

# Электрические и фотоэлектрические характеристики структур на основе слоистых полупроводников InSe и GaSe при облучении электронами с энергией 12.5 МэВ

© З.Д. Ковалюк<sup>¶</sup>, О.А. Политанская, О.Н. Сидор, В.Т. Маслюк\*

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича  
Национальной академии наук Украины, Черновицкое отделение,  
58001 Черновцы, Украина

\* Институт электронной физики Национальной академии наук Украины,  
88017 Ужгород, Украина

(Получена 21 ноября 2007 г. Принята к печати 24 января 2008 г.)

Исследовано влияние высокоэнергетических электронов ( $E = 12.5$  МэВ) на электрические и фотоэлектрические параметры слоистых фотопреобразователей  $p-n$ -InSe и  $p$ -GaSe– $n$ -InSe. Обнаруженные изменения вольт-амперных характеристик, спектров фотоотклика, напряжения холостого хода и тока короткого замыкания структур обусловлены образованием точечных дефектов. Отсутствие особых изменений характеристик исследуемых гомо- и гетеропереходов даже при максимальной дозе облучения позволяет рекомендовать их для создания радиационно стойких фотодетекторов.

PACS: 61.80.Fe, 61.82.Fk, 72.20.Jv, 72.40.+w, 73.40.Lq

## 1. Введение

Моноселениды индия и галлия принадлежат к широкому классу слоистых полупроводников, характеризующихся сильно выраженной структурной анизотропией. Высокая чувствительность к электромагнитному излучению видимой и ИК области спектра, возможность получения путем скола в воздушной атмосфере подложек с атомарно-гладкой поверхностью и низким числом оборванных связей в сочетании с простыми технологиями (термическое окисление, приведение в прямой оптический контакт) дают возможность создавать поверхностно-барьерные диоды,  $p-n$ -гомо- и гетеропереходы для целей фото-, опто- и квантовой электроники [1–4]. Другим интересным свойством слоистых халькогенидов является их сильная дефектность, связанная как с наличием собственных структурных и неконтролируемых дефектов, так и обусловленная специальным легированием. Данное обстоятельство является очень важным с точки зрения радиационной стойкости кристаллов  $A^{III}B^{VI}$ . Следовательно, структуры на специально легированных полупроводниках  $A^{III}B^{VI}$  не должны деградировать в результате воздействия проникающей радиации.

Изучение влияния высокоэнергетического облучения, в частности быстрыми электронами, на электрофизические свойства полупроводников остается одним из наиболее популярных на сегодняшний день направлений в радиационной физике твердого тела. Не исключением являются и яркие представители слоистых кристаллов — InSe и GaSe [5–7]. Исследования радиационных эффектов в этих материалах интересны с теоретической точки зрения и, что особенно важно, перспективны с практической точки зрения в первую очередь для прогнозирования стойкости и сроков работы фотопреобразователей в условиях воздействия ионизирующих

облучений разного вида. Однако имеется сравнительно малое число работ, посвященных изучению влияния электронного облучения на свойства фотодиодов на основе моноселенидов индия и галлия [8,9]. Полученные в них результаты находят удовлетворительные объяснения, но ограничены созданием одного типа структур и исследованием их фотоэлектрических свойств. Для подробного изучения роли данного вида излучения весьма актуальным представляется комплексное исследование электрических и фотоэлектрических характеристик нескольких типов слоистых фотопреобразователей.

В настоящей работе описано поведение фоточувствительных структур  $p$ -InSe(Cd)– $n$ -InSe(Ge),  $p$ -GaSe(Dy)– $n$ -InSe(Ge) при облучении электронами с энергией 12.5 МэВ.

## 2. Методика эксперимента

Монокристаллы слоистых полупроводников выращивались вертикальным методом Бриджмена и обладали четко выраженной слоистой структурой. В качестве полупроводника  $n$ -типа проводимости при создании структур использовался InSe, легированный германием. Количество примеси 0.3 вес% приводило к значительному изменению электрических характеристик и высоким значениям электропроводимости поперек слоев. Холловские измерения позволили определить, что при комнатной температуре концентрация основных носителей тока составляла  $\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , подвижность —  $800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Поскольку специально не легированные кристаллы InSe имеют всегда  $n$ -тип проводимости, для его изменения они легировались примесью кадмия в количестве 0.1 вес%. Кинетические параметры  $p$ -InSe(Cd) при 300 К составляли:  $p \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_p \approx 40\text{--}50 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

<sup>¶</sup> E-mail: chimsp@ukrpost.ua

Влияние электронного облучения на параметры структур  $p\text{-InSe}(\text{Cd})-n\text{-InSe}(\text{Ge})$  и  $p\text{-GaSe}(\text{Dy})-n\text{-InSe}(\text{Ge})$

Тип структуры	Флюенс, электрон $\cdot \text{см}^{-2}$	$k$ при $ V  = 1 \text{ В}$	$n$	$V_{\text{ос}}, \text{В}$	$J_{\text{sc}}, \text{мкА/см}^2$	$\delta_{1/2}, \text{мЭВ}$	$S, \text{эВ}^{-1}$	$S_I, \text{мА/Вт}$	$S_V, \text{В/Вт}$
$p-n\text{-InSe}$	0	200	1.6	0.51	480	585	60	43	$8.7 \cdot 10^3$
	$1 \cdot 10^{13}$	250	1.6	0.54	495	582	76	45	$9.8 \cdot 10^3$
	$1 \cdot 10^{15}$	180	1.8	0.57	385	617	65	38	$1.1 \cdot 10^4$
$p\text{-GaSe}-n\text{-InSe}$	0	30	1.8	0.58	310	327	57	65	$3.6 \cdot 10^4$
	$1 \cdot 10^{13}$	32	1.8	0.6	325	376	81	68	$4.5 \cdot 10^4$
	$1 \cdot 10^{15}$	35	1.9	0.59	265	387	71	56	$3.9 \cdot 10^4$

С целью увеличения электропроводности селенида галлия проводилось легирование полупроводника диспрозием в количестве 0.1 вес%. Легирование указанной примесью не изменяло исходной дырочной проводимости GaSe. Концентрация и подвижность носителей заряда составляли при комнатной температуре  $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $35\text{--}50 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  соответственно.

Для создания гомопереходов из InSe и гетеропереходов GaSe–InSe использовался метод оптического

контакта полупроводников [10]. Для первого и второго типа структур в качестве фронтального полупроводника использовались тонкие ( $\sim 10\text{--}50 \text{ мкм}$ ) пластины  $p\text{-InSe}$  и  $p\text{-GaSe}$  соответственно, в качестве базовой подложки —  $n\text{-InSe}$  толщиной  $250\text{--}300 \text{ мкм}$ .

Площадь фотодиодов равнялась  $\sim 0.25 \text{ см}^2$ . Для контактов использовался чистый индий.

Облучение исследуемых структур проводилось на импульсном ускорителе Микротрон М30. Температура облученных образцов поддерживалась на уровне  $273\text{--}300 \text{ К}$ . Плотность потока электронов составляла  $1.5 \cdot 10^{11} \text{ электрон} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ , энергия  $12.5 \text{ МэВ}$ , а флюенс — от  $1 \cdot 10^{13}$  до  $1 \cdot 10^{15} \text{ электрон} \cdot \text{см}^{-2}$ .

В ходе работы исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ) и импеданс структур на амплитудно-частотном анализаторе Schlumberger SI-1255, совмещенной с потенциостатом Schlumberger SI-1286. Измерение спектров фоточувствительности проводилось с помощью монохроматора МДР-23 с разрешающей способностью  $2.6 \text{ нм/мм}$ . Спектральное распределение относительной квантовой эффективности фотообразования определялось отношением фототока к числу падающих фотонов. Все измерения проводились при комнатной температуре.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### 3.1. Вольт-амперные характеристики

Прямые ветви ВАХ структур для разных флюенсов приведены на рис. 1. Они владеют четко выраженными диодными характеристиками, о чем свидетельствуют величины коэффициента выпрямления  $k$  (см. таблицу). Не очень высокие значения этого параметра для структуры  $p\text{-GaSe}-n\text{-InSe}$  обусловлены применением в оптическом контакте низкоомного полупроводника  $n\text{-InSe}(\text{Ge})$ .

Начальный участок ВАХ гомо- и гетеропереходов (рис. 1) при малых прямых смещениях растет по известному экспоненциальному закону:

$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]. \quad (1)$$

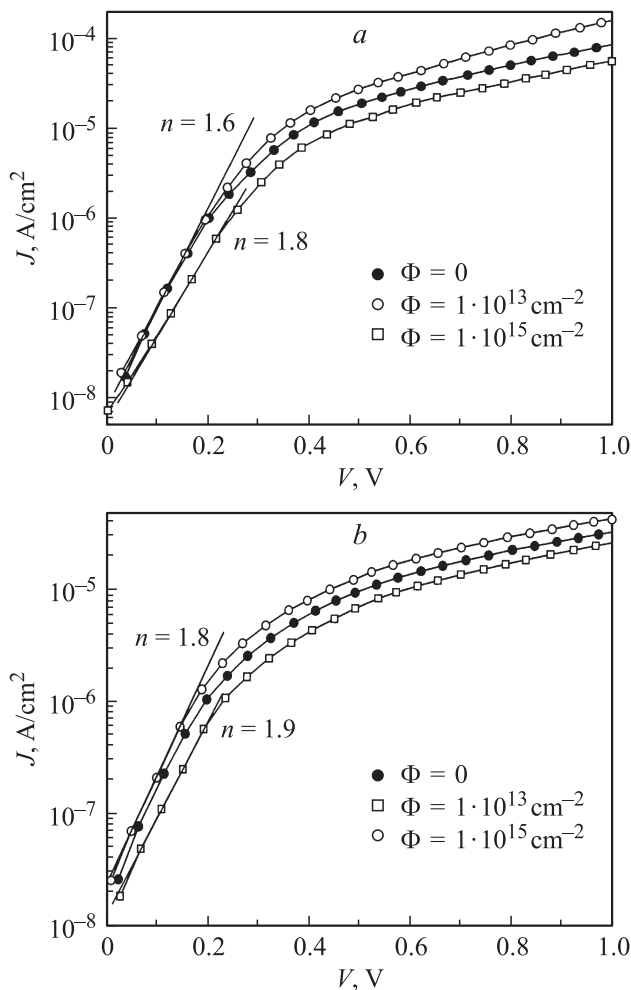


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ гомоструктуры  $p\text{-InSe}(\text{Cd})-n\text{-InSe}(\text{Ge})$  (а) и гетероструктуры  $p\text{-GaSe}(\text{Dy})-n\text{-InSe}(\text{Ge})$  (б) в зависимости от дозы облучения.  $T = 293 \text{ К}$ .

При напряжениях больше 0.2–0.3 В наблюдается отклонение ВАХ от закона (1). Это связано с наличием достаточно большого последовательного сопротивления  $R_s$ . Основной причиной, ограничивающей ток в исследуемых переходах, являлось сопротивление фронтальных полупроводников. Известно [11], что соединения InSe и GaSe обладают низкой электропроводностью перпендикулярно к слоям  $\sigma \parallel C$ , следствием чего является большое сопротивление квазинейтральных областей структур, созданных на их основе. При этом  $\sigma \parallel C$  для селенида галлия более чем на несколько порядков меньше аналогичной величины в селениде индия, что отражается на параметрах гетероструктуры  $p$ -GaSe– $n$ -InSe. В общем случае сопротивление квазинейтральных областей значительно усложняет анализ темновых ВАХ и препятствует идентификации механизма протекания тока через барьер. Для преодоления этих трудностей ВАХ перестраивались в координатах  $J$  от  $V - JR_s$ . Величина  $R_s$  находилась из измерений импеданса исследуемых структур. Учетный спад напряжения на последовательном сопротивлении заметно видоизменял экспериментальные кривые: участок, который отвечал зависимости  $J = J_0 \{ \exp[q(V - JR_s)/nkT] - 1 \}$ , становился более протяженным. По нему определялся диодный коэффициент  $n$  из соотношения  $n = \frac{q}{kT} \frac{\Delta V}{\Delta \ln I}$  (см. таблицу).

В результате электронного облучения наблюдается незначительное изменение экспоненциальной зависимости тока от напряжения и, как следствие, механизмов токопереноса через потенциальный барьер. Для исследуемых структур значения коэффициента  $n$  указывают на существование надбарьерного механизма прохождения тока (рис. 1). Известно, что на изменение диодного коэффициента могут влиять несколько факторов. Помимо диффузионной составляющей в реальных структурах имеют место шунтирующие токи [12]. Они приводят к росту темнового тока насыщения, не зависят от полярности приложенного напряжения и могут иметь разную полевую зависимость для различных образцов. Учет таких процессов объясняет значения  $n \gg 1$  для необлученных структур  $p$ - $n$ -InSe и  $p$ -GaSe– $n$ -InSe. Более тщательное приведение в оптический контакт полупроводников позволяет уменьшить параметр  $n$ . Напротив, в специально деформированных структурах значения  $n$  большие и существенно растет величина шунтирующих токов. С другой стороны, высокоэнергетическое излучение создает дефекты структуры, которые увеличивают концентрацию рекомбинационных центров в области пространственного заряда  $p$ - $n$ -перехода. Как следствие, растут рекомбинационные токи, ухудшающие диодный коэффициент ВАХ [13]. Для исследуемых структур незначительный рост  $n$  при максимальном флюенсе облучения доказывает, что внесенных радиационных дефектов количественно меньше, чем плотность собственных дефектов в слоистых кристаллах.

При облучении прямые токи, величина которых определяется квазинейтральными областями ис-

следуемых структур, увеличиваются для флюенса  $1 \cdot 10^{13}$  электрон  $\cdot$  см $^{-2}$  и уменьшаются для максимального флюенса. Это указывает на изменение величины  $R_s$ , что обычно связывают с поведением проводимости материала при облучении [13]. В отличие от полупроводников с одним типом химической связи (Si, Ge), для слоистых полупроводников характерным является, кроме собственных дефектов решетки, наличие неконтролируемых примесей в межслоевом пространстве. Также при легировании кристаллов InSe и GaSe ионы примеси могут входить как в естественные слои (замещающая вакансия In, Ga или же занимая междоузлия), так и в межслоевое пространство (в качестве интеркалянтов) [14]. В данном случае при концентрациях легирования (0.1–0.3 вес%) значительное число ионов примеси входит в межслоевое пространство, что снижает степень пространственной неоднородности кристаллов. В то же время образование радиационных дефектов также предпочтительно в межслоевых промежутках [15], где дефекты могут взаимодействовать с внедренной примесью [15]. Это оказывает влияние на

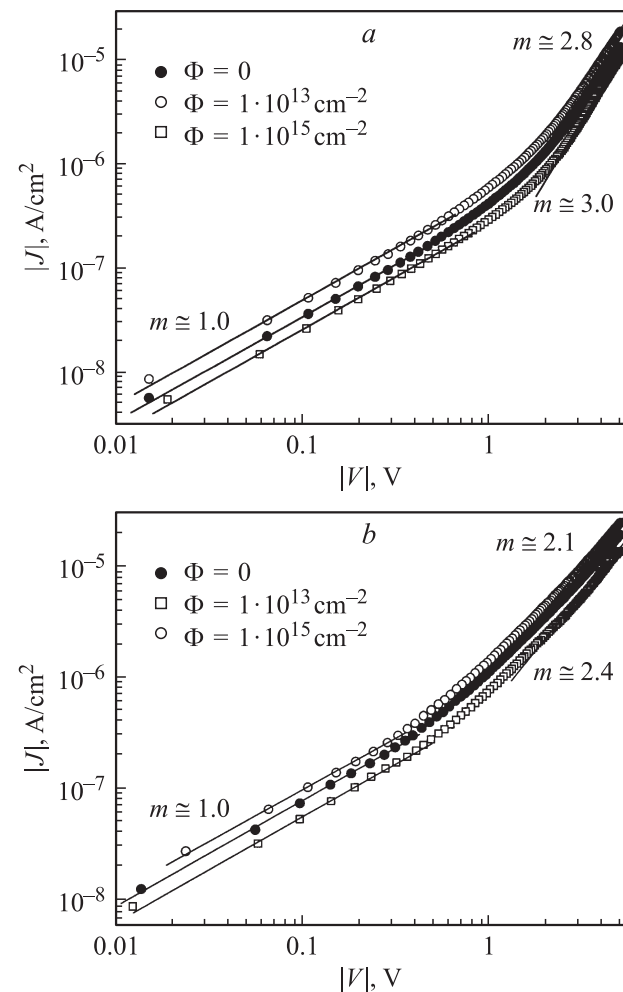


Рис. 2. Обратные ветви ВАХ гомоструктуры  $p$ -InSe(Cd)– $n$ -InSe(Ge) (а) и гетероструктуры  $p$ -GaSe(Dy)– $n$ -InSe(Ge) (б) в зависимости от дозы облучения.  $T = 293$  К.

движение носителей вдоль кристаллографической оси  $C$  и в результате изменяет величину  $\sigma \parallel C$ .

Как показано в [5,7], облучение селенида галлия электронами с энергией 6 или 25 МэВ и потоком  $10^{13}$  электрон  $\cdot$  см $^{-2}$  приводило к росту концентрации дырок и изменяло положение исходного акцепторного уровня на 0.13 эВ. Флюенсы  $10^{14}$ – $10^{16}$  электрон  $\cdot$  см $^{-2}$  уменьшали подвижность носителей тока и концентрацию акцепторов. Можно предположить, что аналогичные изменения будут характерны для InSe. Вышесказанное можно объяснить и динамику поведения с облучением фотоэлектрических параметров — напряжения холостого хода  $V_{oc}$  и тока короткого замыкания  $J_{sc}$  (см. таблицу).

Для обратных ветвей ВАХ (рис. 2) характерна степенная зависимость тока от напряжения  $J \propto V^m$ . Такое поведение ВАХ нейтральных областей свойственно токам, ограниченным пространственным зарядом [16], и наблюдалось для монокристаллов  $p$ -GaSe и  $p$ -InSe [17,18]. Для необлученных структур показатель степени  $m$  последовательно принимал значения от 1 до 3.

Незначительное отклонение экспериментальных точек в области смещений ( $|V| < 0.1$  В) от закона  $J \propto V^m$  обусловлено шунтирующими токами, причем влияние последних возрастает с облучением.

Также наблюдается общая тенденция незначительных изменений полевой зависимости обратных токов, связанная с изменением последовательного сопротивления подложки.

### 3.2. Фотоэлектрические характеристики

Спектральная зависимость квантовой эффективности фототока  $\eta$  гомоперехода  $p$ - $n$ -InSe охватывает интервал энергий фотонов 1.2–2.3 эВ с максимумом для необлученной структуры при  $\sim 1.5$  эВ (рис. 3). Наличие такого максимума является результатом конкурирующего действия объемной и поверхностной рекомбинации. Длинноволновая граница спектра характеризуется экспоненциальным возрастанием зависимости  $\eta = f(h\nu)$  и обусловлена поглощением света в InSe ( $E_{g\text{InSe}} \approx 1.23$  эВ при  $T = 300$  К). Этому возрастанию можно сопоставить крутизну  $S$  (см. таблицу), определяемую из соотношения

$$S = \Delta(\ln \eta) / \Delta h\nu. \quad (2)$$

Дальнейший рост фотоотклика для энергий  $h\nu > E_g$  связан с монотонным ростом коэффициента поглощения [19].

В области квантов света с энергией  $\sim 2.0$  эВ наблюдается нехарактерный спад fotocувствительности, вызванный относительно глубоким залеганием  $p$ - $n$ -перехода за счет значительной толщины фронтального полупроводника. Действительно, допуская спектральный рост коэффициента поглощения, область фотогенерации носителей заряда отдалается от  $p$ - $n$ -перехода в направлении поверхности, что приводит к уменьшению фототока.

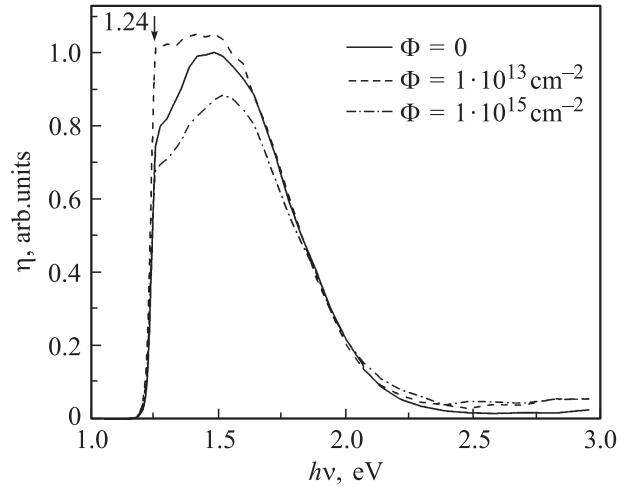
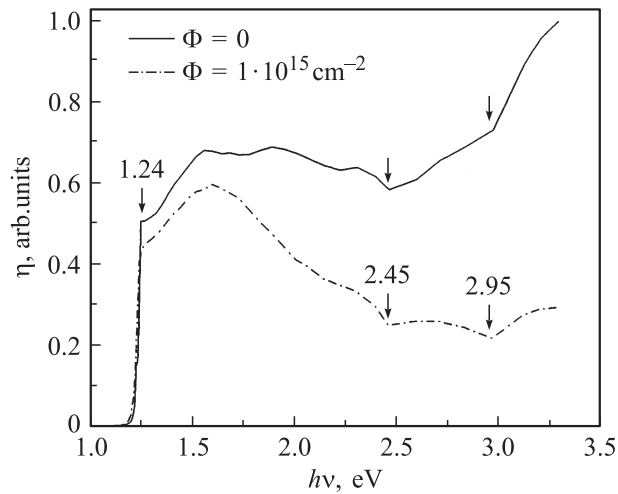


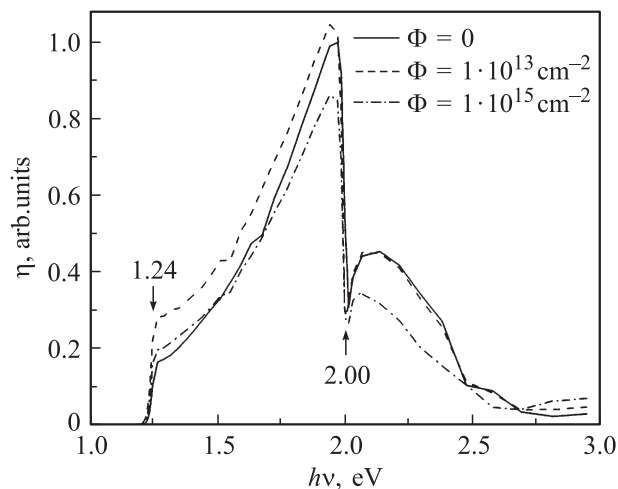
Рис. 3. Спектры относительной квантовой эффективности фотопреобразования гомоструктуры  $p$ -InSe(Cd)- $n$ -InSe(Ge) в зависимости от дозы облучения.  $T = 293$  К.

С ростом дозы электронного облучения наблюдается некоторое увеличение и последующее уменьшение квантовой эффективности в исследуемом спектральном диапазоне, что, по-видимому, обусловлено появлением вместе с излучательными также безызлучательных центров рекомбинации и увеличением роли безызлучательных переходов или процессов Оже для максимальных флюенсов. Известно [20], что высокоэнергетические электроны приводят в основном к возникновению неравновесных пар Френкеля, которые можно представить как пространственные распределения простых точечных дефектов. В кристаллах  $A^{III}B^{VI}$  простейшими дефектами могут быть вакансии атомов индия или галлия и атомы халькогена в междоузлиях, а сложными дефектами являются комплексы, в состав которых входят атомы селена и собственные дефекты решетки в виде нейтральных бивакансий  $V_{In}(V_{Ga})$  и  $V_{Se}$  [6]. Последние отвечают за безызлучательные центры рекомбинации, которые, накапливаясь с ростом облучения, перераспределяют на себя значительную долю рекомбинационного потока неравновесных носителей тока. Роль центров fotocувствительности в исследуемых полупроводниках играют вакансии халькогена. Таким образом, после флюенса  $1 \cdot 10^{13}$  электрон  $\cdot$  см $^{-2}$  увеличение токовой fotocувствительности  $\Delta S_I$  (для  $\lambda = 0.98$  мкм) составило 5%, последующее облучение максимальным флюенсом привело к падению  $\Delta S_I$  на 12% от исходного значения (см. таблицу). Наблюдается положительный рост вольтовой монохроматической чувствительности  $\Delta S_V$  (для  $\lambda = 0.98$  мкм). Вместе с тем динамика изменения крутизны длинноволнового края спектра с облучением (см. таблицу) указывает на отсутствие заметных нарушений границы оптического контакта.

Для более тонкого изучения процессов, которые могут происходить с облучением в коротковолновой области fotocувствительности гомоперехода  $p$ - $n$ -InSe, была ис-



**Рис. 4.** Спектры относительной квантовой эффективности фотопреобразования гомоструктуры  $p\text{-InSe(Cd)}-n\text{-InSe(Ge)}$  с толщиной фронтального слоя  $\sim 10$  мкм в зависимости от дозы облучения.  $T = 293$  К.



**Рис. 5.** Спектры относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероструктуры  $p\text{-GaSe(Dy)}-n\text{-InSe(Ge)}$  в зависимости от дозы облучения.  $T = 293$  К.

следована структура с оптимальной толщиной фронтального полупроводника. Ее значение, учитывая величину коэффициента поглощения света в InSe ( $\sim 10^3 \text{ см}^{-1}$ ), составляло  $\sim 10$  мкм. Форма спектра расширилась в коротковолновую область (рис. 4). Видно, что фототок структуры  $p\text{-InSe(Cd)}-n\text{-InSe(Ge)}$  в широкой области изменения частоты света не только не уменьшается, но и увеличивается, что обусловлено несущественным влиянием поверхностных состояний на разделение фотоносителей гомопереходом. После облучения максимальным флюенсом относительная квантовая эффективность фототока образца в высокоэнергетической области спектра снижается (рис. 4), что можно объяснить ростом скорости поверхностной рекомбинации носителей [19].

Интересным является проявление двух четких минимумов на кривой фотоотклика при энергиях фотонов 2.45 и 2.95 эВ для облученной структуры  $p\text{-}n\text{-InSe}$  (рис. 4). Наблюдаемая особенность на зависимости  $\eta(h\nu)$  может быть связана с существованием глубоких межзонных экситонных состояний [21]. Для них экситоны характеризуются большей энергией связи ( $E_{\text{ex}} \approx 100$  мэВ), чем краевые экситоны Ванье-Мотта (для InSe  $E_{\text{ex}} \approx 14.5$  мэВ). Экситоны, обладая высокой энергией связи, не могут диссоциировать на свободные электрон и дырку и не дают вклада в фототок. Совпадение энергетических положений минимумов для облученной структуры  $p\text{-}n\text{-InSe}$  с таковыми для необлученного селенида индия [22] косвенно свидетельствует о сохранении зонного спектра слоистого полупроводника.

Спектральное распределение квантовой эффективности фототока  $\eta$  гетероперехода  $p\text{-GaSe}-n\text{-InSe}$  представлено на рис. 5. Как видно, полоса fotocувствительности определяется поглощением света в соответствующих полупроводниках. Экспоненциальный ход длинноволнового края спектра структур с крутизной  $S = 57 \text{ эВ}^{-1}$  обусловлен поглощением в InSe. С коротковолновой стороны резкий рост величины фототока при  $h\nu < 2.0$  эВ связан с экситонным поглощением света в широкозонном полупроводнике GaSe. Форма спектра fotocувствительности определялась локализацией основной части объемного заряда в менее легированном материале — селениде галлия. В нем происходит наиболее эффективное разделение фотоносителей, что определяет значительную амплитуду зависимости  $\eta(h\nu)$  при  $\leq 2.0$  эВ. Следует отметить, что в гетеропереходе  $p\text{-GaSe}-n\text{-InSe}$  зафиксирована тонкая структура спектра: при энергии фотонов, соответствующей экситонному поглощению в GaSe, появляется минимум (показано стрелкой на рис. 5). Слева и справа расположены максимумы, причем правый максимум с облучением сдвигается в высокоэнергетическую область. Самообращение экситонной полосы наблюдалось также авторами работы [23] в спектрах фотоздс структуры  $\text{SnO}_2\text{-GaSe}$  и связывалось с наличием большого количества дефектов у поверхности монокристалла GaSe.

Для гетероперехода  $p\text{-GaSe}-n\text{-InSe}$  рост и последующее уменьшение токовой fotocувствительности  $\Delta S_I$  (при  $\lambda = 0.64$  мкм) составили 5 и 14% для флюенсов  $1 \cdot 10^{13}$  и  $1 \cdot 10^{15}$  электрон  $\cdot \text{см}^{-2}$  соответственно (см. таблицу).

Необходимо отметить интересную особенность поведения длинноволнового края квантовой эффективности фототока исследуемых структур  $p\text{-GaSe}-n\text{-InSe}$  и  $p\text{-}n\text{-InSe}$ . Для флюенса  $1 \cdot 10^{13}$  электрон  $\cdot \text{см}^{-2}$  на кривых фотоотклика в области энергий фотонов  $h\nu$ , меньших, чем энергия зона-зонных переходов в InSe ( $E \approx 1.24$  эВ), наблюдается значительный рост фототока, который формируется при участии экситонных переходов. Это может быть вызвано диссоциацией экситонов на радиационных дефектах, что приводит к повышению fotocувствительности структур. Увеличение интенсивности экситонного

поглощения в оптических спектрах InSe, легированного редкоземельными элементами Er [24] и Dy [25], связывалось с уменьшением структурных дефектов в этих кристаллах. В данном случае можно говорить о некотором росте степени упорядоченности упаковки слоев (собственных структурных дефектов) монокристаллов селенида индия и галлия, что находится в согласии с предположениями, выдвинутыми при анализе поведения ВАХ.

#### 4. Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Влияние высокоэнергетического ( $E = 12.5$  эВ) электронного облучения сводится к возникновению простых точечных дефектов, образование которых предпочтительно в межслоевых промежутках. При этом для минимального флюенса наблюдается только улучшение всех электрических и фотоэлектрических параметров исследуемых гомо- и гетероструктур, для максимального — незначительные снижение тока короткого замыкания и спад fotocувствительности. Оба типа структур продемонстрировали схожую динамику изменения основных параметров.

Можно заключить, что значительных изменений ВАХ и спектров фотоотклика не установлено из-за недостаточных величин энергий и флюенсов электронного излучения для существенного преобразования собственной дефектной структуры слоистых полупроводников. Полученные результаты позволяют рекомендовать слоистые структуры  $p-n$ -InSe и  $p$ -GaSe- $n$ -InSe для использования в качестве радиационно стойких фотопреобразователей.

#### Список литературы

- [1] Z.D. Kovalyuk, V.M. Katerynchuk, A.I. Savchuk, O.M. Sydor. Mater. Sci. Eng. B, **109**, 252 (2004).
- [2] В.Н. Катеринчук, М.З. Ковалюк. ФТП, **25** (5), 954 (1991).
- [3] В.Л. Бакуменко, З.Д. Ковалюк, Л.Н. Курбатов, В.Г. Тагаев, В.Ф. Чишко. ФТП, **14** (6), 1115 (1980).
- [4] А.П. Бахтинов, З.Д. Ковалюк, О.Н. Сидор, В.Н. Катеринчук, О.С. Литвин. ФТТ, **49** (8), 1497 (2007).
- [5] К.А. Аскеров. Fizika, **2** (2), 36 (1996).
- [6] Р.С. Малахов, А.З. Аббасова, Т.Б. Тагиев, Ш.П. Шекили. В сб.: *Международная конференция „FIZIKA-2005“* (Баку, ЕЛМ, 2005) с. 373.
- [7] Г.Б. Абдулаев, А.З. Аббасова, К.А. Аскеров, Ф.А. Зайтов, Э.Ю. Салаев, В.И. Стафеев. Неорг. матер., **19** (4), 679 (1983).
- [8] Г.Б. Абдулаев, А.З. Аббасова, А.В. Горшков, Ф.А. Зайтов, В.И. Стафеев, Э.Ю. Салаев, Г.М. Шаляпина. ФТП, **14** (4), 799 (1980).
- [9] Р.Ю. Алиев, Д.И. Караев, К.А. Аскеров. Fizika, **2** (3), 32 (1996).
- [10] В.Л. Бакуменко, В.Ф. Чишко. ФТП, **11** (10), 2000 (1977).
- [11] Г.Л. Беленький, Н.А. Абдуллаев, В.Н. Зверев, В.Я. Штейншрайбер. Письма ЖЭТФ, **47** (10), 498 (1988).
- [12] В.А. Манассон, А.И. Малик, В.Б. Баранюк. Письма ЖТФ, **7** (9), 549 (1981).
- [13] В.С. Вавилов, Н.А. Ухин. *Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах* (М., Атомиздат, 1969).
- [14] А.Ш. Абдинов, Р.Ф. Бабаева, Р.М. Рзаев, Г.А. Гасанов. Неорг. матер., **40** (6), 660 (2004).
- [15] З.Д. Ковалюк, П.Г. Литовченко, О.А. Политанская, О.Н. Сидор, В.Н. Катеринчук, В.Ф. Ластовецкий, О.П. Литовченко, В.К. Дубовой, Л.А. Поливцев. ФТП, **41** (5), 570 (2007).
- [16] Р. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [17] Б.Г. Тагиев, В.А. Гаджиев, С.Г. Абдуллаева, Г.М. Мамедов. Изв. АН АзССР. Сер. физ.-техн. и мат. наук, **3**, 58 (1973).
- [18] А.Ш. Абдинов, А.Г. Кязым-заде, Н.М. Мехтиев, М.Д. Хомутова, А.Г. Шарипов. ФТП, **10** (1), 76 (1976).
- [19] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 2.
- [20] В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. *Действие излучений на полупроводники* (М., Наука, 1988).
- [21] O.Z. Alekperov, M.O. Godjaev, M.Z. Zarbaliev, R.A. Suleimov. Sol. St. Commun., **77**, 65 (1991).
- [22] O.Z. Alekperov, A.I. Nadjafov. Fizika, **10** (1, 2), 77 (2004).
- [23] А.И. Малик, В.Б. Баранюк. ФТП, **14** (3), 409 (1980).
- [24] B. Abay, H.S. Güder, H. Efcoglu, Y.K. Yogurtçu. J. Phys. D: Appl. Phys., **32** (22), 2942 (1999).
- [25] B. Gürbulak. Sol. St. Commun., **109**, 665 (1999).

Редактор Л.В. Беляков

### Electrical and photoelectric characteristics of structures based on InSe and GaSe layered semiconductors irradiated with 12.5 MeV electrons

Z.D. Kovalyuk, O.A. Politanska, O.N. Sydor, V.T. Maslyuk\*

Institute for Problems of Materials Science,  
Chernivtsi Department,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
58001 Chernivtsi, Ukraine  
\* Institute of Electron Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
88017 Uzhgorod, Ukraine

**Abstract** Influence of high-energy electrons ( $E = 12.5$  MeV) on the electrical and photoelectrical parameters of  $p-n$ -InSe and  $p$ -GaSe- $n$ -InSe layers photoconverters is investigated. There found out the changes of current-voltage characteristics, photo-response spectra, open-circuit voltage and short-circuit current of the structures are caused by the formation of point defects. The absence of essential changes of the characteristics of the homo- and heterojunctions under investigation even at the maximum dose of irradiation allows to recommend them for creation of radiation-resistant photodetectors.