

ТЕРМОІНДУКОВАНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЦЕНТРІВ ЗАБАРВЛЕННЯ В КРИСТАЛАХ $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+\text{-Na}^+$

А. С. Крочук¹, З. П. Чорній², Г. О. Щур²,
В. М. Салапак², М. В. Говор¹

¹Львівський державний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50, Львів, 290005, Україна

²Український державний лісотехнічний університет,
кафедра фізики, вул. Генерала Чупринки, 103, Львів, 290057, Україна

(Отримано 28 вересня 1998)

У ґратку кристала SrCl_2 домішки талію і натрію входять у вигляді $\text{Tl}^+V_a^+$ і $\text{Na}^+V_a^+$ ізолюваних домішково-вакансійних диполів. Низькотемпературне опромінення кристалів $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+\text{-Na}^+$ генерує електронні $\text{Tl}^{\circ}V_a^+$ і $\text{Na}^+V_a^{\circ}$ та діркові $\text{Tl}^{2+}V_a^+$ і $\text{Na}^+V_a^+e_s^+$ центри забарвлення. Термоіндуковані перетворення “талієвих” і “натрієвих” центрів забарвлення протікають паралельно й незалежно. В основі перетворення “талієвих” центрів забарвлення лежить йонний механізм ($\{\text{Tl}^{\circ}V_a^+ - \text{Tl}^{2+}V_a^+\} \rightarrow \{\text{Tl}^{\circ} \cdot 2V_a^+ - \text{Tl}^{2+}\}$), а в “натрієвих” — як йонний, так і електронно-дірковий ($\{F_A - V_{\text{KD}}\} \rightarrow \{M_{A+} - V_{\text{KA}}\}$). Лише при $T > 250\text{ K}$, коли F -центри стають рухливими, відбувається взаємодія останніх з $\text{Tl}^{\circ} \cdot 2V_a^+$ -центрами. Однак ефективність цієї реакції незначна і суттєво не змінює концентрації “талієвих” центрів забарвлення.

Ключові слова: домішково-вакансійні диполі, центри забарвлення.

PACS numbers: 78.40.-q, 61.80.Az

I. ВСТУП

Одновалентні метали, як правило, входять у ґратку кристалів галогенідів дво валентних металів (ГДМ) у вигляді йонів заміщення. Надлишковий від’ємний заряд домішки компенсує аніонна вакансія. При низьких температурах компенсація заряду має локальний характер, і в кристалі утворюються домішково-вакансійні диполі (ДВД) [1–4].

При опроміненні кристалів ГДМ йонізуючою радіацією ДВД захоплюють носії заряду, внаслідок чого кристал забарвлюється. Структура центрів забарвлення залежить від типу домішкового йона. У кристалах, легованих лужними металами, електрони захоплюються аніонними вакансіями і утворюються F_A -центри [3–5], а дірки локалізуються в околі домішки, приймаючи структуру V_{KD} або V_{KA} -центрів [6,7]. У кристалах, легованих ртутеподібними йонами, як електрони, так і дірки локалізуються на домішці, утворюючи активаторні центри забарвлення [8–10].

Унаслідок локалізації носіїв заряду на ДВД компенсація електричного заряду в забарвлених кристалах набуває об’ємного характеру, і енергія кристалічної ґратки забарвленого кристала зростає. Перехід до локального способу компенсації надлишкового заряду в кристалах, легованих ртутеподібними йонами, відбувається за рахунок йонних процесів [10,11]. У кристалах ГДМ, легованих лужними металами, в утворенні електронейтральних за своєю структурою центрів забарвлення беруть участь як йонні, так і електронно-діркові процеси [3]. Виникає необхідність дослідити термоіндуковані перетворення центрів за-

барвлення в кристалах ГДМ, легованих подвійними активаторами, один із яких ртутеподібний йон, а інший — йон лужного металу.

II. ВИБІР ОБ’ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Серед сукупності кристалів галогенідів дво валентних металів як модельні об’єкти в радіаційній фізиці використовують кристали зі структурою флюориту (проста будова кристалічної ґратки). У свою чергу, серед кристалів зі структурою флюориту об’єктами дослідження ми вибрали кристали SrCl_2 :

- у кристалах SrCl_2 найменша серед флюоритів енергія міграції аніонної вакансії (0,34–0,36 eV) [2,12], що суттєво звуужує температурний діапазон досліджень;
- кристали SrCl_2 мають найнижчу серед флюоритів температуру плавлення, сумірну з температурою плавлення галогенідів одно валентних металів, що дозволяє відносно легко одержати високолеговані кристали.

Вибір талію в ролі активатора зумовлений тим, що як механізм входження домішки в ґратку, так і структура талієвих центрів забарвлення в кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+$ широко досліджені з використанням магнетних, електричних і оптичних методів дослідження [8–11]. Вибір йонів Na^+ як співактиватора зумовлений тим, що в кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Na}^+$ центри забарвлення мають найвищу термічну стабільність порівняно з іншими кристалами $\text{SrCl}_2\text{-Me}^+$ ($\text{Me}^+ =$

K^+ , Rb^+ , Cs^+) [3,13]. Крім того, лише в кристалах $SrCl_2-Na^+$ спостерігають термоіндуковані $M_A^+ \rightarrow F$ перетворення в області 220–240 К [14,15].

Кристали вирощували методом Стокбаргера. Концентрація легуючої домішки в шихті розплаву змінювалась у межах 0,05–0,5 мол%. У роботі наведені результати вимірювань на кристалах, що містять 0,2 мол% $NaCl$ або $TlCl$.

Струми ТСД вимірювали електрометром ВК2-16. Конструкція вимірної комірки та методика приготування кристалічних зразків описана в роботі [1]. Оптичні дослідження проводили за допомогою двограткового дифракційного монохроматора МДР-6. Джерелом йонізуючого опромінення служила установка УРС-55А (вольфрамова трубка; $U = 55$ кВ, $i = 12$ мА). Зразки опромінювали впродовж 60 хв., що відповідає часу насичення забарвлення кристала. Математичну обробку результатів проводили за стандартною методикою.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

А. Струми ТСД

Термограма струмів ТСД кристалів $SrCl_2-Na^+$ типова для всього класу кристалів флюоритів, легованих лужними металами (рис. 1, крива 1). На термограмі провідності наявні два максимуми струмів ТСД: низькотемпературний ($T_m = 122$ К, $\varepsilon = 0,28$ еВ),

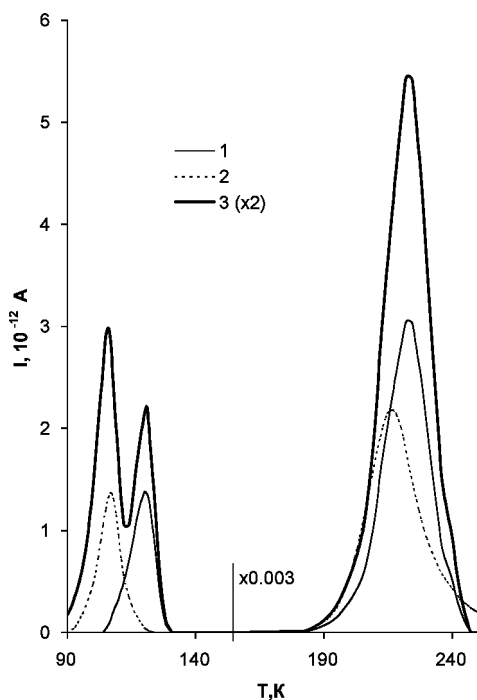


Рис. 1. Термограми струмів ТСД кристалів $SrCl_2-Na^+$ (1), $SrCl_2-Tl^+$ (2), $SrCl_2-Tl^+-Na^+$ (3).

зумовлений реорієнтацією $Na^+V_a^+$ диполів, і високотемпературний ($T_m = 230$ К, $\varepsilon = 0,52$ еВ), пов'язаний з їх термодисоціацією [1,2]. Подібну термограму струмів ТСД спостерігаємо в кристалах $SrCl_2-Tl^+$ (рис. 1, крива 2): низькотемпературний максимум ($T_m = 107$ К, $\varepsilon = 0,24$ еВ), зумовлений локальною міграцією аніонної вакансії в околі домішкового Tl^+ -йона, високотемпературний ($T_m = 215$ К, $\varepsilon = 0,46$ еВ), зумовлений просторовою міграцією вакансії [10,11]. Термограма струмів ТСД кристалів, легованих двома домішками, становить суперпозицію термограм кристалів $SrCl_2-Na^+$ і $SrCl_2-Tl^+$ (крива 3). Додаткові максимуми термострумів, які б свідчили про взаємодію домішок або утворення їх комплексів, не спостерігаються.

В. Температурна залежність ефективності радіаційного руйнування диполів

При опроміненні легованих кристалів хлористого стронцію йонізуючою радіацією ДВД захоплюють носії заряду. Внаслідок цього концентрація ДВД зменшується, що зумовлює зменшення струмів дипольної релаксації [2,3]. При низькотемпературному опроміненні ($T \approx 80-100$ К), коли “заморожені” як йонні, так і діркові процеси, на стадії насичення забарвлення кристала ефективність руйнування диполів радіацією досягає 15 % і практично не залежить від сорту домішкового йона. Це означає, що як генерація центрів забарвлення, так і рекомбінаційні процеси (висвітлювальна дія радіації) при низькотемпературному опроміненні кристалів практично не залежать від способу локалізації носіїв заряду на диполях. Однак з підвищенням температури опромінення кристала спосіб локалізації заряду на домішці набуває вирішального значення.

У кристалах $SrCl_2-Tl^+$, де носії заряду локалізуються на активаторі, утворюються термостійкі центри забарвлення, ефективність руйнування диполів зростає аж до кімнатної температури (рис. 2, крива 1). У кристалах $SrCl_2-Na^+$, де носії заряду локалізуються в околі домішки, центри забарвлення генеруються в аніонній підгратці кристала і мають низьку термічну стабільність. Ефективність руйнування диполів досягає свого максимального значення в області 150–160 К (рис. 2, крива 2). Наявність співактиваатора (кристал $SrCl_2-Tl^+-Na^+$) не змінює температурної залежності ефективності руйнування як $Tl^+V_a^+$, так і $Na^+V_a^+$ -диполів. Із наведених на рис. 2 результатів випливає, що лише при низькотемпературному опроміненні ($T < 150$ К) в кристалах $SrCl_2-Tl^+-Na^+$ можна сподіватися на утворення як талієвих, так і натрієвих центрів забарвлення в сумірних концентраціях. Із підвищенням температури опромінення вклад талієвих центрів забарвлення в сумарне індуковане поглинання зростає, і при кімнатній температурі спектр наведеного поглинання кристала містить лише смуги поглинання, зумовлені талієвими центрами забарвлення.

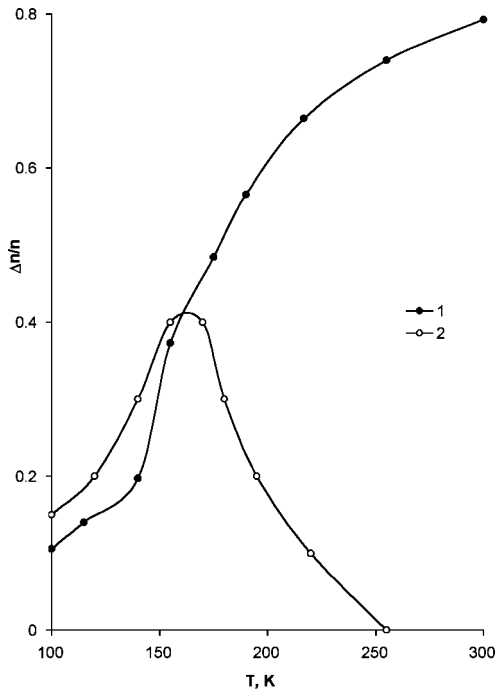
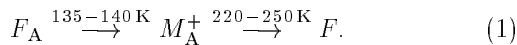


Рис. 2. Температурні залежності ефективності руйнування диполів у кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+$ (1), $\text{SrCl}_2\text{-Na}^+$ (2).

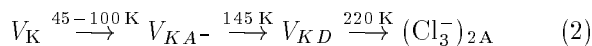
С. Спектри наведеного поглинання кристалів

Оптичну спектроскопію центрів забарвлення в кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Me}^+$ і $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+$ досліджували в роботах [10,11].

У забарвлених кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Na}^+$ мають місце термоіндуковані перетворення центрів забарвлення, які протікають за схемою [13-15]:

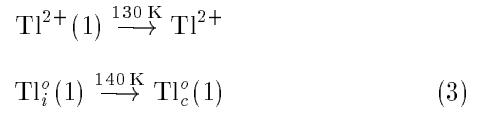


Смуги поглинання відповідних центрів розташовані при 580 і 640 нм (F_{A1} - і F_{A2} -смуги), 535 і 770 нм (M_{A2} - і M_{A1} -смуги) і 570 нм (F -смуга) [3,13-15]. Паралельно зі зміною структури електронних центрів забарвлення при нагріві кристалів $\text{SrCl}_2\text{-Na}^+$ відбуваються зміни структури діркових центрів [6,7]:



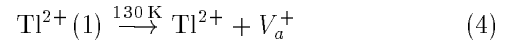
У результаті термоіндукованих перетворень V_K -центрів (реакція 2) смуга поглинання 397 нм зсувається в область 360-365 нм [6,7]. Утворення $(\text{Cl}_3^-)_{2A}$ -центрів зумовлює виникнення смуги поглинання в області 260 нм [7].

У кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+$ термоіндуковані перетворення центрів забарвлення протікають за схемою

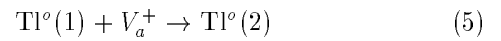


згідно з даними, наведеними в роботах [8,9].

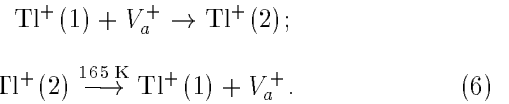
У роботі [11] ми розглядали відмінний механізм термоіндукованих перетворень талієвих центрів забарвлення



з наступним захопленням аніонної вакансії безпосередньо $\text{Tl}^{\circ}(1)$ -центрами



або з проміжною локалізацією аніонної вакансії на диполі



Перетворення активаторних центрів забарвлення супроводжується змінами в спектрі індукованого поглинання. При низькотемпературному опроміненні кристалів $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+$ в спектрі індукованого поглинання домінують $\text{Tl}^{\circ}(1)$ -смуги, максимума яких розташовані при 254, 320, 400, 535, 685 і 890 нм. Якщо кристал опромінювати при $T > 150\text{ K}$, то спектр наведеного поглинання містить $\text{Tl}^{\circ}(2)$ -смуги: 240, 350, 430, 720, 890 нм [10].

На рис. 3 наведені спектри поглинання кристала $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+\text{-Na}^+$, ізодозно опроміненого при різних температурах (виміри проведені при 90 K). Якщо кристал опромінювати при $T < 130\text{ K}$, то в спектрі наведеного поглинання (крива 1) спостерігаються як смуги $\text{Tl}^{\circ}(1)$ -центрів (смуга 400 нм), так і F_A -центрів (дублетна смуга поглинання в області 570-610 нм). Обидва типи центрів забарвлення виникають у результаті локалізації електронів на ДВД. Якщо кристал опромінювати в області 160-220 K (криві 2 і 3), то в спектрі поглинання проявляються смуги поглинання $\text{Tl}^{\circ}(2)$ -центрів (смуга 430 нм) і M_A^+ -центрів (смуги 535 і 770 нм). При опроміненні кристала в області кімнатної температури центри, пов'язані з натрієм, відсутні, спостерігається поглинання, зумовлене $\text{Tl}^{\circ}(2)$ -центрами, а також центри забарвлення, які зумовлюють абсорбційну смугу в області 480 нм (крива 4).

Слід зазначити, що за наявності йонів натрію в кристалі ефективність нагромадження центрів забарвлення зростає з підвищенням температури, не досягаючи насичення навіть при кімнатній температурі (криві 3, 4). Тому можна припустити, що при $T > 220 \div 250\text{ K}$, коли центри забарвлення, пов'язані з натрієм, термічно нестабільні, у формуванні агрегатних

талієвих центрів забарвлення беруть участь вакансії, які генетично пов'язані як з Tl^{+} , так і з Na^{+} -йонами.

В області температур 130–150 К спостерігається складний спектр поглинання, у якому наявні смуги $Tl^{\circ}(1)$ -, $Tl^{\circ}(2)$ -, F_A - і M_A^{+} -центрів.

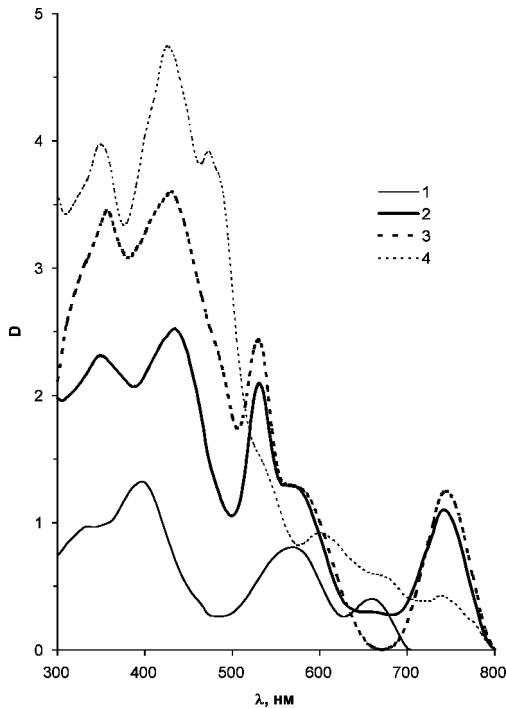
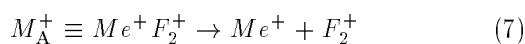


Рис. 3. Спектри поглинання кристала $SrCl_2-Tl^{+}-Na^{+}$, опроміненого при: 1 — 90 К; 2 — 160 К; 3 — 190 К; 4 — 270 К; $T_{вим.} = 90$ К.

Д. Термоіндуковані перетворення центрів забарвлення

На рис. 4 наведені зміни спектра поглинання при імпульсному прогріві кристала $SrCl_2-Tl^{+}-Na^{+}$, опроміненого при 150 К. Як випливає з рисунка, при нагріванні кристала спостерігається зменшення оптичної густини в усіх смугах поглинання, що зумовлено дірковими процесами. Як відомо, в області 200–220 К в кристалі $SrCl_2-Na^{+}$ має місце термоіндукований розпад V_{KA} -центрів [6,7]. При розпаді діркових центрів забарвлення виникають мобільні дірки, які рекомбінують з електронними центрами забарвлення, що зумовлює їх часткове термознебарвлення та появу максимуму термічного висвічування. Крім діркових процесів, вирішальну роль у термознебарвленні кристала відіграють йонні процеси. Саме йонні процеси визначають термоактиваційне руйнування M_A^{+} -центрів (смуги поглинання 535 і 760 нм, криві 1, 2, 3), яке протікає за схемою:



Термознебарвлення F -смуги (смуга 570 нм, криві 3, 4) зумовлене рекомбінацією рухливих F -центрів із дірковими центрами забарвлення або їх захопленням на інших структурних дефектах. У випадку кристалів $SrCl_2-Tl^{+}-Na^{+}$ структура центрів забарвлення не залежить від того, чи кристал був опромінений при певній температурі, чи прогрівався до цієї температури після низькотемпературного опромінення. Відмінність проявляється лише у співвідношенні між концентраціями центрів забарвлення (рис. 3 і 4). Крім того, термознебарвлення F -смуги поглинання супроводжується виникненням смуги поглинання 480 нм (криві 3 і 4, рис. 4). У випадку кристала $SrCl_2-Tl^{+}$ смуга 480 нм виникає лише при високотемпературному ($T > 180$ К) опроміненні зразків. При нагріванні кристала $SrCl_2-Tl^{+}$, забарвленого при низьких температурах, смуга 480 нм в спектрах поглинання не виникає [10].

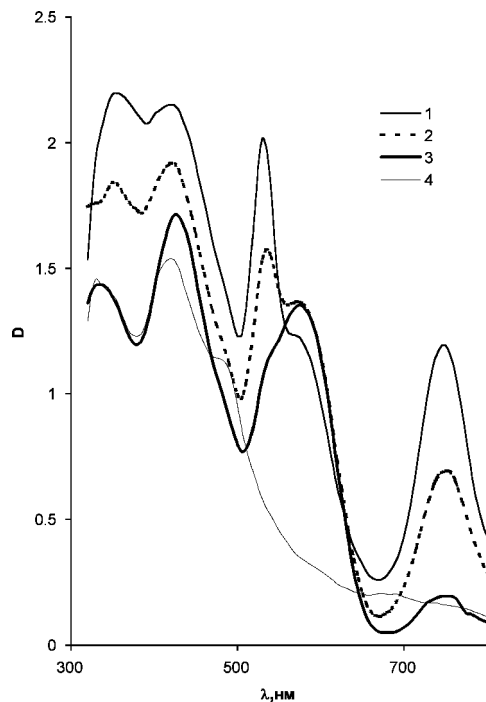


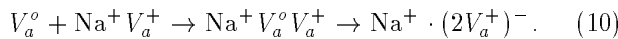
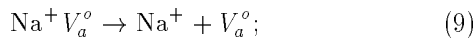
Рис. 4. Спектри поглинання кристала $SrCl_2-Tl^{+}-Na^{+}$, опроміненого при 150 К (крива 1) та імпульсно прогрітого до 230, 250 і 290 К (криві 2, 3 і 4 відповідно).

IV. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

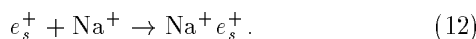
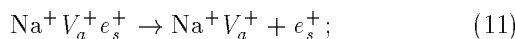
У кристалі $SrCl_2-Tl^{+}-Na^{+}$ можна відзначити як спільні, так і відмінні риси в механізмах генерації та термоіндукованих перетворень центрів забарвлення, що характерні для кристалів $SrCl_2-Tl^{+}$ і

$\text{SrCl}_2\text{-Na}^+$. В обидва кристали домішка входить у вигляді ДВД (Tl^0V_a^+ і Na^+V_a^+). При низькотемпературному опроміненні, унаслідок локалізації носіїв заряду, відбувається утворення комплементарних центрів забарвлення, які мають структуру $\{\text{Tl}^0\text{V}_a^+ - \text{Tl}^{2+}\text{V}_a^+\}$ у випадку $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+$ і $\{\text{Na}^+\text{V}_a^0 - \text{Na}^+\text{V}_a^+e_s^+\}$ — у випадку кристалів $\text{SrCl}_2\text{-Na}^+$ (e_s^+ — автолокалізована дірка). Усі центри забарвлення генеруються на основі ДВД. Відмінність полягає в тому, що як електрони, так і дірки локалізуються на йонах активатора у випадку кристалів, легованих талієм, тоді як у кристалі $\text{SrCl}_2\text{-Na}^+$ електрони локалізуються на аніонних вакансіях ($\text{V}_a^+ + e^- \rightarrow \text{V}_a^0$), а дірки автолокалізуються в околі домішкових аніонів, утворюючи V_{KD} -центри [6,7]. Як впливає з вимірювань струмів ТСД (рис. 2), в опроміненому при низьких температурах кристалі ефективність руйнування ДВД (ефективність захоплення носіїв заряду) на диполях Tl^+V_a^+ і Na^+V_a^+ приблизно однакова.

Утворені при низьких температурах центри забарвлення мають ефективний, відносно ґратки кристала, заряд. Тому при нагріванні кристала, коли йонні процеси “розморожуються”, відбувається процес електронейтралізації центрів і їхня структура змінюється. У кристалі $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+$ електронейтралізація центрів пов’язана з рухом аніонних вакансій. Аніонна вакансія відщеплюється від Tl^{2+} -йона і локалізується біля $\text{Tl}^0(1)$ -центра (реакції 4 і 5). У результаті утворюються Tl^{2+} - і $\text{Tl}^0 \cdot 2\text{V}_a^+$ -центри. У кристалі $\text{SrCl}_2\text{-Na}^+$ аніонні вакансії, пов’язані з йонами Na^+ і в області 140–160 К, де має місце термоіндуковане перетворення центрів забарвлення, здійснюють лише ротаційний рух. Тому перебудова електронних центрів забарвлення пов’язана з рухом F -центрів (V_a^0 -центрів):



У результаті перебігу цих реакцій у кристалі утворюються M_A^+ -центри [13–15]. Термоіндукованих перетворень зазнають також діркові центри забарвлення:

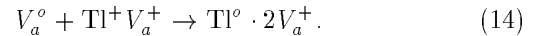
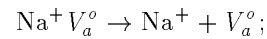
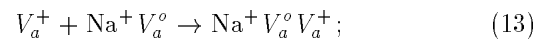
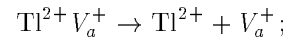


Результатом реакцій (11) і (12) є утворення в кристалі V_{KA} -центрів [6,7].

Як і у випадку низьких температур, новоутворені центри забарвлення в кристалі $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+\text{-Na}^+$ мають однакову структуру. Діркові центри (Tl^{2+} - і $\text{Na}^+e_s^+$ -центри) не містять аніонних вакансій, електронні центри забарвлення ($\text{Tl}^0 \cdot 2\text{V}_a^+$ - і $\text{Na}^+ \cdot 2\text{V}_a^+$ -центри) мають двовакансійну структуру. Унаслідок

локалізації електрона на йоні талію, енергія кулонівської взаємодії між атомарним талієм й аніонною вакансією значно більша порівняно з енергією взаємодії йона натрію з вакансійним центром. Тому атомарні талієві центри забарвлення мають вищу термічну стабільність порівняно з електронними центрами забарвлення, локалізованими в околі йона Na^+ , і при кімнатній температурі спектр наведеного поглинання містить лише талієві смуги (рис. 3, крива 4).

Різний механізм агрегації центрів забарвлення зумовлює той факт, що термічні перетворення центрів забарвлення в кристалі $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+\text{-Na}^+$ протікають паралельно і незалежно, не вносячи суттєвих змін порівняно з термоіндукованими перетвореннями, які протікають у забарвлених кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+$ і $\text{SrCl}_2\text{-Na}^+$. Термоактиваційні процеси, які приводять до обміну вакансіями між центрами забарвлення, що належать до різних активаторів, практично відсутні:



Реакції (13) малоефективні, оскільки термодисоціації $\text{Tl}^{2+}\text{V}_a^+$ і Na^+V_a^0 практично збігаються, тобто аніонні вакансії стають рухливими в тій області температур, де F_A -центри нестабільні.

Про малу ефективність реакцій (14) свідчить той факт, що при термознебарвленні як M_A^+ -центрів, так і F -центрів (рис. 4, крива 4) смуги поглинання талієвих центрів забарвлення не зростають, а, навпаки, їхня оптична густина зменшується. Це доводить те, що ефективність реакцій (14) значно менша порівняно з висвічувальною дією діркових процесів. Коли взаємодія F -центрів з $\text{Tl}^0(1)$ -центрами експериментально не зафіксована, захоплення F -центрів $\text{Tl}^0(2)$ -центрами спостерігається при $T > 250$ К. Результатом захоплення $\text{Tl}^0(2)$ -центрами рухливих F -центрів є зменшення оптичної густини в смугах поглинання $\text{Tl}^0(2)$ -центрів і виникнення смуги поглинання 480 нм (рис. 4, крива 4).

Із наведених результатів впливає, що наявність співактиваатора не змінює ні структури, ні механізму перетворення центрів забарвлення. У кристалах $\text{SrCl}_2\text{-Tl}^+\text{-Na}^+$ перетворення “талієвих” і “натрієвих” центрів забарвлення протікають паралельно й незалежно. Лише в області $T > 250$ К (коли F -центри стають рухливими) відбувається взаємодія F - і $\text{Tl}^0(2)$ -центрів забарвлення з утворенням нового агрегатного центра (смуга поглинання 480 нм). Однак ефективність цієї реакції низька і суттєво не впливає на незалежний механізм перетворення центрів забарвлення.

- [1] З. П. Чорний, М. Р. Панасюк, Г. А. Щур, А. С. Крочук, Х. К. Максимович, Изв. вузов, физика № 9, 106 (1984).
- [2] З. П. Чорний, М. Р. Панасюк, А. С. Крочук, О. П. Драган, Х. К. Максимович, Г. А. Щур, Изв. вузов, физика № 9, 80 (1982).
- [3] З. П. Чорний, М. Р. Панасюк, А. С. Крочук, Х. К. Максимович, Г. А. Щур, Укр. фіз. журн. **27**, 1219 (1982).
- [4] З. П. Чорний, Г. А. Щур, С. И. Качан, С. П. Дубельт, Изв. вузов, физика № 6, 116 (1988).
- [5] З. П. Чорний, С. И. Качан, С. П. Дубельт, Физ. электрон. **35**, 97 (1987).
- [6] М. В. Говор, А. С. Крочук, З. П. Чорний, Г. О. Щур, Укр. фіз. журн. **37**, 1252 (1992).
- [7] В. И. Вайданич, Н. В. Говор, А. С. Крочук, Х. К. Максимович, З. П. Чорний, Физ. электрон. **28**, 94 (1984).
- [8] S. V. Nistor, E. Goovaerts, and D. Schoemaker, Phys. Rev. B **42**, 7747 (1990).
- [9] S. V. Nistor, M. Velter-Stefanescu, C. D. Mateescu, Rev. Roum. Phys. **36**, 843 (1991).
- [10] В. М. Салапак, З. П. Чорний, Г. О. Щур, Деп. в ДНТБ України, N506-97 Ук., 38 с. (1997).
- [11] V. M. Salapak, Z. P. Chorniy, G. O. Shchur, in *3rd International Symposium Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation* (Ustron, Poland, 1997), p. 105.
- [12] G. M. Hood, P. P. Morrison, J. Appl. Phys. **38**, 4796 (1967); **51**, 3971 (1980).
- [13] I. Baltog, S. Lefrant, B. Houlier, M. Yuste, J.-P. Chapelle, L. Taurel, Phys. Status Solidi B **48**, 345 (1971).
- [14] E. Rzepka, I. Baltog, S. Lefrant, M. Yuste, L. Taurel, Phys. Status Solidi B **58**, 383 (1973).
- [15] М. В. Говор, А. С. Крочук, З. П. Чорний, Г. О. Щур, Укр. фіз. журн. **39**, 966 (1994).

THERMO-INDUCED TRANSFORMATIONS OF COLOUR CENTRES IN SrCl₂-Tl⁺-Na⁺ CRYSTALS

A. S. Krochuk¹, Z. P. Chorniy², G. O. Shchur², V. M. Salapak², N. V. Hovor¹

¹The Ivan Franko State University of Lviv

50, Drahomanov Str., Lviv, UA-290005, Ukraine,

¹Ukrainian State University of Forestry and Wood Technology

103, Gen. Tschuprynka Str., Lviv, UA-290057, Ukraine

The impurities of thallium and sodium are included into the SrCl₂ crystal lattice as Tl⁺V_a⁺ and Na⁺V_a⁺ impurity-vacant dipoles. Low-temperature irradiation of SrCl₂-Tl⁺-Na⁺ crystals generates electronic Tl⁰V_a⁺ and Na⁺V_a⁰ and hole Tl²⁺V_a⁺ and Na⁺V_a⁺e_s⁺ colour centres. Thermo-induced transformations of “thallium” and “sodium” colour centres take place independently and parallel to each other. The transformation of “thallium” colour centres is based on the ionic mechanism ($\{\text{Tl}^{\circ}\text{V}_a^+ - \text{Tl}^{2+}\text{V}_a^+\} \rightarrow \{\text{Tl}^{\circ} \cdot 2\text{V}_a^+ - \text{Tl}^{2+}\}$), and the “sodium” one — on both ionic and electronic-hole ($\{F_A - V_{KD}\} \rightarrow \{M_A^+ - V_{KA-}\}$). Only at $T > 250$ K, when F -centres become mobile, an interaction of the latter with Tl⁰ · 2V_a⁺-centres occurs. However, the efficiency of this reaction is insufficient and does not change the concentration of “thallium” colour centres to a considerable extent.