

О.Г. ТРУБАЄВА,<sup>1</sup> М.А. ЧАЙКА,<sup>2</sup> О.В. ЗЕЛЕНСЬКА<sup>1</sup><sup>1</sup> Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України  
(Просп. Науки, 60, Харків; e-mail: trubaeva.olya@gmail.com)<sup>2</sup> Інститут фізики ПАН  
(Ал. Льотніков, 32/46, Варшава, Польща)**ЗМІШАНІ КРИСТАЛИ  $ZnS_xSe_{1-x}$   
ЯК МОЖЛИВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДЕТЕКТОРІВ  
АЛЬФА ТА РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

УДК 538.958

Вивчено можливість використання матеріалу  $ZnS_xSe_{1-x}$  як детектора для рентгенівського та альфа випромінювання. Досліджено вплив вмісту сірки на властивості об'ємних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$ . Об'ємні кристали  $ZnS_xSe_{1-x}$  були вироцнені методом Бріджмена–Стокбаргера. Отримано шість сполук з різним вмістом компонентів:  $ZnS_{0,07}Se_{0,93}$ ,  $ZnS_{0,15}Se_{0,85}$ ,  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ ,  $ZnS_{0,28}Se_{0,72}$ ,  $ZnS_{0,32}Se_{0,68}$ ,  $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$ . Було виявлено, що інтенсивність спектрів рентгенолюмінесценції кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  зростає зі збільшенням вмісту сірки і досягає максимуму для складу  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ . Світловий вихід змішаних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  вище, ніж у комерційних кристалів  $ZnSe(Te)$  і  $ZnSe(Al)$ . Показані переваги змішаних кристалів на основі  $ZnS_xSe_{1-x}$  в порівнянні з кристалами  $ZnSe(Te)$  і  $ZnSe(Al)$ .

**Ключові слова:** сцинтилятор, змішані кристали,  $ZnS_xSe_{1-x}$ , альфа-детектор, рентгенолюмінесценція.

**1. Вступ**

Твердотільні сцинтиляційні детектори, що містять сцинтиляційні кристали та кремнієві  $p-i-n$  фотодіоди, широко використовуються в радіометрах, дозиметрах, спектрометрах, в технологічному обладнанні для митного контролю, контролю безпеки, медичної діагностики, моніторингу навколишнього середовища та інших [1]. В даний час для реєстрації різноманітних типів випромінювання використовуються різні сцинтиляційні детектори. Для реєстрації рентгенівського та  $\gamma$  випромінювання широко застосовуються кристали  $ZnSe$ ,  $ZnSe(Al)$ ,  $ZnSe(Te)$ , для виявлення альфа-випромінювання найпоширенішими сцинтиляторами є  $CsI(Tl)$ ,  $NaI(Tl)$ ,  $ZnS(Ag)$ . Однак ці кристали мають низку недоліків. Зокрема, кристали

$ZnSe$  мають низький світловий вихід,  $ZnSe(Al)$  – високий коефіцієнт термогасіння [2], в кристалах  $ZnSe(Te)$  – “повільна” до сотні мікросекунд, кінетика висвічування, сцинтилятори  $CsI(Tl)$ ,  $NaI(Tl)$  гігроскопічні, що вимагає додаткового захисту від вологи [3]. Недоліком кристалів на основі  $ZnS(Ag)$ , є те, що вони погано пропускають фотони видимого світла, і можуть використовуватися тільки у вигляді тонких шарів [4].

Перспективним сцинтилятором для детекторів альфа та рентгенівського випромінювання є  $ZnS_xSe_{1-x}$  [5–7]. Серед переваг цього матеріалу можна виділити негігроскопічність, прозорість до власної довжини хвилі, необмежену взаємну розчинність, внаслідок чого існує можливість створювати матеріал з будь-яким вмістом компонентів [8]. Також за рахунок збільшення ширини забороненої зони в  $ZnS_xSe_{1-x}$  можна значно підняти температуру гасіння [9], що відіграє важливу роль при створенні детекторів.

© О.Г. ТРУБАЄВА, М.А. ЧАЙКА,  
О.В. ЗЕЛЕНСЬКА, 2018

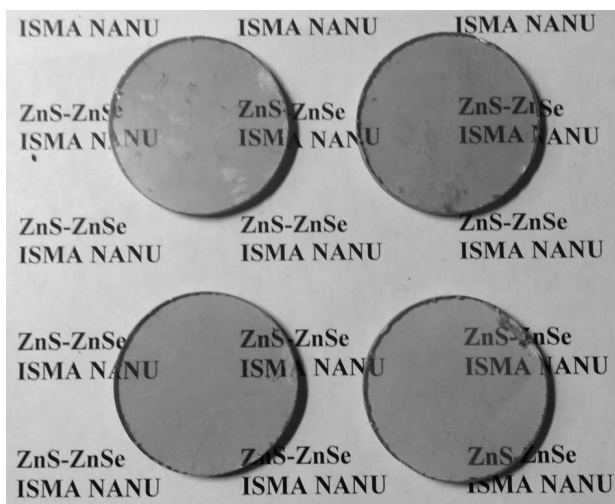


Рис. 1. Фотографія змішаних кристалів  $ZnS-xSe_{1-x}$  після полірування

Багато публікацій присвячено змішаним кристалам  $ZnS_xSe_{1-x}$  [9–12, 14–18], в більшості з них описані кристали, вирощені з парової фази, і лише кілька пов'язані з кристаллами, отриманими методом вирощування з розплаву [8–10]. Направлені методи затвердіння дозволяють створювати досить великі змішані кристали  $ZnS_xSe_{1-x}$ , що важливо для використання в ролі детекторів частинок високої енергії. На даний момент властивості  $ZnS_xSe_{1-x}$  кристалів як детекторів частинок високої енергії недостатньо вивчені, тим більше їх переваги порівняно з класичними сцинтиляторами  $ZnSe$ ,  $ZnSe(Al)$   $ZnSe(Te)$  ще не доведено.

У цій роботі досліджені сцинтиляційні і оптичні властивості об'ємних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  з урахуванням можливого застосування їх в ролі рентгенівських і альфа детекторів. Особливу увагу було приділено порівнянню властивостей  $ZnS_xSe_{1-x}$  і комерційних сцинтиляторів  $ZnSe$ ,  $ZnSe(Al)$ ,  $ZnSe(Te)$ .

## 2. Експериментальна частина

Було досліджено шість кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$ , різного складу, отриманих методом Бріджмена–Стокбаргера. Вирощування змішаних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  проводили з шихти з вихідними значеннями  $x = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$  і  $0,3$ . Перед вирощуванням шихту прожарювали для видалення кисневих домішок в атмосфері водню в кварцовому

тиглі при 1220 К протягом 5 годин. Ріст здійснювали за методом Бріджмена–Стокбаргера в графітових тиглях діаметром 25 мм під тиском інертного газу ( $Ar, P = 10^7-10^9$  Па), швидкість протягання тигля через зону кристалізації була 7 мм/год, температуру нагрівача встановлювали від 1870 до 2000 К, залежно від складу вихідної шихти.

Після вирощування змішані кристали з номінальним складом  $ZnS_{0,05}Se_{0,95}$ ,  $ZnS_{0,1}Se_{0,9}$ ,  $ZnS_{0,15}Se_{0,85}$ ,  $ZnS_{0,2}Se_{0,8}$ ,  $ZnS_{0,25}Se_{0,75}$  та  $ZnS_{0,3}Se_{0,7}$  були розрізані перпендикулярно напрямку росту і відполіровані, отримані таблетки діаметром і товщиною 25 і 4 мм відповідно (див. рис. 1). Повністю досліджена одна таблетка кожного з шести кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$ . Властивості об'ємних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  порівнювали з кристаллами  $ZnSe$ ,  $ZnSe(Al)$  і  $ZnSe(Te)$ , отриманих в аналогічних умовах і більш докладно описаних [15, 16]. Для визначення вмісту катіонних домішок, а також фактичного складу кристала був проведений хімічний аналіз, який показав шість складів для цих кристалів:  $ZnS_{0,07}Se_{0,93}$ ,  $ZnS_{0,15}Se_{0,85}$ ,  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ ,  $ZnS_{0,28}Se_{0,72}$ ,  $ZnS_{0,32}Se_{0,68}$ ,  $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$ . Зразки відпалювали в парах цинку ( $T = 1223$  К,  $P_{Zn} = 5 \cdot 10^7$  Па,  $t = 48$  год); який використовувався для остаточного утворення люмінесцентних центрів, а також для придушення безвипромінювальних релаксаційних каналів, збуджуваних носіями заряду [15, 16]. Після проведено шліфування та полірування зразків алмазним порошком. На рис. 1 зображена фотографія полірованих кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$ .

Спектри рентгенолюмінесценції реєстрували із застосуванням спектрофотометричного комплексу КСВУ-23. Як джерело рентгенівського випромінювання використовувався рентгенівський апарат РЕІС-І (Cu,  $U = 10-45$  кеВ). Вимірювання відносного світловиходу і післясвітіння виконувалися з використанням рентгенівської трубки з вольфрамовим анодом і кремнієвим фотодіодом PD-24 Smiths Heimann AMS-1 з наступною автоматичною математичною обробкою даних.

Вимірювання технічного світлового виходу, змішаних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  спектрометричним методом проводилися з використанням джерел  $\gamma$ -квантів, таких як  $^{137}Cs$  ( $E\gamma = 662$  кеВ),  $^{241}Am$  ( $E\gamma = 59,5$  кеВ) і джерелом альфа частинок  $^{239}Pu$  ( $E\alpha = 5156$  кеВ) при робочій температурі 294 К. Як фотоприймач ми використовували фотопомно-

жувач (PMT) типу R1307. ГОСТ 17038.2-79 використовувався в ролі стандартного [2].

### 3. Результати та їх обговорення

Змішані кристали  $ZnS_xSe_{1-x}$  були отримані методом Бріджмена–Стокбаргера, таких складів:  $ZnS_{0,07}Se_{0,93}$ ,  $ZnS_{0,15}Se_{0,85}$ ,  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ ,  $ZnS_{0,28}Se_{0,72}$ ,  $ZnS_{0,32}Se_{0,68}$ ,  $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$ . Для порівняння використовувалися кристали  $ZnSe(Te)$  і  $ZnSe(Al)$ , отримані в аналогічних умовах.

Оптичні дослідження проводилися при кімнатній температурі для зразків  $ZnS_xSe_{1-x}$  з різним вмістом компонентів. Спектри пропускання об'ємних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  показані на рис. 2. Пропускання змішаних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  знаходиться в діапазоні від 61% до 67% для  $ZnS_{0,07}Se_{0,93}$  і  $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$  відповідно при  $\lambda = 1100$  нм. Це вказує на високу оптичну якість кристалів.

Генерація світла в кристалах  $ZnS_xSe_{1-x}$  при перетворенні енергії рентгенівських або  $\gamma$ -квантів відбувається на структурі дефектів. Ці дефекти можна ідентифікувати за допомогою рентгенолюмінесценції. Нормалізовані спектри рентгенолюмінесценції кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  з різним співвідношенням компонентів показані на рис. 3. У змішаних кристалах  $ZnS_xSe_{1-x}$  спостерігається широка смуга з максимумом 584 до 591 нм (рис. 3). Збільшення концентрації сірки приводить до зсуву максимуму смуги люмінесценції в короткохвильову область, це пов'язано зі збільшенням ширини забороненої зони при збільшенні концентрації сірки [13].

Положення смуги рентгенолюмінесценції кристалів  $ZnSe(Al)$ , збігається з  $ZnS_xSe_{1-x}$  і відповідає світінню потрійного комплексу  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$ , отже, механізм радіаційних переходів цих кристалів ідентичний [18–20]. Нормалізована інтенсивність рентгенолюмінесценції зростає зі збільшенням концентрації сірки і досягає максимуму для складу  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$  за рахунок утворення в цих кристалах оптимальної кількості потрійних комплексів  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$  (вставка на рис. 3). Подальше збільшення вмісту сірки призводить до зниження інтенсивності рентгенолюмінесценції, через збільшення дефектності в об'ємних кристалах  $ZnS_xSe_{1-x}$ .

Світловихід є однією з важливих характеристик сцинтилятора, яка визначає його якість як детектора. Для отримання більш точних результа-

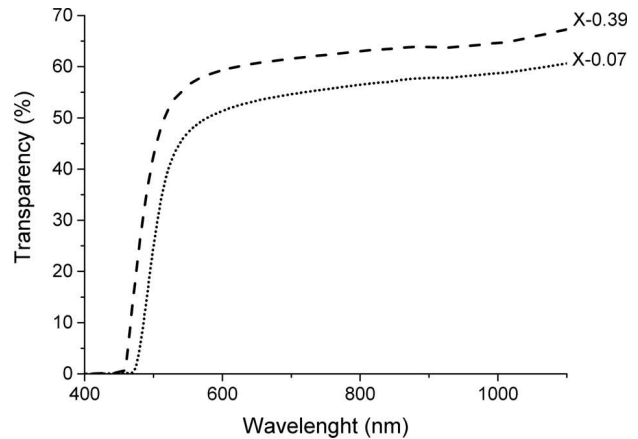


Рис. 2. Прозорість кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$

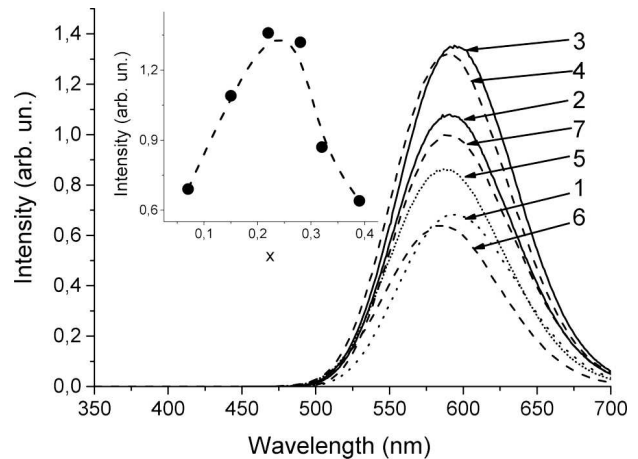


Рис. 3. Нормалізовані спектри рентгенолюмінесценції для об'ємних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  після відпаду в парах Zn зразків: 1 –  $ZnS_{0,07}Se_{0,93}$ , 2 –  $ZnS_{0,15}Se_{0,85}$ , 3 –  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ , 4 –  $ZnS_{0,28}Se_{0,72}$ , 5 –  $ZnS_{0,32}Se_{0,68}$ , 6 –  $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$  7 –  $ZnSe(Al)$ . На вставці показана залежність інтенсивності смуги люмінесценції від складу для об'ємних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$

тів світловихід змішаних кристалів був вимірний  $ZnS_xSe_{1-x}$  двома методами: при збудженні рентгенівським випромінюванням і спектрометричним методом. Світловий вихід об'ємних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$ , при збудженні рентгенівським випромінюванням, знаходився на рівні  $ZnSe(Te)$  і вище. Світловихід зразка  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$  був в 1,6 раза вище, ніж світловий вихід еталонного кристала  $ZnSe(Te)$  (див. табл. 1).

Післясвітіння визначає не тільки інерційність сцинтилятора, а і динамічний діапазон записа-

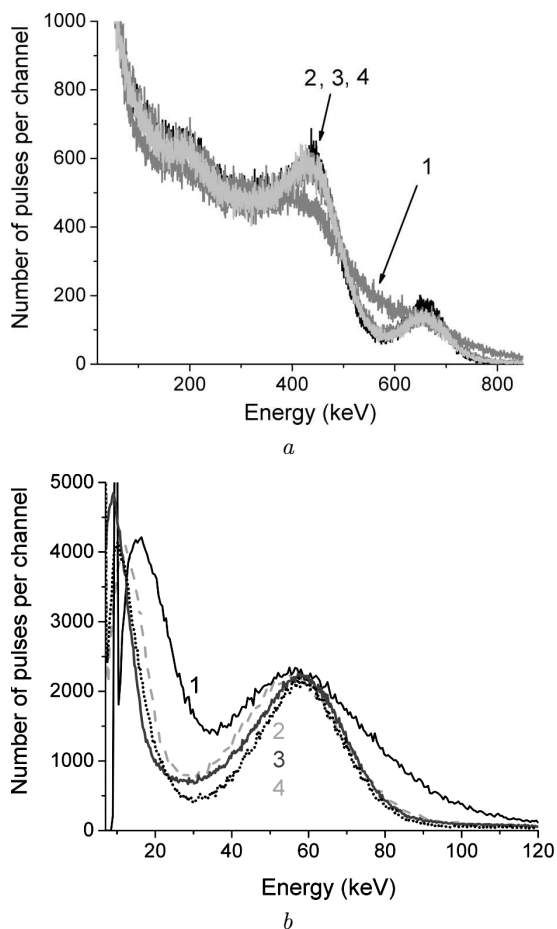


Рис. 4. Амплітудні спектри кристалів: 1 –  $ZnS_{0,15}Se_{0,85}$ , 2 –  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ , 3 –  $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$  і 4 –  $ZnSe(Al)$  для  $\gamma$ -променів, отриманих з використанням: а –  $^{137}Cs$  і б –  $^{241}Am$  джерел

Таблиця 1. Дані для вимірювання світлового виходу змішаних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  при збудженні рентгенівським випромінюванням

| № Зразка              | Відносний світловихід, % | Післясвітіння, % |       |       |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------|-------|
|                       |                          | 5 мс             | 15 мс | 25 мс |
| $ZnS_{0,07}Se_{0,93}$ | 98                       | 0,24             | <0,02 | <0,02 |
| $ZnS_{0,15}Se_{0,85}$ | 84                       | 0,15             | <0,02 | <0,02 |
| $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ | 159                      | 0,40             | <0,02 | <0,02 |
| $ZnS_{0,28}Se_{0,72}$ | 122                      | 0,54             | <0,02 | <0,02 |
| $ZnS_{0,32}Se_{0,68}$ | 103                      | 0,37             | <0,02 | <0,02 |
| $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$ | 136                      | 0,46             | 0,07  | <0,02 |
| $ZnSe(Te)$            | 100                      | 0,30             | 0,17  | <0,02 |
| $ZnSe(Al)$            | 95                       | 0,40             | <0,02 | <0,02 |
| $ZnS$                 | 75                       | 58,04            | 39,74 | 31,77 |

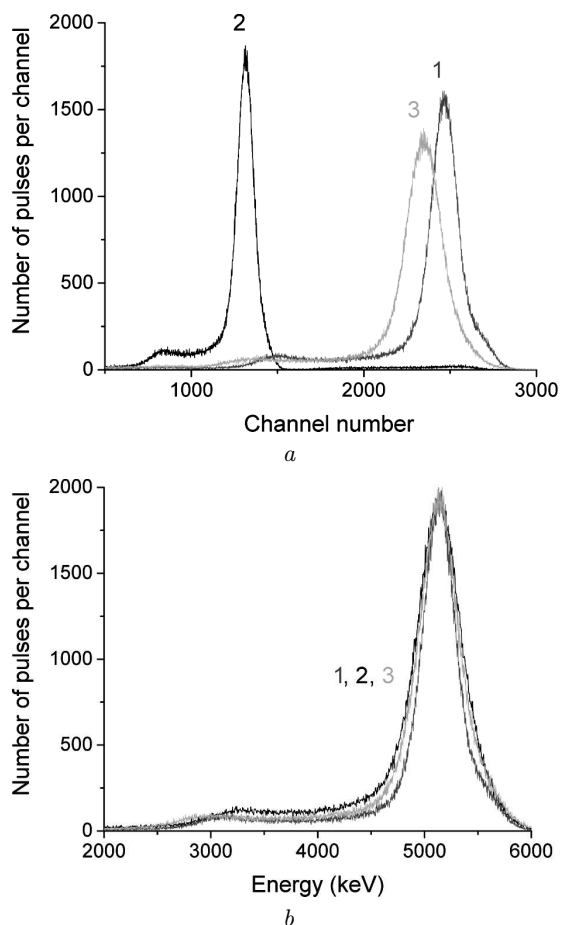


Рис. 5. Амплітудні спектри кристалів: 1 –  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ , 2 –  $ZnSe(Te)$  і 3 –  $ZnSe(Al)$  для  $\alpha$ -променів, отриманих з використанням  $^{239}Pu$  джерела (б – енергетичний спектр)

них сигналів. Післясвітіння змішаних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  становило близько 0.02% через 15 мс, за винятком зразка  $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$ , і було досить коротким у порівнянні з відомими люмінесцентними матеріалами, такими як  $ZnS$ ,  $CsI(Tl)$ ,  $Lu_2SiO_5 : Ce$  [21–23] (див. табл. 1).

Вимірювання світлового виходу для полірованих, відпалених у цинку кристалів  $ZnSe(Al)$  і  $ZnS_xSe_{1-x}$  проводилося спектрометричним методом, з джерелами  $^{241}Am$  і  $^{137}Cs$ . У кристалах  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$  після збудження  $^{137}Cs$  та  $^{241}Am$  спостерігається задовільне розділення (рис. 4, а, б), що підтверджує високу ефективність реєстрації даними сцинтиляторами низькоенергетичних квантів.

Таблиця 2. Дані по вимірюванню світловиходу змішаних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  в спектрометричному режимі

| Сцинтилятор                            | $^{137}Cs - E_g = 662 \text{ кеВ}$ |               | $^{241}Am - E_g = 59,5 \text{ кеВ}$ |               |
|--|------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|
|  | $V_{max}, \text{ кеВ}$             | $I_1/I_2, \%$ | $V_{max}, \text{ кеВ}$              | $I_1/I_2, \%$ |
| ZnSe(Al)                               | 649                                | 100,0         | 47                                  | 100,0         |
| ZnS <sub>0,15</sub> Se <sub>0,85</sub> | 443                                | 68,3          | 33                                  | 70,7          |
| ZnS <sub>0,22</sub> Se <sub>0,78</sub> | 756                                | 116,6         | 61                                  | 129,9         |
| ZnS <sub>0,39</sub> Se <sub>0,61</sub> | 606                                | 93,4          | 46                                  | 98,8          |

Світловихід зразків ZnS<sub>0,22</sub>Se<sub>0,78</sub> становив 116,6% при вимірах з  $^{137}Cs$  та 130% при вимірах з  $^{241}Am$  відносно ZnSe(Al) (табл. 2). Для змішаних кристалів ZnS<sub>0,15</sub>Se<sub>0,85</sub> і ZnS<sub>0,39</sub>Se<sub>0,61</sub> (табл. 2) спостерігається погіршення спектрометричних параметрів щодо зразка ZnS<sub>0,22</sub>Se<sub>0,78</sub>, аналогічно даним по вимірюванню світловиходу цих зразків при збудженні рентгеном (див. табл. 1).

Для проведення досліджень властивостей  $ZnS_xSe_{1-x}$  кристалів у ролі альфа детекторів, з кристала ZnS<sub>0,22</sub>Se<sub>0,78</sub> відпаленого в Zn було вирізано зразок  $10 \times 10 \times 2$  мм. Для порівняння використовувалися відпалені в Zn кристали ZnSe(Al) і ZnSe(Te) тих самих розмірів. Дослідження світловиходу тонких зразків кристалів ZnSe(Al), ZnSe(Te) і  $ZnS_xSe_{1-x}$  проводилося спектрометричним методом, з джерелом альфа частинок  $^{239}Pu$ .

Енергетичне положення піків (рис. 5, а) свідчить про більший світловихід змішаних кристалів ZnS<sub>0,22</sub>Se<sub>0,78</sub> щодо кристала ZnSe(Al) і ZnSe(Te). Для кристалів ZnS<sub>0,22</sub>Se<sub>0,78</sub> спостерігається також задовільне розділення (рис. 5, б) для енергії 5156 кеВ, що підтверджує високу ефективність реєстрації даними сцинтиляторами альфа частинок.

#### 4. Висновки

Об'ємні кристали  $ZnS_xSe_{1-x}$  були вирощені методом Бріджмена–Стокбаргера в діапазоні від  $x = 0,07 - 0,39$ . Вирощені кристали мали хорошу прозорість, коефіцієнт пропускання на довжині хвилі  $\lambda = 1100$  нм вище 61%. Показано, що сцинтиляційні властивості кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$  залежать від вмісту сірки, залежність інтенсивності рентгенолюмінесценції від концентрації сірки немонотонна і досягає максимуму для складу ZnS<sub>0,22</sub>Se<sub>0,78</sub>.

Ці дослідження показали, що об'ємні кристали  $ZnS_xSe_{1-x}$  можна використовувати в ролі високоефективних рентгенівських і гамма детекторів. Перші дослідження показали перспективність використання змішаних кристалів у ролі альфа-детекторів, кристали ZnS<sub>0,22</sub>Se<sub>0,78</sub> мали кращий світловихід і енергетичне розділення при вимірах з  $^{239}Pu$ .

*Колектив авторів висловлює подяку канд. техн. наук, ст. наук. співр. Галкіну Сергію Миколайовичу за допомогу в обговоренні результатів.*

1. L.V. Atroshenko, L.P. Galchinskii, S.N. Galkin *et al.* Distribution of tellurium in melt-grown ZnSe(Te) crystals. *J. Cryst. Growth* **197**, 471 (1999).
2. N.G. Starzhinskiy, B.V. Grinyov, L.P. Galchinskii *et al.* *The Scintillators Based Compounds AIBVI. Preparation, Properties and Features of the Application* (Institute for Single Crystal, 2007).
3. A. Wagner, W.P. Tan, K. Chalut *et al.* Energy resolution and energy–light response of CsI(Tl) scintillators for charged particle detection. *J. Cryst. Growth* **456** (3), 290 (2001).
4. S. Usuda. Development of ZnS (Ag)/NE102A and ZnS (Ag)/Stilbene phoswich detectors for simultaneous  $\alpha$  and  $\beta(\gamma)$  counting. *J. Nucl. Sci. Tech.* **29** (9), 927 (1992).
5. T. Homann, U. Hotje, M. Binnewies *et al.* Composition-dependent band gap in  $ZnS_xSe_{1-x}$ : A combined experimental and theoretical study. *Solid State Sci.* **81**, 44 (2006).
6. A.I. Focsha, P.A. Gashin, V.D. Ryzhikov *et al.* Preparation and properties of an integrated system “photosensitive heterostructure–semiconductor scintillator” on the basis of compounds AIBVI. *Intern. J. Inorg. Mat.* **38**, 1223 (2001).
7. M. Emam-Ismael, M. El-Hagary, E. Ramadan *et al.* Influence of  $\gamma$ -irradiation on optical parameters of electron beam evaporated  $ZnSe_{1-x}Te_x$  nanocrystalline thin films. *Radiat Eff. Defects Solids* **169** (1), 61 (2014).
8. R.H. Hussein, O. Pags, S. Doyen-Schuler *et al.* Percolation-type multi-phonon pattern of Zn(Se, S): Backward/forward Raman scattering and ab initio calculations. *J. Cryst. Growth* **644**, 704 (2015).
9. R. Hajj Hussein, O. Pags, F. Firszt *et al.* Near-forward Raman study of a phonon-polariton reinforcement regime in the Zn(Se, S) alloy. *J. Appl. Phys.* **116** (8), 083511 (2014).
10. R.H. Hussein, O. Pags, A. Polian *et al.* Pressure-induced phonon freezing in the ZnSeS II–VI mixed crystal: phonon–polaritons and ab initio calculations. *J. Phys.: Cond. Mat.* **28** (20), 205401 (2016).
11. K. Mochizuki, M. Takakusaki. Growth of in-doped  $ZnS_xSe_{1-x}$  single crystals and their photoluminescence. *Phys. Status Solidi A* **94** (1), 243 (1986).

12. M.E. Ozsan, J. Woods. Green electroluminescence in crystals of  $\text{ZnS}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ . *J. Appl. Phys. Let.* **25**, 489 (1974).
13. S. Larach, R.E. Shrader, C.F. Stocker. Anomalous variation of band gap with composition in zinc sulfo- and selenotellurides. *Phys. Rev.* **108** (3), 587 (1957).
14. S. Fujita. Growth of cubic  $\text{ZnS}$ ,  $\text{ZnSe}$  and  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  single crystals by iodine transport. *J. Cryst. Growth.* **33** (10), 324 (1976).
15. N.B. Su Ching-Hua, A. Bradley, C. Fow-Sen. Optical and morphological characteristics of zinc selenide-zinc sulfide solid solution crystals. *Opt. Mat.* **60**, 474 (2016).
16. E.L. Trukhanova, V.I. Levchenko, L.I. Postnova. Crystal growth of  $\text{ZnSe}_{1-x}\text{S}_x$  solid solutions at the lowest possible vapor pressure. *J. Appl. Phys.* **40** (1), 083511 (2014).
17. A. Catano, Z.K. Kun. Growth and characterization of  $\text{ZnSe}$  and homogeneous  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  crystals. *J. Cryst. Growth* **47** (9), 647 (1979).
18. Y. Shirakawa, H. Kukimoto. The electron trap associated with an anion vacancy in  $\text{ZnSe}$  and  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ . *Solid State Com.* **34**, 359 (1980).
19. G.D. Watkins. *Radiation Effects in Semiconductors* (Gordon and Breach, 1971).
20. V.D. Ryzhikov, N.G. Starzhinskiy, L.P. Gal'chinetskii *et al.* The role of oxygen in formation of radiative recombination centers in  $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$  crystals. *Intern. J. Inorg. Mat.* **116** (8), 083511 (2014).
21. N.N. Berchenko, V.E. Krevs, V.G. Sredin. *Semiconductor Solid Solutions and Their Application* (Voennizdat, 1982) (in Russian).
22. A.M. Gurvich. *Introduction to Physical Chemistry of Crystal Phosphors* (Vysshaya Shkola, 1982) (in Russian).
23. U. Kilgus, R. Kotthaus, E. Lange. Prospects of CsI (Tl)-photodiode detectors for low-level spectroscopy. *Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res.* **297** (3), 425 (1990).

Одержано 25.01.18

O.G. Trubaieva, M.A. Chaika, O.V. Zelenskaya

MIXED  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$   
CRYSTALS AS A POSSIBLE MATERIAL  
FOR ALPHA-PARTICLE AND X-RAY DETECTORS

S u m m a r y

A possibility to use  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  as a material for the detection of X-rays and alpha particles has been studied. The influence of the sulfur content on the properties of bulk  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  crystals is analyzed. Six specimens with different component contents were grown, by using the Bridgman–Stockbarger method:  $\text{ZnS}_{0.07}\text{Se}_{0.93}$ ,  $\text{ZnS}_{0.15}\text{Se}_{0.85}$ ,  $\text{ZnS}_{0.22}\text{Se}_{0.78}$ ,  $\text{ZnS}_{0.28}\text{Se}_{0.72}$ ,  $\text{ZnS}_{0.32}\text{Se}_{0.68}$ , and  $\text{ZnS}_{0.39}\text{Se}_{0.61}$ . The intensity of X-ray luminescence spectra of  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  crystals is found to increase with the sulfur content and reaches a maximum for the composition  $\text{ZnS}_{0.22}\text{Se}_{0.78}$ . The luminescence light yield of mixed  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  crystals is higher than that of commercial  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  and  $\text{ZnSe}(\text{Al})$  crystals. The advantages of mixed crystals based on  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  over the  $\text{ZnS}(\text{Te})$  and  $\text{ZnSe}(\text{Al})$  crystals have been discussed.