ТЕРМОІНДУКОВАНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЦЕНТРІВ ЗАБАРВЛЕННЯ В КРИСТАЛАХ $SrCl_2$–Tl^+–Na^+

А. С. Крочук[1], З. П. Чорній[2], Г. О. Щур[2],
В. М. Салапак[2], М. В. Говор[1]
[1] *Львівський державний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50, Львів, 290005, Україна*
[2] *Український 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 $Tl^+V_a^+$ і $Na^+V_a^+$ ізольованих домішково–вакансійних диполів. Низькотемпературне опромінення кристалів $SrCl_2$–Tl^+–Na^+ ґенерує електронні $Tl^oV_a^+$ і $Na^+V_a^o$ та діркові $Tl^{2+}V_a^+$ і $Na^+V_a^+e_s^+$ центри забарвлення. Термоіндуковані перетворення "талієвих" і "натрієвих" центрів забарвлення протікають паралельно й незалежно. В основі перетворення "талієвих" центрів забарвлення лежить йонний механізм ($\{Tl^oV_a^+–Tl^{2+}V_a^+\} \rightarrow \{Tl^o \cdot 2V_a^+–Tl^{2+}\}$), а в "натрієвих" — як йонний, так і електронно–дірковий ($\{F_{\mathrm{A}}–V_{\mathrm{KD}}\} \rightarrow \{M_{\mathrm{A}^+} - V_{\mathrm{KA}^-}\}$). Лише при $T > 250$ K, коли F–центри стають рухливими, відбувається взаємодія останніх з $Tl^o \cdot 2V_a^+$–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 двовалентних 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 радіяцією ДВД захоплюють носії заряду, внаслідок чого кристал забарвлюється. Структура центрів забарвлення залежить від типу домішкового йона. У кристалах, леґованих 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, леґованих 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 енерґія кристалічної ґратки забарвленого кристала зростає. Перехід до локального способу компенсації надлишкового заряду в кристалах, леґованих ртутеподібними йонами, відбувається за рахунок йонних процесів [10,11]. У кристалах ГДМ, леґованих 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 забарвлення в кристалах ГДМ, леґованих подвійними активаторами, один із яких ртутеподібний йон, а інший — йон лужного металу.

II. ВИБІР ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Серед сукупности кристалів галогенідів двовалентних металів як модельні об'єкти в радіяційній 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 енерґія міґрації аніонної вакансії (0,34–0,36 еВ) [2,12], що суттєво звужує температурний діяпазон досліджень;
- кристали $SrCl_2$ мають найнижчу серед флюоритів температуру плавлення, сумірну з температурою плавлення галогенідів одновалентних металів, що дозволяє відносно легко одержати високолеґовані кристали.

Вибір талію в ролі активатора зумовлений тим, що як механізм входження домішки в ґратку, так і структура талієвих центрів забарвлення в кристалах $SrCl_2$–Tl^+ широко досліджені з використанням магнетних, електричних і оптичних методів дослідження [8–11]. Вибір йонів Na^+ як співактиватора зумовлений тим, що в кристалах $SrCl_2$–Na^+ центри забарвлення мають найвищу термічну стабільність порівняно з іншими кристалами $SrCl_2$–Me^+ (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 K [14,15].

Кристали вирощували методом Стокбарґера. Концентрація леґуючої 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 двоґраткового 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

A. Струми ТСД

Термограма струмів ТСД кристалів $SrCl_2$–Na^+ типова для всього класу кристалів флюоритів, леґованих лужними металами (рис. 1, крива 1). На термограмі провідности наявні два максимуми струмів ТСД: низькотемпературний (T_m = 122 K, ε = 0,28 eB), зумовлений реорієнтацією $Na^+V_a^+$ диполів, і високотемпературний (T_m = 230 K, ε = 0,52 eB), пов'язаний з їх термодисоціяцією [1,2]. Подібну термограму струмів ТСД спостерігаємо в кристалах $SrCl_2$–Tl^+ (рис. 1, крива 2): низькотемпературний максимум (T_m = 107 K, ε = 0,24 eB), зумовлений локальною міґрацією аніонної вакансії в околі домішкового Tl^+–йона, високотемпературний (T_m = 215 K, ε = 0,46 eB), зумовлений просторовою міґрацією вакансії [10,11]. Термограма струмів ТСД кристалів, леґованих 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.

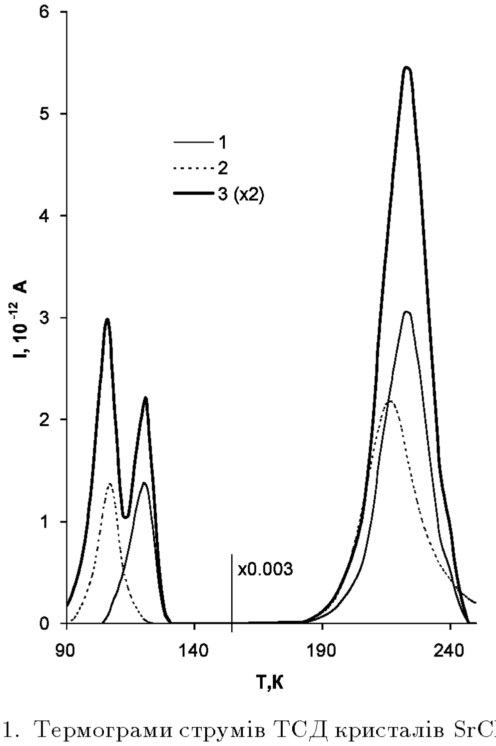

Рис. 1. Термограми струмів ТСД кристалів $SrCl_2$–Na^+ (1), $SrCl_2$–Tl^+ (2), $SrCl_2$–Tl^+–Na^+ (3).

B. Температурна залежність ефективности радіяційного руйнування диполів

При опроміненні леґованих кристалів хлористого стронцію йонізуючою радіяцією ДВД захоплюють носії заряду. Внаслідок цього концентрація ДВД зменшується, що зумовлює зменшення струмів дипольної релаксації [2,3]. При низькотемпературному опроміненні ($T \approx$ 80–100 K), коли "заморожені" як йонні, так і діркові процеси, на стадії насичення забарвлення кристала ефективність руйнування диполів радіяцією досягає 15 % і практично не залежить від сорту домішкового йона. Це означає, що як ґенерація центрів забарвлення, так і рекомбінаційні процеси (висвітлювальна дія радіяції) 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 ґенеруються в аніонній підґратці кристала і мають низьку термічну стабільність. Ефективність руйнування диполів досягає свого максимального значення в області 150–160 K (рис. 2, крива 2). Наявність співактиватора (кристал $SrCl_2$-Tl^+–Na^+) не змінює температурної залежности ефективности 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 K) 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.

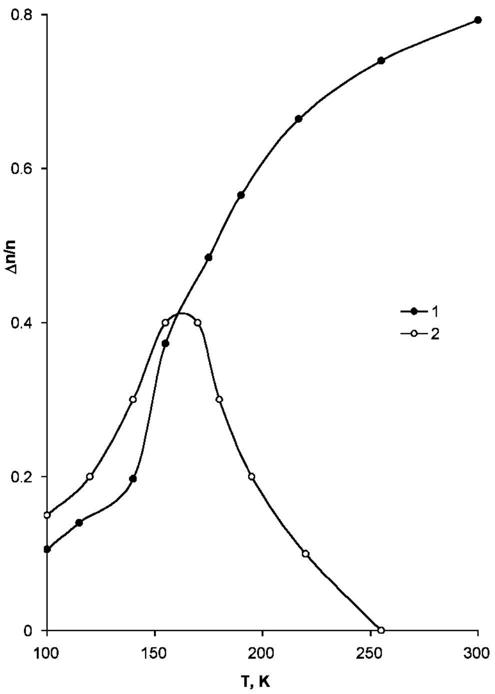

Рис. 2. Температурні залежності ефективности руйнування диполів у кристалах $SrCl_2$–Tl^+ (1), $SrCl_2$–Na^+ (2).

C. Спектри наведеного поглинання кристалів

Оптичну спектроскопію центрів забарвлення в кристалах $SrCl_2$–Me^+ і $SrCl_2$-Tl^+ досліджували в роботах [10,11].

У забарвлених кристалах $SrCl_2$–Na^+ мають місце термоіндуковані перетворення центрів забарвлення, які протікають за схемою [13–15]:

$$F_{\mathrm{A}} \xrightarrow{135-140\mathrm{K}} M_{\mathrm{A}}^{+} \xrightarrow{220-250\mathrm{K}} F. \qquad (1)$$

Смуги поглинання відповідних центрів розташовані при 580 і 640 нм ($F_{\mathrm{A}1}$– і $F_{\mathrm{A}2}$–смуги), 535 і 770 нм ($M_{\mathrm{A}2}$– і $M_{\mathrm{A}1}$–смуги) і 570 нм (F–смуга) [3,13-15]. Паралельно зі зміною структури електронних центрів забарвлення при нагріві кристалів $SrCl_2$–Na^+ відбуваються зміни структури діркових центрів [6,7]:

$$V_{\mathrm{K}} \xrightarrow{45-100\mathrm{K}} V_{KA}\text{-} \xrightarrow{145\mathrm{K}} V_{KD} \xrightarrow{220\mathrm{K}} (\mathrm{Cl}_3^-)_{2\mathrm{A}} \qquad (2)$$

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

У кристалах $SrCl_2$–Tl^+ термоіндуковані перетворення центрів забарвлення протікають за схемою

$$\mathrm{Tl}^{2+}(1) \xrightarrow{130\mathrm{K}} \mathrm{Tl}^{2+}$$

$$\mathrm{Tl}_i^o(1) \xrightarrow{140\mathrm{K}} \mathrm{Tl}_c^o(1) \qquad (3)$$

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

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

$$\mathrm{Tl}^{2+}(1) \xrightarrow{130\mathrm{K}} \mathrm{Tl}^{2+} + V_a^+ \qquad (4)$$

з наступним захопленням аніонної вакансії безпосередньо $\mathrm{Tl}^o(1)$–центрами

$$\mathrm{Tl}^o(1) + V_a^+ \rightarrow \mathrm{Tl}^o(2) \qquad (5)$$

або з проміжною локалізацією аніонної вакансії на диполі

$$\mathrm{Tl}^+(1) + V_a^+ \rightarrow \mathrm{Tl}^+(2);$$

$$\mathrm{Tl}^+(2) \xrightarrow{165\mathrm{K}} \mathrm{Tl}^+(1) + V_a^+. \qquad (6)$$

Перетворення активаторних центрів забарвлення супроводжується змінами в спектрі індукованого поглинання. При низькотемпературному опроміненні кристалів $SrCl_2$–Tl^+ в спектрі індукованого поглинання домінують $\mathrm{Tl}^o(1)$–смуги, максимуми яких розташовані при 254, 320, 400, 535, 685 і 890 нм. Якщо кристал опромінювати при $T > 150$ K, то спектр наведеного поглинання містить $\mathrm{Tl}^o(2)$–смуги: 240, 350, 430, 720, 890 нм [10].

На рис. 3 наведені спектри поглинання кристала $SrCl_2$–Tl^+–Na^+, ізодозно опроміненого при різних температурах (виміри проведені при 90 K). Якщо кристал опромінювати при $T < 130$ K, то в спектрі наведеного поглинання (крива 1) спостерігаються як смуги $\mathrm{Tl}^o(1)$–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 $\mathrm{Tl}^o(2)$–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 $\mathrm{Tl}^o(2)$–центрами, а також центри забарвлення, які зумовлюють абсорбційну смугу в області 480 нм (крива 4).

Слід зазначити, що за наявности 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 $T > 220 \div 250$ K, коли центри забарвлення, пов'язані з натрієм, термічно нестабільні, у формуванні аґреґатних 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 $Tl^o(1)$–, $Tl^o(2)$–, F_A– і M_A^+–центрів.

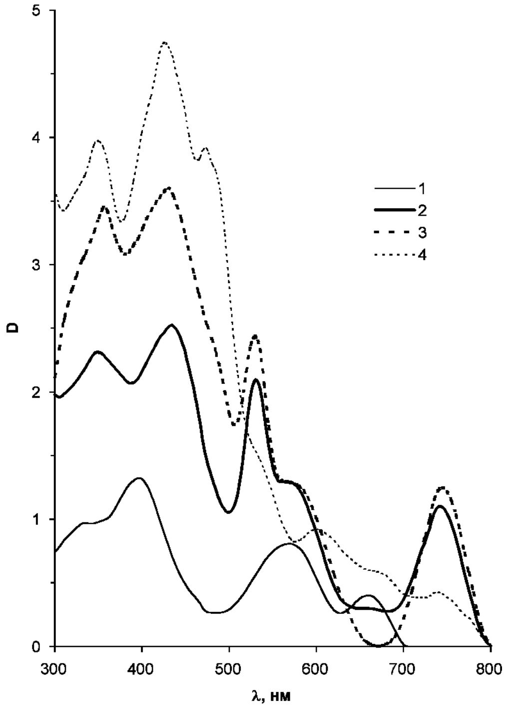

Рис. 3. Спектри поглинання кристала $SrCl_2$–Tl^+–Na^+, опроміненого при: 1 — 90 K; 2 — 160 K; 3 — 190 K; 4 — 270 K; $T_{вим.} = 90$ K.

D. Термоіндуковані перетворення центрів забарвлення

На рис. 4 наведені зміни спектра поглинання при імпульсному прогріві кристала $SrCl_2$–Tl^+–Na^+, опроміненого при 150 K. 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 K 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:

$$M_A^+ \equiv Me^+F_2^+ \to Me^+ + F_2^+ \tag{7}$$

$$F_2^+ \to F^+ + F. \tag{8}$$

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 ($T > 180$ K) опроміненні зразків. При нагріванні кристала $SrCl_2$–Tl^+, забарвленого при низьких температурах, смуга 480 нм в спектрах поглинання не виникає [10].

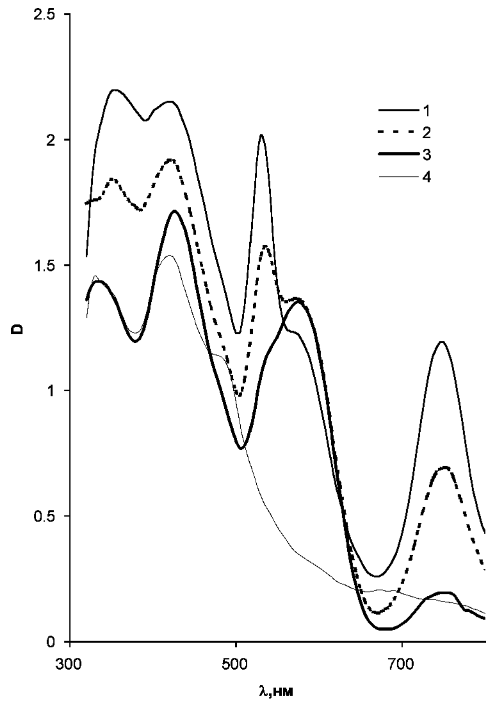

Рис. 4. Спектри поглинання кристала $SrCl_2$–Tl^+–Na^+, опроміненого при 150 K (крива 1) та імпульсно прогрітого до 230, 250 і 290 K (криві 2, 3 і 4 відповідно).

IV. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

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

$SrCl_2$–Na^+. В обидва кристали домішка входить у вигляді ДВД ($Tl^+V_a^+$ і $Na^+V_a^+$). При низькотемпературному опроміненні, унаслідок локалізації носіїв заряду, відбувається утворення комплементарних центрів забарвлення, які мають структуру $\{Tl^oV_a^+$–$Tl^{2+}V_a^+\}$ у випадку $SrCl_2$–Tl^+ і $\{Na^+V_a^o$–$Na^+V_a^+e_s^+\}$ — у випадку кристалів $SrCl_2$–Na^+ (e_s^+ — автолокалізована дірка). Усі центри забарвлення ґенеруються на основі ДВД. Відмінність полягає в тому, що як електрони, так і дірки локалізуються на йонах активатора у випадку кристалів, леґованих талієм, тоді як у кристалі $SrCl_2$–Na^+ електрони локалізуються на аніонних вакансіях ($V_a^+ + e^- \to V_a^o$), а дірки автолокалізуються в околі домішкових аніонів, утворюючи V_{KD}–центри [6,7]. Як випливає 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 $SrCl_2$–Tl^+ електронейтралізація центрів пов'язана з рухом аніонних вакансій. Аніонна вакансія відщеплюється від Tl^{2+}–йона і локалізується біля $Tl^o(1)$–центра (реакції 4 і 5). У результаті утворюються Tl^{2+}– і $Tl^o \cdot 2V_a^+$–центри. У кристалі $SrCl_2$–Na^+ аніонні вакансії, пов'язані з йонами Na^+ і в області 140–160 K, де має місце термоіндуковане перетворення центрів забарвлення, здійснюють лише ротаційний рух. Тому перебудова електронних центрів забарвлення пов'язана з рухом F–центрів (V_a^o–центрів):

$$Na^+V_a^o \to Na^+ + V_a^o; \tag{9}$$

$$V_a^o + Na^+V_a^+ \to Na^+V_a^oV_a^+ \to Na^+ \cdot (2V_a^+)^-. \tag{10}$$

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

$$Na^+V_a^+e_s^+ \to Na^+V_a^+ + e_s^+; \tag{11}$$

$$e_s^+ + Na^+ \to Na^+e_s^+. \tag{12}$$

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 $SrCl_2$–Tl^+–Na^+ мають однакову структуру. Діркові центри (Tl^{2+}– і $Na^+e_s^+$–центри) не містять аніонних вакансій, електронні центри забарвлення ($Tl^o \cdot 2V_a^+$– і $Na^+ \cdot 2V_a^+)^-$–центри) мають двовакансійну структуру. Унаслідок локалізації електрона на йоні талію, енерґія кулонівської взаємодії між атомарним талієм й аніонною вакансією значно більша порівняно з енерґією 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 аґреґації центрів забарвлення зумовлює той факт, що термічні перетворення центрів забарвлення в кристалі $SrCl_2$–Tl^+–Na^+ протікають паралельно і незалежно, не вносячи суттєвих змін порівняно з термоіндукованими перетвореннями, які протікають у забарвлених кристалах $SrCl_2$–Tl^+ і $SrCl_2$–Na^+. Термоактиваційні процеси, які приводять до обміну вакансіями між центрами забарвлення, що належать до різних активаторів, практично відсутні:

$$Tl^{2+}V_a^+ \to Tl^{2+} + V_a^+;$$
$$V_a^+ + Na^+V_a^o \to Na^+V_a^oV_a^+; \tag{13}$$

$$Na^+V_a^o \to Na^+ + V_a^o;$$
$$V_a^o + Tl^+V_a^+ \to Tl^o \cdot 2V_a^+. \tag{14}$$

Реакції (13) малоефективні, оскільки термодисоціяції $Tl^{2+}V_a^+$ і $Na^+V_a^o$ 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 реакції (14) значно менша порівняно з висвічувальною дією діркових процесів. Коли взаємодія F–центрів з $Tl^o(1)$–центрами експериментально не зафіксована, захоплення F–центрів $Tl^o(2)$–центрами спостерігається при $T > 250$ K. Результатом захоплення $Tl^o(2)$–центрами рухливих F–центрів є зменшення оптичної густини в смугах поглинання $Tl^o(2)$–центрів і виникнення смуги поглинання 480 нм (рис. 4, крива 4).

Із наведених результатів випливає, що наявність співактиватора не змінює ні структури, ні механізму перетворення центрів забарвлення. У кристалах $SrCl_2$–Tl^+–Na^+ перетворення "талієвих" і "натрієвих" центрів забарвлення протікають паралельно й незалежно. Лише в області $T > 250$ K (коли F–центри стають рухливими) відбувається взаємодія F– і $Tl^o(2)$–центрів забарвлення з утворенням нового аґреґатного 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. Чорній, 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. Чорній, Г. О. Щур, Деп. в ДНТБ України, N506–97 Ук., 38 с. (1997).
[11] V. M. Salapak, Z. P. Chornyi, G. O. Shchur, in *3–rd 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. Чорній, Г. О. Щур, Укр. фіз. журн. **39**, 966 (1994).

THERMO–INDUCED TRANSFORMATIONS OF COLOUR CENTRES IN $SrCl_2$–Tl^+-Na^+ CRYSTALS

A. S. Krochuk[1], Z. P. Chorniy[2], G. O. Shchur[2], V. M. Salapak[2], N. V. Hovor[1]

[1] *The Ivan Franko State University of Lviv*
50, Drahomanov Str., Lviv, UA–290005, Ukraine,
[1] *Ukrainian State University of Forestry and Wood Technology*
103, Gen. Tchuprynka Str., Lviv, UA–290057, Ukraine

The impurities of thallium and sodium are included into the $SrCl_2$ crystal lattice as $Tl^+V_a^+$ and $Na^+V_a^+$ impurity–vacant dipoles. Low–temperature irradiation of $SrCl_2$–Tl^+-Na^+ crystals generates electronic $Tl^oV_a^+$ and $Na^+V_a^o$ and hole $Tl^{2+}V_a^+$ 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 ($\{Tl^oV_a^+–Tl^{2+}V_a^+\} \to \{Tl^o \cdot 2V_a^+–Tl^{2+}\}$), and the "sodium" one — on both ionic and electronic–hole ($\{F_A - V_{KD}\} \to \{M_A^+ - V_{KA-}\}$). Only at $T > 250$ K, when F–centres become mobile, an interaction of the latter with $Tl^o \cdot 2V_a^+$–centres occurs. However, the efficiency of this reaction is insufficient and does not change the concentration of "thallium" colour centres to a considerable extent.