

# Влияние $\gamma$ -облучения на фотолюминесценцию кристаллов $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ , предварительно обработанных интенсивным излучением неодимового лазера

© К.Д. Глинчук, А.П. Медвидь\*, А.М. Мычко\*, Ю.Н. Насека, А.В. Прохорович, О.Н. Стрильчук<sup>†</sup>

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

\* Riga Technical University, LV-1048 Riga, Latvia

(Получена 16 мая 2012 г. Принята к печати 31 мая 2012 г.)

Изучено влияние предварительной обработки кристаллов  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$  мощным импульсным излучением неодимового лазера (мощность  $\leq 1.8 \text{ МВт/см}^2$ , длина волны 532 нм) на индуцированную  $\gamma$ -облучением (доза 5 кГр) низкотемпературную (5 К) фотолюминесценцию. Полосы люминесценции обусловлены радиационно-стимулированными донорно-акцепторными парами, включающими мелкие нейтральные доноры и стимулированные  $\gamma$ -облучением нейтральные вакансии кадмия, переходом свободных электронов на нейтральные созданные радиацией вакансии кадмия и аннигиляцией связанных на последних экситонов. Показано, что в предварительно обработанных лазерным излучением кристаллах интенсивности  $\gamma$ -стимулированных полос люминесценции существенно ниже, чем в не обработанных лазерным излучением. Этот факт объясняется понижением концентрации созданных  $\gamma$ -облучением вакансий кадмия вследствие их аннигиляции при взаимодействии с лазерно-стимулированными дефектами, в частности вследствие их рекомбинации на лазерно-стимулированных межузельных атомах кадмия.

## 1. Введение

В последние годы значительное внимание уделяется изучению влияния  $\gamma$ -облучения на фотолюминесценцию интерметаллических соединений, в частности кристаллов  $\text{CdTe}$  (см., например, [1]) и  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  (см., например, [2]). Настоящая работа также посвящена изучению влияния  $\gamma$ -облучения на фотолюминесценцию кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ , а именно выяснению влияния предварительной обработки кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  мощным лазерным облучением (использовалась вторая гармоника неодимового лазера) на их  $\gamma$ -стимулированную фотолюминесценцию. Мы впервые покажем, что указанное воздействие существенно понижает интенсивности генерируемых в них  $\gamma$ -индуцированных полос фотолюминесценции (обусловленных рекомбинацией в донорно-акцепторных парах (мелкий нейтральный донор  $D^0$ ) – (радиационно-стимулированная нейтральная вакансия кадмия  $V_{\text{Cd}}^0$ ), переходом свободных электронов на такие вакансии и аннигиляцией экситонов, связанных на вакансиях кадмия), и обсудим модель, объясняющую наблюдаемые закономерности.

## 2. Методика

Исследования проводились на кристаллах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  ( $x = 0.1$ , величина  $x$  определялась методом рентгеновской дифрактометрии), выращенных методом Бриджмена под высоким давлением инертных газов. Удельное сопротивление при комнатной температуре составляло  $\rho \approx 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и  $\rho \rightarrow \infty$  при температуре  $T = 5 \text{ К}$ . Кристаллы предварительно шлифовались алмазными

пастами и полировались в травителе бром–метанол [3] (в [3] показано, что обработка кристаллов  $\text{CdTe}$  в травителе бром–метанол существенно понижает, до минимальных значений, скорость поверхностной рекомбинации избыточных носителей тока в них). Изучалась фотолюминесценция следующих кристаллов  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ : а) исходных; б) облученных при 300 К  $\gamma$ -квантами (доза  $\Phi_\gamma = 5 \text{ кГр}$ , энергия 1.2 МэВ, поток  $\gamma$ -квантов  $8.45 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; далее —  $\gamma$ -облученные кристаллы); в) облученных второй гармоникой мощного наносекундного неодимового лазера YAG : Nd (длина волны 532 нм, энергия кванта 2.3 эВ, мощность  $P_l \leq 1.8 \text{ МВт/см}^2$ , длительность импульса 10 нс, коэффициент поглощения лазерного излучения  $10^5 \text{ см}^{-1}$ ; далее — лазерно-обработанные кристаллы); г) предварительно обработанных излучением второй гармоники лазера YAG : Nd, а затем облученных  $\gamma$ -квантами (доза  $\Phi_\gamma = 5 \text{ кГр}$ , далее — лазерно-радиационно-обработанные кристаллы). Все кристаллы изучались с помощью атомно-силовой микроскопии, и в результате можно утверждать, что лазерная обработка не приводит к изменениям поверхности указанных кристаллов. С целью избежать испарения атомов Cd и Te с поверхности изучаемых кристаллов под действием мощного излучения YAG : Nd-лазера (возможного вследствие нагрева излучением) на них была нанесена тонкая пленка  $\text{SiO}_2$  (толщиной  $\sim 0.2 \text{ мкм}$ ), которая является прозрачной для излучения с энергиями фотонов  $h\nu \leq 2.3 \text{ эВ}$  [4]. Спектры фотолюминесценции исследуемых кристаллов  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$  регистрировались при температуре  $T = 5 \text{ К}$ . Для их регистрации использовался спектрометр МДР-23 и охлаждаемый фотоумножитель ФЭУ-62 (спектральное разрешение 0.2 мэВ). Для возбуждения люминесценции использовалось сильно поглощаемое (коэффициент поглощения  $10^5 \text{ см}^{-1}$ ) излуче-

<sup>†</sup> E-mail: strilchuk@isp.kiev.ua

ние твердотельного полупроводникового лазера (мощность излучения 50 мВт, размер светового пятна 1 мм, энергия фотона 2.3 эВ). При указанной температуре измерения спектров фотолюминесценции проводимости исследуемых кристаллов определялась генерируемыми излучением твердотельного лазера фотоэлектронами и фотодырками. При используемых низких потоках  $\gamma$ -квантов при облучении кристаллов  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$  радиационное воздействие не приводило к изменению (ослаблению либо усилению) темпа безызлучательной рекомбинации носителей тока в них [2].

### 3. Результаты

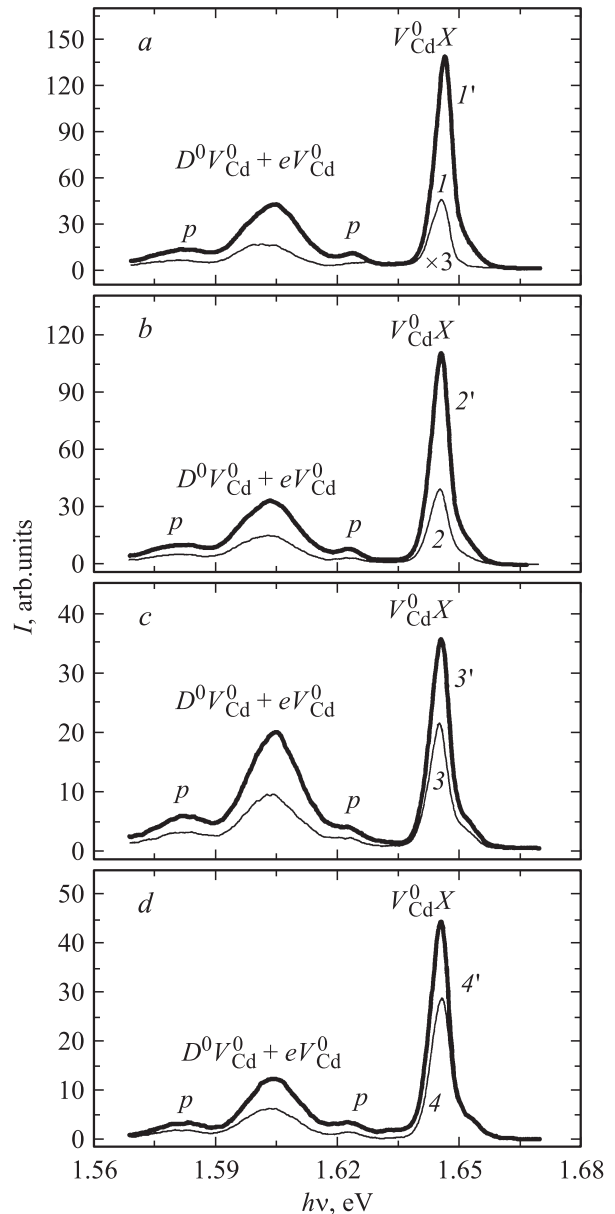
Основные данные, иллюстрирующие влияние предварительной обработки кристаллов  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$  излучением YAG : Nd-лазера ( $P_l \leq 1.8 \text{ МВт/см}^2$ ) на индуцированную в них  $\gamma$ -облучением ( $\Phi_\gamma = 5 \text{ кГр}$ ) низкотемпературную ( $T = 5 \text{ К}$ ) фотолюминесценцию (на интенсивности полос излучения в спектрах люминесценции  $I$ , энергии максимумов  $h\nu_m$  и ширины на полувысоте  $w$ ), показаны на рис. 1–4. В них обращают на себя внимание следующие закономерности, показывающие влияние лазерных, радиационных и лазерно-радиационных воздействий на фотолюминесценцию кристаллов  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$  (величины  $I$ ,  $h\nu_m$  и  $w$ ).

1) В исходных кристаллах наблюдаются (см. рис. 1): а) относительно широкая сложная (неэлементарная) полоса люминесценции  $D^0V_{\text{Cd}}^0 + eV_{\text{Cd}}^0$  с максимумом при  $h\nu_m = 1.6012 \text{ эВ}$  и шириной на половине высоты  $w = 17 \text{ мэВ}$  (она обусловлена, во-первых, излучательной рекомбинацией электронов на ростовых донорно-акцепторных парах  $D^0V_{\text{Cd}}^0$ , где  $D^0$  — ростовой мелкий нейтральный донор,  $V_{\text{Cd}}^0$  — ростовая нейтральная вакансия кадмия, и, во-вторых, переходами свободных электронов  $e$  на мелкие нейтральные ростовые вакансии кадмия  $V_{\text{Cd}}^0$ ) [1,2,5];<sup>1</sup> б) элементарная относительно узкая полоса люминесценции  $V_{\text{Cd}}^0X$  с  $h\nu_m = 1.6454 \text{ эВ}$  и  $w = 5.5 \text{ мэВ}$ , обусловленная излучательной аннигиляцией экситонов  $X$ , связанных на нейтральных ростовых вакансиях кадмия  $V_{\text{Cd}}^0$ , т.е. обусловленная связанными экситонами  $V_{\text{Cd}}^0X$  [1,2,5,6]. При указанной идентификации полос люминесценции в исходных кристаллах  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$  учтено, что доминирующими мелкими акцепторами в них являются ростовые вакансии кадмия; изолированные и связанные в комплексы ростовые вакансии кадмия являются эффективными центрами люминесценции (см., например, [3] относительно  $\text{CdTe}$ , [7] относительно  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ ).

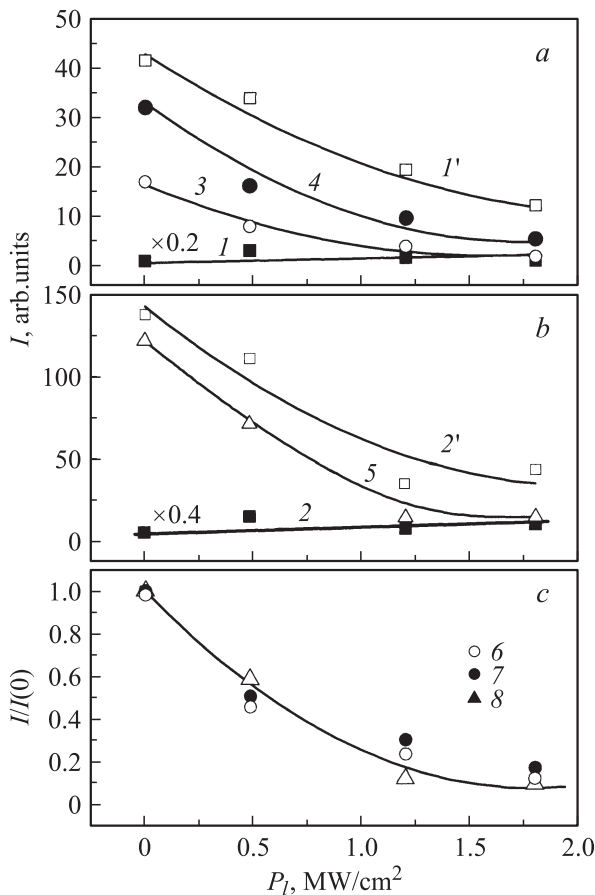
2) Лазерное облучение кристаллов  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$  приводит к относительно небольшому увеличению интенсивностей наблюдаемых в исходных кристаллах сложной,  $D^0V_{\text{Cd}}^0 + eV_{\text{Cd}}^0$  с  $h\nu_m = 1.6012 \text{ эВ}$ , и элементарной,  $V_{\text{Cd}}^0X$  с  $h\nu_m = 1.6454 \text{ эВ}$ , полос люминесценции — эф-

<sup>1</sup> При низких температурах ( $T = 5 \text{ К}$ ) в освещенных лазером кристаллах  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$  вакансии Cd находятся в основном в нейтральном состоянии [2].

фект тем сильнее, чем выше  $P_l$  (см. рис. 1 и 2). Увеличение интенсивностей полос люминесценции, очевидно, связано с генерацией при лазерной обработке вакансий кадмия  $V_{\text{Cd}}^0$  и в результате — с появлением лазерно-стимулированных центров люминесценции  $D^0V_{\text{Cd}}^0$ ,  $V_{\text{Cd}}^0$  и  $V_{\text{Cd}}^0X$ , рекомбинация носителей заряда через которые приводит к появлению лазерно-индуцированных сложных полос люминесценции  $D^0V_{\text{Cd}}^0 + eV_{\text{Cd}}^0$  и  $V_{\text{Cd}}^0X$ .



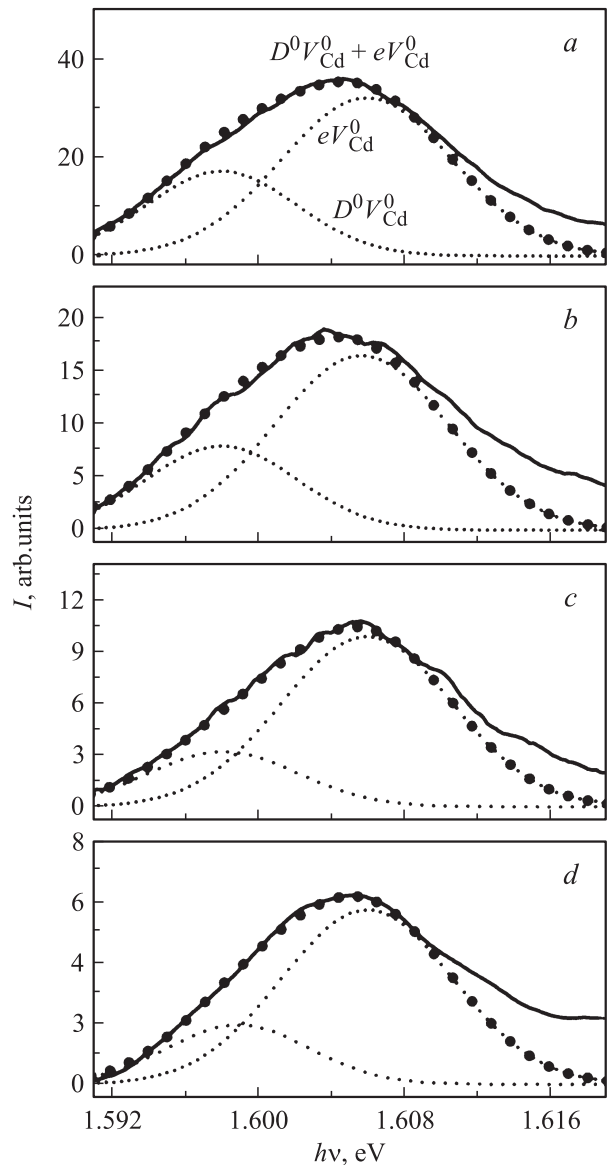
**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции при  $T = 5 \text{ К}$  кристаллов  $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ . а — исходный ( $I$ ) и  $\gamma$ -облученный ( $I'$ ) кристаллы; б–д — лазерно-обработанные (2–4) и лазерно-радиационно-обработанные (2'–4') кристаллы. Доза  $\gamma$ -квантов  $\Phi_\gamma = 5 \text{ кГр}$ , мощность лазерного облучения  $P_l = 0$  ( $I, I'$ ),  $0.48$  (2, 2'),  $1.2$  (3, 3'),  $1.8 \text{ МВт/см}^2$  (4, 4').  $p$  — LO-фононные повторения полос люминесценции  $D^0V_{\text{Cd}}^0 + eV_{\text{Cd}}^0$  и  $V_{\text{Cd}}^0X$ . Спектры показывают истинные соотношения между интенсивностями излучаемых полос люминесценции в различных кристаллах.



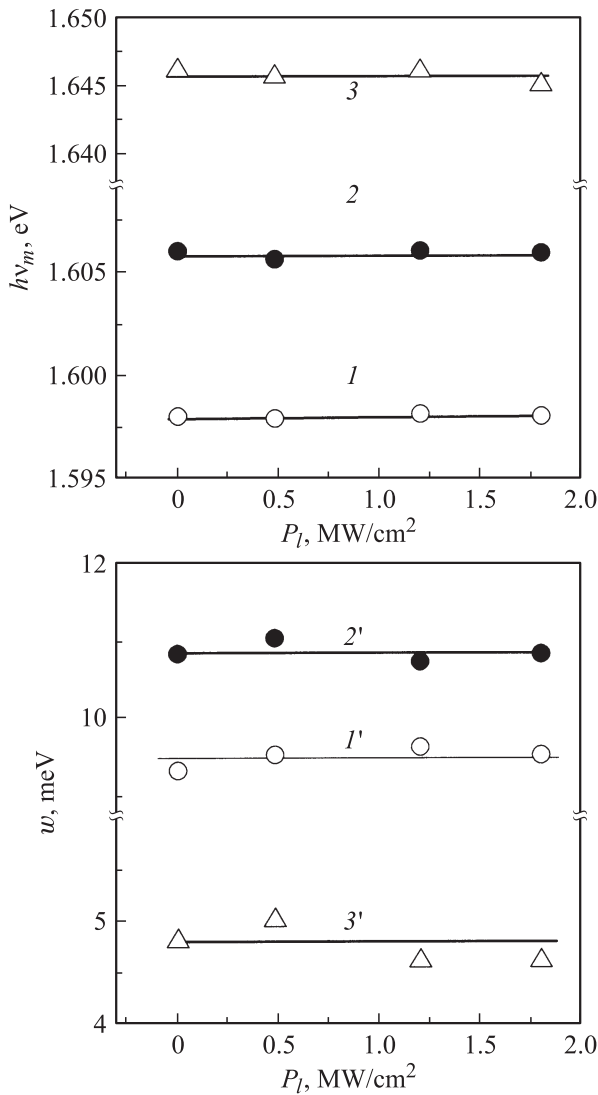
**Рис. 2.** *a, b* — зависимости интенсивностей  $I$  сложных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  ( $I, I'$ ) и  $V_{Cd}^0X$  ( $2, 2'$ ) в лазерно- ( $I, 2$ ) и лазерно-радиационно-обработанных ( $I', 2'$ ) кристаллах, а также интенсивностей элементарных радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$  ( $3$ ),  $eV_{Cd}^0$  ( $4$ ) и  $V_{Cd}^0X$  ( $5$ ) в лазерно-радиационно-обработанных кристаллах  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  от дозы лазерного облучения  $P_l$ .  $I-5, I', 2'$  показывают истинные соотношения между интенсивностями различных полос люминесценции; величины  $I$  при  $P_l = 0$  характеризуют интенсивности полос в исходных ( $I, 2$ ) и  $\gamma$ -облученных без лазерной обработки ( $I', 2', 3-5$ ) кристаллах. *c* — нормированные на значение  $I$  при  $P_l = 0$  зависимости интенсивностей элементарных радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$  ( $6$ ),  $eV_{Cd}^0$  ( $7$ ) и  $V_{Cd}^0X$  ( $8$ ) от дозы лазерного воздействия  $P_l$  в лазерно-радиационно-обработанных кристаллах. Доза радиационного воздействия  $\Phi_\gamma = 5$  кГр, температура измерений  $T = 5$  К.

3) Облучение  $\gamma$ -квантами кристаллов  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  приводит к появлению индуцированных радиационно-стимулированными вакансиями кадмия  $V_{Cd}^0$  интенсивных сложных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  ( $h\nu_m = 1.6045$  эВ,  $w = 17$  мэВ) и  $V_{Cd}^0X$  ( $h\nu_m = 1.6461$  эВ,  $w = 5$  мэВ) — см. рис. 1 [2]. Это связано с генерацией при  $\gamma$ -воздействии интенсивных радиационно-стимулированных полос люминесценции, а именно: сложной (неэлементарной) полосы люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  с  $h\nu_m = 1.6045$  эВ,  $w = 16$  мэВ (см. рис. 3), обуслов-

ленной элементарными полосами люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$  и  $eV_{Cd}^0$ , возникающими, во-первых, при рекомбинации электронов на радиационно-индуцированных донорно-акцепторных парах  $D^0V_{Cd}^0$  ( $h\nu_m = 1.598$  эВ,  $w = 9.3$  мэВ, см. рис. 3 и 4) и, во-вторых, при переходах свободных электронов на нейтральные радиационно-стимулированные вакансии кадмия  $V_{Cd}^0$  ( $h\nu_m = 1.606$  эВ,



**Рис. 3.** Примеры разложения наблюдаемых при  $T = 5$  К в кристаллах  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  радиационно-стимулированных сложных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  на элементарные составляющие гауссовой формы  $D^0V_{Cd}^0$  и  $eV_{Cd}^0$ . Величины  $I, h\nu_m$  и  $w$  для элементарных полос (параметры разложения) приведены на рис. 2 и 4. Точки — сумма найденных элементарных радиационно-стимулированных полос  $D^0V_{Cd}^0$  и  $eV_{Cd}^0$ . *a* — облученный кристалл; *b-d* — лазерно-радиационно-обработанные кристаллы. Доза  $\gamma$ -квантов  $\Phi_\gamma = 5$  кГр, мощность лазерного облучения  $P_l = 0$  (*a*), 0.48 (*b*), 1.2 (*c*), 1.8 МВт/см<sup>2</sup> (*d*). Спектры показывают истинные соотношения между интенсивностями излучаемых полос люминесценции в различных кристаллах.



**Рис. 4.** Положения максимумов  $h\nu_m$  (1–3) и ширины на полувысоте  $w$  (1'–3') элементарных радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$  (1, 1'),  $eV_{Cd}^0$  (2, 2') и  $V_{Cd}^0X$  (3, 3') в лазерно-радиационно-обработанных кристаллах  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  при различных дозах лазерного облучения. Значения  $h\nu_m$  и  $w$  при  $P_l = 0$  соответствуют  $\gamma$ -облученным кристаллам без лазерной обработки. Доза  $\gamma$ -облучения  $\Phi_\gamma = 5$  кГр, температура измерения  $T = 5$  К.

$w = 10.8$  мэВ — см. рис. 3 и 4 [2]);<sup>2</sup> элементарной полосы люминесценции  $V_{Cd}^0X$  с  $h\nu_m = 1.6461$  эВ,  $w = 4.8$  мэВ, обусловленной аннигиляцией экситонов  $X$ , связанных на нейтральных радиационно-стимулированных вакансиях кадмия, т.е. обусловленной

<sup>2</sup> Весьма вероятно, что радиационно-стимулированные центры люминесценции  $V_{Cd}^0$  характеризуются сильным электрон-фононным взаимодействием (при переходе испускаются акустические фононы). Это приводит к существенному уширению (по сравнению с ожидаемым при отсутствии указанного взаимодействия  $\sim 0.75$  мэВ при  $T = 5$  К, т.е. для бесфононных излучательных переходов) элементарной радиационно-стимулированной полосы  $eV_{Cd}^0$ , и обуславливает ее гауссову форму (см. рис. 3) [2].

связанными экситонами  $V_{Cd}^0X$  (см. рис. 4)<sup>3</sup> (очевидно, что, во-первых, радиационно-стимулированные пары  $D^0V_{Cd}^0$  образуются за счет миграции подвижных при умеренных температурах вакансий кадмия, созданных  $\gamma$ -облучением, к дефектам  $D^0$  и, во-вторых, возможно, радиационно-стимулированные связанные экситоны  $V_{Cd}^0X$  образуются за счет низкотемпературной миграции свободных экситонов к созданным  $\gamma$ -облучением вакансиям кадмия).

4) В  $\gamma$ -облученных предварительно лазерно-обработанных кристаллах интенсивности генерируемых сложных радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  существенно ниже интенсивностей аналогичных сложных полос, наблюдаемых в  $\gamma$ -облученных, но не обработанных лазером ( $P_l = 0$ ) кристаллах (см. рис. 1). Указанный лазерно-стимулированный эффект снижения интенсивностей сложных полос люминесценции в лазерно-радиационно-обработанных кристаллах имеет место вследствие лазерно-стимулированного снижения интенсивностей  $\gamma$ -индуцированных сложной полосы люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и элементарных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  (см. рис. 2 и 3). Отмеченный эффект лазерно-стимулированного понижения интенсивностей  $\gamma$ -индуцированных сложной полосы люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и элементарных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  в предварительно лазерно-обработанных кристаллах выражен тем сильнее, чем выше доза лазерного облучения  $P_l$  (см. рис. 2).<sup>4</sup>

Здесь необходимо заметить следующее, относящееся к обработке приведенных на рис. 1 экспериментальных данных  $I = f(\Phi_\gamma, P_l)$ .

— На опыте наблюдалось определенное наложение исходных,  $\gamma$ -, лазерно-стимулированных и генерируемых в лазерно-радиационно-обработанных кристаллах полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  вследствие того, что в их формировании принимают участие центры люминесценции, приводящие к близким величинам  $h\nu_m$  и  $w$  — см. выше, а именно: исходных и  $\gamma$ -стимулированных в  $\gamma$ -облученных кристаллах; исходных и лазерно-стимулированных в лазерно-обработанных кристаллах; лазерно-стимулированных и наблюдаемых в лазерно-радиационно-обработанных кристаллах (см. рис. 1). Результатом является тот факт, что измеряемые в радиационно- и лазерно-радиационно-обработанных кристаллах  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  интенсивности сложных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  несколько превышали

<sup>3</sup> О методе определения интенсивностей, положения максимумов и ширины радиационно-стимулированных сложной,  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$ , и элементарных,  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$ , полос люминесценции из анализа сложных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  в радиационно-, а также в лазерно-радиационно-обработанных кристаллах см. далее.

<sup>4</sup> Лазерное воздействие не приводило к изменению положения максимумов и ширины радиационно-стимулированных элементарных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  (см. рис. 4). Это свидетельствует о том, что лазерная обработка не приводит к изменению природы рассматриваемых радиационно-стимулированных центров люминесценции, а также состава кристаллов  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  [8].

интенсивности радиационно-индуцируемых в них сложной  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и элементарной  $V_{Cd}^0X$  полос люминесценции. Поэтому приведенные выше интенсивности  $\gamma$ -индуцированных сложной  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и элементарной  $V_{Cd}^0X$  полос люминесценции в не обработанных лазером кристаллах находились путем вычитания из спектров люминесценции  $\gamma$ -облученных кристаллов соответствующих спектров люминесценции исходных (при  $P_l = 0$ ) кристаллов, а радиационно-стимулированных сложной  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и элементарной  $V_{Cd}^0X$  полос люминесценции в предварительно обработанных лазером кристаллах — путем вычитания из спектров люминесценции лазерно-радиационных кристаллов спектров люминесценции лазерно-обработанных кристаллов. Очевидно, при указанном методе определения интенсивностей радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  предполагается, что  $\gamma$ -облучение слабо влияет на интенсивность лазерно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$ ; выполнение этого предположения не является принципиальным — его нарушение лишь несколько завышает рассчитанный лазерно-стимулированный эффект снижения интенсивностей элементарных радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  (см. далее).

— Радиационно-стимулированные элементарные полосы люминесценции гауссовой формы  $D^0V_{Cd}^0$  и  $eV_{Cd}^0$  в  $\gamma$ - и лазерно-радиационно-обработанных кристаллах находились путем разложения наблюдаемых в них  $\gamma$ -индуцированных сложных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  на их элементарные составляющие  $D^0V_{Cd}^0$  и  $eV_{Cd}^0$  (см. рис. 3) [2]. Анализ найденных указанных элементарных полос люминесценции позволил определить зависимости их характеристик  $I$ ,  $h\nu_m$  и  $w$  от дозы лазерного облучения  $P_l$ .

#### 4. Обсуждение результатов

В принципе лазерно-стимулированный эффект понижения интенсивностей радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  в предварительно лазерно-обработанных кристаллах  $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$  может быть связан со следующими двумя причинами: во-первых, со стоком радиационно-стимулированных вакансий кадмия на лазерно-стимулированные дефекты, что приводит к снижению концентрации радиационно-стимулированных центров  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $V_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  и, следовательно, интенсивностей радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  (очевидно, лазерно-стимулированный эффект снижения интенсивности рассматриваемых полос люминесценции будет тем выше, чем больше доза лазерного облучения); во-вторых, с генерацией лазерным облучением эффективных центров безызлучательной рекомбинации носителей тока, существенно понижающих концентрации последних и вследствие этого снижающих интенсив-

ности радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  (несомненно, отмеченный лазерно-стимулированный эффект снижения интенсивности радиационно-стимулированных полос люминесценции будет тем больше, чем  $P_l$  выше).

Наблюдаемое нами лазерно-стимулированное снижение интенсивностей  $\gamma$ -стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  связано со стоком индуцируемых  $\gamma$ -облучением вакансий кадмия на лазерно-стимулированные дефекты, что приводит к существенному уменьшению концентрации центров люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $V_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  (подробнее об этом см. далее). Маловероятным объяснением наблюдаемых закономерностей значительного уменьшения интенсивностей  $\gamma$ -индуцированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  при предварительном лазерном воздействии является усиливающаяся с ростом  $P_l$  генерация эффективных центров безызлучательной рекомбинации избыточных носителей тока (мы считаем, что возможный процесс лазерно-индуцированного усиления темпа безызлучательной рекомбинации носителей тока не оказывает существенного влияния на наблюдаемое снижение интенсивности радиационно-стимулированных полос люминесценции с ростом  $P_l$ ). Действительно, о достоверности предположения, что обсуждаемое лазерно-индуцированное понижение интенсивностей  $\gamma$ -стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  обусловлено уменьшением концентраций  $\gamma$ -стимулированных центров люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $V_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$ , свидетельствует следующее.

Интенсивности  $\gamma$ -стимулированных элементарных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  одинаково снижаются с ростом  $P_l$  (см. рис. 2). Об этом свидетельствует наблюдаемое в лазерно-радиационно-обработанных кристаллах совпадение нормированных на значение  $I$  при  $P_l = 0$ ,  $I(0)$ , зависимостей интенсивностей  $\gamma$ -стимулированных элементарных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  от  $P_l$  (см. рис. 2). Этого эффекта и следовало ожидать для случая, когда вызванное лазерной обработкой изменение интенсивностей полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  обусловлено лазерно-стимулированным снижением концентрации центров  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $V_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$ . Действительно, в противном случае (когда изменение интенсивности радиационно-стимулированных полос люминесценции при предварительном лазерном облучении кристаллов обусловлено лазерно-индуцированным усилением темпа безызлучательной рекомбинации носителей тока) следовало ожидать существенного различия зависимостей интенсивностей полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$  и  $eV_{Cd}^0$ , с одной стороны, и  $V_{Cd}^0X$  — с другой, от дозы лазерного облучения  $P_l$  ввиду сильно различающихся зависимостей интенсивностей полос  $D^0V_{Cd}^0$  и  $eV_{Cd}^0$  и полосы  $V_{Cd}^0X$  от интенсивности возбуждения, т.е. от концентрации избыточных носителей тока [9].

Возможными процессами, приводящими к лазерно-стимулированному снижению интенсивностей  $\gamma$ -индуцированных полос люминесценции, являются следую-

щие: а) сток радиационно-стимулированных вакансий кадмия, в том числе появляющихся при термическом, при 300 К, распаде донорно-акцепторных пар  $D^0V_{Cd}^0$  и связанных экситонов  $V_{Cd}^0X$  на созданные лазерным облучением структурные дефекты, в частности межузельные атомы кадмия  $Cd_i$ ; б) сток созданных лазерным воздействием межузельных атомов кадмия на  $\gamma$ -стимулированные вакансии кадмия (в обоих случаях происходит процесс прямой рекомбинации  $\gamma$ - и лазерно-стимулированных  $V_{Cd}$  и  $Cd_i$ ).<sup>5</sup> Указанным процессам способствует тот факт, что приповерхностная область лазерно-обработанных кристаллов (размером в несколько мкм) вследствие неравномерного нагрева кристаллов  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  мощным лазерным облучением и возникновением при этом термоупругих полей напряжений обогащена межузельными атомами кадмия и структурными дефектами [4]. Размеры приповерхностной области, в которой протекают лазерно-стимулированные процессы снижения интенсивности  $\gamma$ -индуцированных полос люминесценции, как отмечалось, порядка нескольких мкм (это размер области, в которой эффективно поглощается излучение YAG : Nd-лазера). Очевидно, процессы, объясняющие лазерно-стимулированное снижение интенсивности  $\gamma$ -индуцированных полос  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$ , происходят при повышенной температуре (в частности при 300 К), при которой вакансии и межузельные атомы кадмия достаточно подвижны.

Лазерно-стимулированная генерация полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  и увеличение их интенсивностей при возрастании дозы лазерного облучения обусловлено тем, по-видимому, что в термоупругих полях, возникающих при лазерной обработке кристаллов  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ , происходит существенная генерация избыточных вакансий кадмия [4].

Заметим, что, вообще говоря,  $\gamma$ -облучение рассматриваемых кристаллов может приводить к появлению интенсивных радиационно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$ , но и к понижению интенсивностей лазерно-стимулированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$ . Отмеченный эффект может иметь место вследствие стока созданных лазерной обработкой вакансий кадмия на  $\gamma$ -индуцированные дефекты, в частности межузельные атомы кадмия. Очевидно, указанный эффект (если он имеет место) вносит относительно небольшой вклад в вычисленные (см. выше) интенсивности  $\gamma$ -индуцированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  и вид их зависимости от  $P_l$  (несколько завышается рассчитанный лазерно-стимулированный эффект снижения интенсивностей  $\gamma$ -индуцированных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и

<sup>5</sup> Не исключено, что лазерно-индуцированное понижение интенсивности  $\gamma$ -стимулированных полос люминесценции связано не только с прямой рекомбинацией радиационно-стимулированных вакансий и лазерно-индуцированных межузельных атомов кадмия, но и со стоком указанных вакансий Cd в область сильных термоупругих напряжений, возникающих при мощном лазерном облучении кристаллов  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  [4].

$V_{Cd}^0X$ ). Это следует из наблюдаемого на опыте при разных  $P_l$  существенного различия интенсивностей полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0 + eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$  в лазерно- и лазерно-радиационно-обработанных кристаллах — интенсивности указанных полос люминесценции во втором случае существенно выше, чем в первом (см. рис. 1 и 2).

## 5. Заключение

Предварительное облучение кристаллов  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  интенсивным излучением второй гармоники неодимового лазера приводит к существенному уменьшению интенсивностей генерируемых  $\gamma$ -облучением элементарных полос люминесценции  $D^0V_{Cd}^0$ ,  $eV_{Cd}^0$  и  $V_{Cd}^0X$ . Отмеченное имеет место вследствие аннигиляции созданных  $\gamma$ -облучением вакансий кадмия при их взаимодействии с лазерно-стимулированными дефектами, в частности с межузельными атомами кадмия. Полученные данные важны для понимания процессов радиационного дефектообразования (в частности процессов взаимодействия различных радиационных дефектов) в атомарных и интерметаллических полупроводниках [10,11].

## Список литературы

- [1] S.G. Krylyuk, D.V. Korbutyak, Yu.V. Kryuchenko, I.M. Kupchak, N.D. Vakhnyak. *J. Alloys. Comp.*, **371**, 142 (2004).
- [2] K.D. Glinchuk, N.M. Litovchenko, Yu.N. Naseka, A.V. Prohorovich, L.V. Rashkovetskyi, O.N. Strilchuk, F.F. Sizov, O.O. Voitsihovska, B.O. Danilchenko. *Ukr. J. Phys.*, **55**, 776 (2010).
- [3] Q. Li, W. Jie, Z. Gu, G. Yang, T. Wang, J. Zhang. *J. Cryst. Growth*, **265**, 159 (2004).
- [4] A. Medvid', L. Fedorenko, B. Korbytyak, S. Kryluk, M. Yusupov, A. Mychko. *Radiat. Meas.*, **42**, 701 (2007).
- [5] K. Hjelt, M. Juvonen, T. Tuomi, S. Nenonen, E. Eissler, M. Bavdaz. *Phys. Status Solidi A*, **162**, 747 (1997).
- [6] T.E. Schlesinger, J.E. Toney, H. Yoon, E.Y. Lee, B.A. Branett, R.B. James. *Mater. Sci. Engin R*, **32**, 103 (2001).
- [7] Q. Li, W. Jie, L. Fu, G. Yang, G. Zha, T. Wang, D. Zeng. *J. Appl. Phys.*, **100**, 013 518 (2006).
- [8] K.D. Glinchuk, N.M. Litovchenko, O.N. Strilchuk. *Semicond. Phys., Quant. Electron. Optoelectron.* **6**, 121 (2003).
- [9] К.Д. Глинчук, Н.М. Литовченко, А.В. Прохорович, О.Н. Стрильчук. В сб.: *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника* (Киев, Наук. думка, 2008) вып. 43, с. 44.
- [10] Л.С. Смирнов. *Физические процессы в облученных полупроводниках* (Наука, Сиб. отд-ние, Новосибирск, 1977).
- [11] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., Радио и связь, 1981).

Редактор Л.В. Шаронова

**Influence of  $\gamma$ -irradiation  
on the photoluminescence  
of  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  crystals preliminary  
treated by the inversive irradiation  
of the neodymium laser**

*K.D. Glinchuk, A.P. Mevid'\*, A.M. Mychko\*,  
Yu.M. Naseka, A.V. Prochorovich, O.N. Strilchuk*

Lashkarev Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
03028 Kyiv, Ukraine

\* Ruga Technical University,  
LV-1048 Riga, Latvia

**Abstract** Influence of the preliminary Nd-laser irradiation (power  $\leq 1.8$  MW/cm<sup>2</sup>, wavelength 532 nm) of  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  crystals on the  $\gamma$ -irradiation (dose 5 kGy) induced low-temperature (5 K) photoluminescence is considered. The emission bands are induced by the donor–acceptor pairs including shallow neutral donors and  $\gamma$ -radiation stimulated neutral cadmium vacancies, by transitions of free electrons to the radiation-induced neutral vacancies and by annihilation of excitons bound to the vacancies. It is shown that in the preliminary laser treated crystals the intensities of  $\gamma$ -induced emission bands are substantially lower than in the laser-untreated  $\gamma$ -irradiated crystals. The pointed regularity is explained by decrease in the concentrations of the  $\gamma$ -induced cadmium vacancies as a result of their annihilation when interacting with the laser stimulated defects, in particular, with their recombination on the laser-induced interstitial cadmium atoms.