4. Співвідношення між енергетичним виходом радіолюмінесценції на початковій стадії опромінювання (I) до її енергетичного виходу на стадії насичення забарвлення (I_∞), $(I/I_\infty)_L$ – для свічення локалізованих екситонів; $(I/I_\infty)_\alpha$ – для α -люмінесценції

С, мол. %	1	$(I/I_\infty)_L$	$(I/I_\infty)_\alpha$
0,5	6 а	0,70	0,85
0,1	10 а	0,65	0,80
0,01	21 а	0,60	0,73

Площа: S відображає енергію, яка виділяється під час опромінення кристалу у вигляді α -свічення; ΔS_1 – відображає енергію, яка затрачається на створення центрів забарвлення; ΔS_{21} і ΔS_{22} – енергії, яка виділяється у вигляді фосфоресценції та фотостимульованої люмінесценції. ($\Delta S_1 = \Delta S_{21} + \Delta S_{22}$).

Висновки. Отже, у цій роботі наведено результати теоретичних розрахунків радіаційних процесів, які відбуваються у фрагменті іонного ланцюга, довжина якого обмежена ДВД зі співнапрямленими диполями. Отримані теоретичні розрахунки (концентрація центрів забарвлення, квантовий вихід радіолюмінесценції, теплові втрати, енергія створення пари центрів забарвлення) задовільно корелюють з експериментальними результатами. Така узгодженість між теоретичними розрахунками та експериментальними даними стимулює подальший розвиток одномірної моделі іонного кристала та перехід теоретичних розрахунків із фрагментів іонного ланцюга до теоретичних розрахунків нескінченно довгих ланцюгів.

Література

- 1. Чорний З.П.** Механізм генерації центрів забарвлення в легованих кристалах флюоритів. Одновимірна модель / Чорний З.П., Пірко І.Б., Салапак В.М., Дячук М.В. // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ УкрДЛТУ. – 2005. – Вип. 15.1. – С. 298-307.
- 2. Чорний З.П.** Генерування центрів забарвлення в легованих кристалах флюоритів. Одновимірна модель / Чорний З.П., Пірко І.Б., Салапак В.М., Дячук М.В. // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ УкрДЛТУ. – 2005. – Вип. 15.1. – С. 170-174.
- 3. Чорний З.П.** Релаксація електрично-заряджених центрів забарвлення в кристалах флюоритів. Одновимірна модель / Чорний З.П., Качан С.І., Пірко І.Б., Салапак В.М. // Вісник НУ "Львівська політехніка". Сер. "Електроніка". – 2005. – № 532. – С. 90-98.
- 4. Чорний З.П.** Рекомбінаційні процеси та термоіндуковані перетворення центрів забарвлення в кристалах флюоритів. Одновимірна модель / Чорний З.П., Кульчицький А.Д., Пірко І.Б., Белянінова Н.П. // Наукові записки : наук.-техн. зб. – Львів : Українська АД. – 2005. – Вип. 8 – С. 58-63.
- 5. Чорний З.П.** Вплив аніонів на ефективність генерації центрів забарвлення в кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Me}^+$. Одновимірна модель / Чорний З.П., Пірко І.Б., Салапак В.М. // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2006. – Вип. 16.2. – С. 112-118.
- 6. Чорний З.П.** Моделювання радіаційних властивостей іонних кристалів / Чорний З.П., Пірко І.Б., Салапак В.М., Дячук М.В. // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2008. – Вип. 18.1. – С. 220-226.
- 7. Чорний З.П.** Реорієнтація та термодисоціація домішково-вакансійних комплексів у кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Me}^+$ // Журнал фізичних досліджень. – 1999. – Т.3, № 4. – С. 513-518.
- 8. Чорний З.П.** Влияние фотохимической окраски на термостимулированные токи деполяризации в кристаллах $\text{SrCl}_2\text{-K}$ / Чорний З.П., Панасюк М.Р., Крочук А.С., Максимович Х.К., Щур Г.А. // Український фізичний журнал. – 1982. – Т.27, №8. – С. 1219-1223.
- 9. Чорний З.П.** Ионные термотоки в радиационно окрашенных кристаллах CaF_2 / Чорний З.П., Щур Г.А., Качан С.И., Дубельт С.П. // Известия вузов. Сер. физ. – 1988. – № 6. – С. 116-117.
- 10. Чорний З.П.** Исследование реориентации примесно-вакансионных диполей в кристаллах $\text{SrCl}_2\text{-Me}^+$ / Чорний З.П., Панасюк М.Р., Крочук А.С., Щур Г.А., Максимович Х.К. // Известия вузов. Сер. физ. – 1984. – № 9. – С. 106-108.