

**Н.М. Литовченко<sup>1</sup>, Ю.Н. Насека<sup>1</sup>,  
А.В. Прохорович<sup>1</sup>, Л.В. Рашковецкий<sup>1</sup>,  
О.Н. Стрильчук<sup>1</sup>, Ф.Ф. Сизов<sup>1</sup>,  
О.О. Войчиховская<sup>2</sup>, Б.А. Данильченко<sup>2</sup>**

## **АНАЛИЗ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , ОБЛУЧЕННЫХ $\gamma$ -КВАНТАМИ**

Изучено влияние облучения потоками  $\gamma$ -квантов (доза 10—500 кГр) на низкотемпературную ( $T = 5$  К) фотолюминесценцию кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ( $x = 0,04$ ). Наблюдались стимулированные  $\gamma$ -облучением: а) существенное уменьшение интенсивностей исходных (ростовых) полос люминесценции, обусловленных донорно-акцепторными парами ( $h\nu_m = 1,552$  эВ), мелкими акцепторами ( $h\nu_m = 1,578$  эВ), а также связанными на мелких нейтральных акцепторах ( $h\nu_m = 1,585$  эВ и  $h\nu_m = 1,591$  эВ) и донорах ( $h\nu_m = 1,592$  эВ и  $h\nu_m = 1,595$  эВ) экситонами вследствие уменьшения концентрации соответствующих центров люминесценции, из-за их взаимодействия с радиационными дефектами; б) появление новых полос люминесценции, обусловленных, вероятнее всего, радиационно-стимулированными вакансиями кадмия ( $V_{\text{Cd}}$ ), связанными с иными дефектами (донорно-акцепторными парами,  $h\nu_m = 1,550$  эВ) и изолированными вакансиями кадмия ( $h\nu_m = 1,568$  эВ). Интенсивность радиационно-стимулированных полос немонотонно изменяется с возрастанием дозы  $\gamma$ -облучения: сначала увеличивается при низких  $\Phi_\gamma$  (из-за повышения концентрации вакансий кадмия), а затем значительно уменьшается при высоких  $\Phi_\gamma$  (из-за генерации значительного количества эффективных центров безызлучательной рекомбинации избыточных носителей тока).

**Ключевые слова:** кристаллы  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ,  $\gamma$ -облучение, радиационные дефекты, низкотемпературная фотолюминесценция.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время одним из основных требований, предъявляемых к изготовителям детекторов инфракрасного излучения на основе монокристаллов тройных соединений  $\text{CdZnTe}$ , является их безотказная работоспособность в условиях повышенного радиационного фона. Это и обуславливает постоянно возрастающий интерес к изучению влияния облучения высокоэнергетическими частицами на физические свойства интерметаллических соединений  $\text{CdZnTe}$ . Результаты исследований позволяют сделать важные выводы о радиационном дефектообразовании в них, что помогает оптимально скорректировать технологию изготовления детекторов инфракрасного излучения на их основе с учетом минимизации влияния радиации на функциональные возможности указанных приборов [1—5]. В настоящей работе приведены сведения о влиянии облучения  $\gamma$ -квантами на фотолюминесценцию указанного соединения. Покажем, что  $\gamma$ -облучение существенно влияет на люминесцентные характеристики кристаллов  $\text{CdZnTe}$  и обсудим физическую модель процессов, приводящих к этому.

### **2. МЕТОДИКА**

Исследования проводились на кристаллах  $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , выращенных методом Бриджмена. Перед исследованиями кристаллы ориентации (111) подвергались химико-механической обработке в травителе бром-метанол [6]. Содержание цинка в исследуемых кристаллах определя-

© **Н.М. Литовченко**, Ю.Н. Насека, А.В. Прохорович, Л.В. Рашковецкий, О.Н. Стрильчук, Ф.Ф. Сизов, О.О. Войчиховская, Б.А. Данильченко, 2010

лось методом рентгеновской дифрактометрии ( $x = 0,04$ ). Кристаллы облучались источником  $^{60}\text{Co}$  (с энергией квантов 1,2 МэВ) в интервале доз 10—500 кГр (поток  $\gamma$ -квантов  $N_\gamma = 1,69 \cdot 10^{15}$ — $8,5 \cdot 10^{16}$  кв/см<sup>2</sup>) при комнатной температуре. Спектры фотолюминесценции исследуемых кристаллов  $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  изучались при температуре  $T = 5$  К. Люминесценция возбуждалась He—Ne-лазером ЛГН-222 (интенсивность возбуждения  $L = 10^{19}$  кв/(см<sup>2</sup> · с), энергия квантов  $h\nu = 1,96$  эВ). Для получения спектров низкотемпературной фотолюминесценции в интервале 1,3—1,7 эВ использовался монохроматор МДР-23, регистрация сигнала осуществлялась охлаждаемым ФЭУ-62.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены спектры низкотемпературной фотолюминесценции кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ( $x = 0,04$ ): исходных и облученных различными дозами  $\gamma$ -квантов ( $\Phi_\gamma \leq 500$  кГр), а также их разложение на элементарные составляющие [7—9]. Анализируя наблюдаемые в них полосы люминесценции (их интенсивности  $I$ , положение максимумов излучения  $h\nu_m$  и полуширины  $w$ ), получаем:

1. В исходных кристаллах наблюдаются такие полосы люминесценции: а) полоса люминесценции с  $h\nu_m = 1,552$  эВ и  $w = 17,7$  мэВ, обусловленная рекомбинацией в созданных мелкими нейтральными донорами  $D^0$  и акцепторами  $A^0$  донорно-акцепторных парах (далее полоса  $D^0A^0$ ), а также две ее фононные реплики, которые смещены относительно основной полосы в область меньших энергий соответственно на 22 и 44 мэВ; б) полоса люминесценции с  $h\nu_m = 1,578$  эВ и  $w = 18$  мэВ, обусловленная переходами свободных электронов  $e$  на мелкие нейтральные акцепторы  $A^0$  (далее полоса  $eA^0$ ); в) полосы люминесценции с  $h\nu_m = 1,585$  эВ и  $w = 7,1$  мэВ, а также  $h\nu_m = 1,591$  эВ и  $w = 7,1$  мэВ, обусловленные аннигиляцией экситонов  $X$ , связанных соответственно на мелких нейтральных акцепторах  $A_1^0$  (далее полоса  $A_1^0X$ ) и  $A_2^0$  (далее полоса  $A_2^0X$ ); г) полосы люминесценции с  $h\nu_m = 1,592$  эВ и  $w = 2,3$  мэВ, а также  $h\nu_m = 1,595$  эВ и  $w = 5$  мэВ, обусловленные аннигиляцией экситонов  $X$ , связанных соответственно на мелких нейтральных донорах  $D_1^0$  (далее полоса  $D_1^0X$ ) и  $D_2^0$  (далее полоса  $D_2^0X$ )<sup>1</sup>. В диапазоне энергий излучения  $h\nu_m = 1,4$ — $1,5$  эВ в спектрах рассмотренных кристаллов полосы люминесценции не наблюдаются. Это указывает на то, что в структуре исходных кристаллов нет глубоких дефектов связанных с А-центрами.

2) Облучение кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$   $\gamma$ -квантами приводит: а) к существенному уменьшению интенсивностей исходных полос люминесценции — примесных  $D^0A^0$ ,  $eA^0$  и экситонных  $A_1^0X$ ,  $A_2^0X$ ,  $D_1^0X$  и  $D_2^0X$ , вследствие взаимодействия соответствующих люминесцентных центров с радиационными дефектами; б) к появлению новых (с иным по отношению

<sup>1</sup> Экспериментальные значения  $h\nu_m$  ( $A^0X$ ,  $D^0X$ ) при  $T = 5$  К несколько отличаются от ожидаемых для  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ( $x = 0,04$ ) [10, 11]. Это, по-видимому, связано с наличием хвостов плотности состояний. Они возникают при сильном легировании либо при большой концентрации дефектов, сильно уменьшая ширину запрещенной зоны указанных кристаллов и поэтому понижая энергетическое положение созданных связанными экситонами центров. Не исключено, что отличие величин  $h\nu_m$  ( $A^0X$ ,  $D^0X$ ),  $T = 5$  К, в данных кристаллах  $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  обусловлено тем, что либо они определяются неизвестными, более глубокими примесями, либо существует ряд неизвестных, трудно контролируемых факторов, влияющих на  $h\nu_m$  [10, 11].

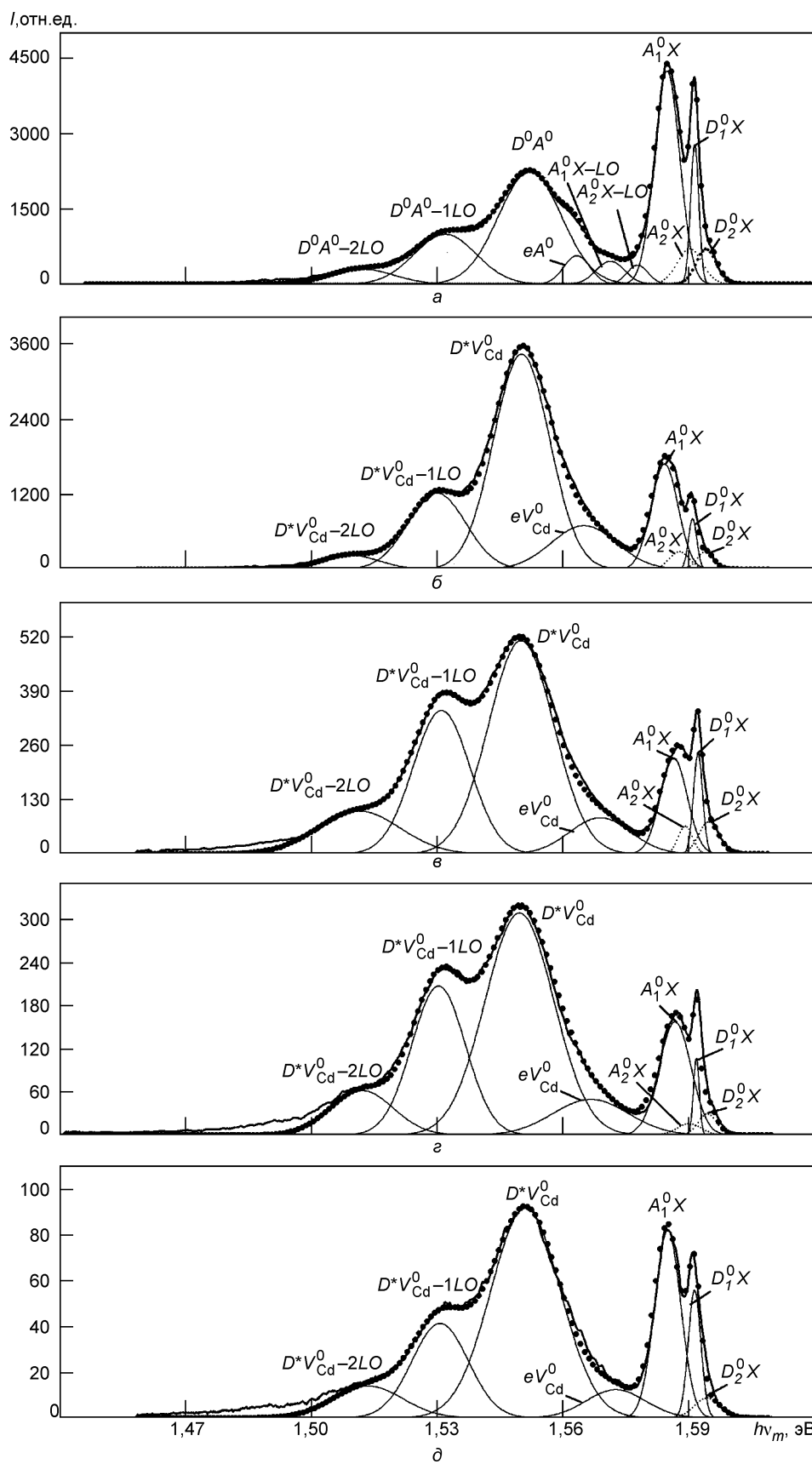


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции при  $T = 5$  К исходного (а) и облученных потоками  $\gamma$ -квантов  $\Phi_\gamma = 10$  (б), 50 (в), 100 (г) и 500 кГр (д) кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ( $x = 0,04$ ). Пунктиром обозначен результат разложения экспериментальной кривой на элементарные составляющие, которые имеют форму гаусса. Спектры показывают истинные соотношения интенсивностей полос в разных кристаллах

к исходным кристаллам положением максимума люминесценции) интенсивных полос люминесценции, обусловленных радиационно-стимулированными дефектами вакансионного типа, по-видимому, радиационно-индуцированными вакансиями кадмия, которые, как известно, являются мелкими акцепторами в CdTe [12] и, вероятно, в CdZnTe также. О достаточно высокой вероятности выполнения данного предположения свидетельствует следующее: а) концентрация радиационно-созданных вакансий кадмия в облученных кристаллах несколько выше концентрации вакансий теллура [13] (последние индуцируют в  $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$  полосу люминесценции с  $h\nu_m = 1,1$  эВ при  $T = 4,2$  К [12, 14], т. е. полосу люминесценции, которая существенно отличается от наблюдаемой в облученных кристаллах), а также выше концентрации вакансий цинка (это связано с достаточно малым содержанием цинка в исследуемых кристаллах  $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ ); б) следует ожидать, что созданные при  $\gamma$ -облучении изолированные и связанные в комплексы с примесями и другими дефектами межузельные атомы решетки  $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ , как следует из известных для некоторых из них положений созданных ими уровней [4, 12] (они существенно отличаются от соответствующих для наблюдаемых нами  $\gamma$ -индуцированных центров люминесценции), не вносят заметного вклада в  $\gamma$ -индуцированную люминесценцию. При идентификации схемы электронных переходов, которые приводят к формированию радиационно-стимулированных полос, исходили из того, что указанные значения энергий  $h\nu_m$  характерны для люминесценции, обусловленной рекомбинацией в донорно-акцепторных парах и переходами свободных электронов на мелкие нейтральные акцепторы [4, 7]. Из изложенного выше следует, что  $\gamma$ -радиация индуцирует появление таких полос люминесценции: а) полосу с  $h\nu_m = 1,550$  эВ и  $w = 16$  мэВ, обусловленную рекомбинацией в донорно-акцепторных парах  $D^*V_{\text{Cd}}^0$ , созданных исходны-

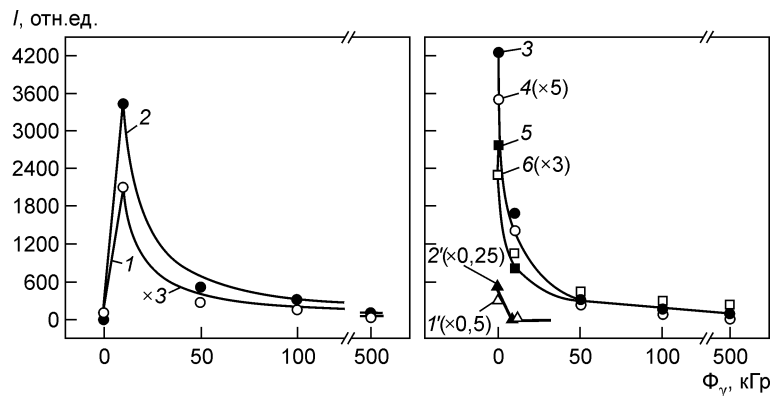


Рис. 2. Дозовые зависимости низкотемпературных ( $T = 5$  К) интенсивностей радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^*V_{\text{Cd}}^0$  (1),  $eV_{\text{Cd}}^0$  (2), наблюдаемых в  $\gamma$ -облученных кристаллах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ( $x = 0,04$ ), а также радиационно-стимулированные изменения интенсивностей исходных полос люминесценции  $D^0A^0$  (1'),  $eA^0$  (2'),  $A_1^0X$  (3),  $A_2^0X$  (4),  $D_1^0X$  (5) и  $D_2^0X$  (6) в исследуемых кристаллах (приведенные зависимости  $I(\Phi_\gamma)$  отображают истинные соотношения между величинами  $I$  исходных и облученных кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ )

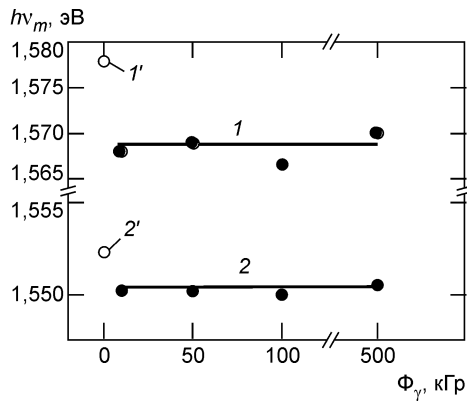


Рис. 3. Дозовые зависимости низкотемпературных ( $T = 5$  К) положений максимума  $h\nu_m$  радиационно-стимулированных полос  $D^*V_{Cd}^0$  (1),  $eV_{Cd}^0$  (2), наблюдаемых в  $\gamma$ -облученных кристаллах  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  ( $x = 0,04$ ), а также низкотемпературные значения величин  $h\nu_m$  для исходных полос люминесценции  $D^0A^0(I')$ ,  $eA^0(2')$  в необлученных кристаллах  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  ( $\Phi_\gamma = 0$ )

ми дефектами (или примесями) донорной природы  $D^*$  и радиационно-индуцированными вакансиями кадмия  $V_{Cd}^0$  (далее полоса  $D^*V_{Cd}^0$ ); б) полосу с  $h\nu_m = 1,568$  эВ и  $w = 18,3$  мэВ, обусловленную переходами свободных электронов на мелкие нейтральные акцепторы, радиационно-стимулированные вакансии кадмия (далее полоса  $eV_{Cd}^0$ , см. рис. 1, б).

На рис. 2 приведены зависимости интенсивностей исходных ( $D^0A^0$ ,  $eA^0$ ,  $A_1^0X$ ,  $A_2^0X$ ,  $D_1^0X$ ,  $D_2^0X$ ) и радиационно-стимулированных ( $D^*V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$ ) полос люминесценции от дозы  $\gamma$ -облучения. Как видим, интенсивность исходных полос сначала существенно уменьшается, а начиная с дозы  $\Phi_\gamma = 10$  кГр — плавно уменьшается. Это указывает на то, что отмеченные полосы содержат некоторое количество радиационно более стойких центров, что и обуславливает слабую зависимость их интенсивности от дозы радиации. Интенсивность радиационно-стимулированных полос сначала возрастает при низких  $\Phi_\gamma$ , а затем уменьшается при более высоких значениях  $\Phi_\gamma$  по закону близкому к  $1/\Phi_\gamma$  (положение максимума радиационно-стимулированных примесных полос фактически не изменяется с  $\Phi_\gamma$  (рис. 3)). Наблюдаемое возрастание интенсивностей полос  $D^*V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  с увеличением дозы  $\gamma$ -облучения обусловлено увеличением концентрации радиационно-стимулированных вакансий кадмия, а их понижение при высоких  $\Phi_\gamma$  — процессом генерации центров безизлучательной рекомбинации избыточных носителей тока, что приводит к существенному уменьшению концентрации последних.

## ВЫВОДЫ

$\gamma$ -Облучение кристаллов  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  существенно изменяет вид их низкотемпературных спектров фотолюминесценции: оно приводит к значительному понижению интенсивностей исходных полос люминесценции вследствие уменьшения концентрации центров излучательной рекомбинации из-за их взаимодействия с радиационными дефектами, и к появлению новых люминесцентных полос, обусловленных, вероятнее всего, возникшими под воздействием радиации вакансиями кадмия. Анализ закономерностей изменений интенсивностей полос низкотемпературной фотолюминесценции, наблюдаемых при  $\gamma$ -облучении, является важным для понимания процессов взаимодействия дефектов, содержащихся в исходных кристаллах, и радиационных дефектов, а также для выяснения причин, которые приводят к различной радиационной стойкости интерметаллических полупроводников.

**N.M. Litovchenko, Yu.M. Naseka, A.V. Prokhorovich,  
L.V. Rashkovetskiy, O.M. Strilchuk, F.F. Sizov,  
O.O. Voitsikhovska, B.O. Danilchenko**

**ANALYSIS OF PHOTOLUMINESCENCE OF  $p$ -Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te CRYSTALS IRRADIATED BY  $\gamma$ -QUANTA**

The effect of irradiation by different doses of  $\gamma$ -quanta (10—500 kGy) at 300 K on the low-temperature ( $T = 5$  K) photoluminescence of Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te crystals ( $x = 0,04$ ) has been studied. The following phenomena, stimulated by  $\gamma$ -irradiation, were observed: a) a substantial decrease of intensities of initial (as-grown) emission bands with the emission peak positions  $h\nu_m = 1,552$  eV (caused by donor-acceptor pairs),  $h\nu_m = 1,578$  eV (caused by shallow acceptors),  $h\nu_m = 1,585$ ,  $1,591$  and  $h\nu_m = 1,592$ ,  $1,595$  eV (caused by excitons bound by shallow neutral acceptors and donors, accordingly), which originates from lowering of the concentration of the corresponding luminescence centers due to their interaction with radiation defects; b) an appearance of new luminescence bands caused probably by radiation-induced cadmium vacancies bound with defects (by donor-acceptor pairs,  $h\nu_m = 1,550$  eV) and isolated cadmium vacancies ( $h\nu_m = 1,568$  eV). Intensities of radiation-stimulated emission bands non-monotonically change with the growth of  $\gamma$ -radiation dose: at first it increases at low  $\Phi_\gamma$  (it is caused by an increase in the concentration of radiation-induced cadmium vacancies) and then is noticeably lowered at high  $\Phi_\gamma$  (it is connected with generation of the considerable number of effective radiationless centers of excess charge carriers).

**Keywords:** Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te crystals,  $\gamma$ -irradiation, radiation defects, low-temperature photoluminescence.

1. Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B., Fernandez P., Piqueras J. Deep energy levels in CdTe and CdZnTe // J. Appl. Phys. — 1998. — **83**, N 4. — P. 2121—2126.
2. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W., Zanarini M., Siffert P. Deep levels and compensation in  $\gamma$ -irradiated CdZnTe // Appl. Phys. Lett. — 2000. — **77**, N 20. — P. 3212—3214.
3. Вахняк Н.Д., Крилюк С.Г., Крюченко Ю.В., Купчак І.М. Вплив  $\gamma$ -опромінення на характеристики крайової фотолумінесценції нелегованого CdTe // Журн. фізичних досліджень. — 2002. — **6**, № 3. — С. 347—353.
4. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W., Zanarini M. Defective states induced in CdTe and CdZnTe detectors by high and low energy neutron irradiation // J. of Appl. Phys. — 2003. — **94**, N 5. — P. 3135—3142.
5. Krylyuk S.G., Korbutyak D.V., Kryuchenko Yu.V., Kupchak I.M., Vakhnyak N.D. Gamma-radiation effect on donor and acceptor states in CdTe and CdTe:Cl // J. Alloys and Compounds. — 2004. — **371**. — P. 142—145.
6. Chen H., Tong J., Hu Z. et al. Low-temperature photoluminescence of detector grade Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te crystal treated by different chemical etchants // J. Appl. Phys. — 1996. — **80**, N 6. — P. 3509—3512.
7. Гавриленко В.И., Грехов А.М., Корбутяк Д.В., Литовченко В.Г. Оптические свойства полупроводников: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1987. — 606 с.
8. Hjelt K., Juvonen M., Tuomi T. et al. Photoluminescence of Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te crystals grown by high-pressure Bridgman technique // Physica status solidi. — 1997. — **162** (a). — P. 747—763.
9. Глинчук К.Д., Герасименко А.С., Комарь В.К. и др. Влияние легирования различными примесями на спектрометрические характеристики кристаллов Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te ( $x \approx 0,1$ ), используемых для изготовления детекторов ядерного излучения // ОПТ. — Киев: Наук. думка, 2007. — Вып. 42. — С. 65—71.
10. Glinchuk K.D., Litovchenko N.M., Prokhorovich A.V., Strilchuk O.N. Analysis of luminescence method for determination of Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te composition // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2005. — **8**, N 3. — P. 39—44.
11. Glinchuk K.D., Litovchenko N.M., Strilchuk O.N. Analysis of luminescence method applicability for determination of Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te composition // Ibid. — 2003. — **6**, N 2. — P. 121—128.
12. Schlesinger T.E., Toney J.E., Yoon H. et al. Cadmium zinc telluride and its use as a nuclear radiation detector material // Mater. Sci. and Eng.: R. — 2001. — **32**. — P. 103—189.
13. Caillot M. Defect creation rates in CdTe irradiated by electrons // Nuclear Instruments and Methods. — 1978. — **150**. — P. 39—42.

14. *Schieber M., Schlesinger T.E., James R.B., Goorsky M.* Study of impurity segregation, crystallinity, and detector performance of melt-grown cadmium zinc telluride crystals // *J. Crystal Growth.* — 2002. — **237-239**. — P. 2082—2090.

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников  
им. В.Е. Лашкарева  
НАН Украины  
Проспект Науки, 41  
03028 Киев  
E-mail: [naseyur@meta.ua](mailto:naseyur@meta.ua)

Получено 15.04.2010

<sup>2</sup> Институт физики  
НАН Украины  
Проспект Науки, 46  
03028 Киев