

УДК 621.315.292; 621.382.232

К. ф.-м. н. О. Н. СИДОР, к. т. н. О. А. СИДОР, д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК,
д. ф.-м. н. В. И. ДУБИНКО¹

Украина, Черновицкое отделение ИПМ им. И. Н. Францевича НАНУ;

¹ИНЦ «Харьковский физико-технический институт» НАНУ

E-mail: chimsp@ukrpost.ua

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДИОДОВ СО СТРУКТУРОЙ «СОБСТВЕННЫЙ ОКСИД – InSe», ОБЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Исследовано влияние электронов с эффективной энергией 12 МэВ в диапазоне доз 0,33–33 Мрад на электрические и фотоэлектрические свойства фотодиодов со структурой «собственный оксид – p-InSe». Установлено, что минимальная доза облучения улучшает их основные параметры, а максимальная незначительно снижает ток короткого замыкания и fotocувствительность приборов. При этом наблюдается рост вольт-ваттной чувствительности и минимальное увеличение коэффициента неидеальности вольт-амперной характеристики.

Ключевые слова: слоистые кристаллы, селенид индия, фотодиод, высокоэнергетические электроны, радиационные дефекты.

Одними из перспективных материалов для создания полупроводниковых приборов, пригодных для фотоэлектроники, являются анизотропные кристаллы группы A^3B^6 . Слабая ван-дер-ваальсова связь между их слоями позволяет легко получать подложки с атомарно-гладкой поверхностью, что в сочетании с простой технологией термического окисления дает возможность создавать поверхностно-барьерные диоды с высокими удельными характеристиками [1, 2]. Не менее важным является наличие в слоистых кристаллах большой плотности собственных дефектов (до 10^{18} см^{-3}), что служит отправным свойством для их использования в условиях высокодозовых радиационных нагрузок. Однако число работ, посвященных поведению приборов на основе полупроводников группы A^3B^6 (в большинстве случаев — барьеров Шоттки) под действием высокоэнергетического излучения, крайне ограничено. Соответственно, по-прежнему актуальным является изучение влияния различных видов проникающей радиации в широком диапазоне доз на их электрические и фотоэлектрические характеристики. В настоящей работе эти вопросы рассматриваются на примере полупроводниковой структуры «собственный оксид – p-InSe».

Методика эксперимента

Монокристаллы селенида индия (γ -политип) выращивали вертикальным методом Бриджмена из предварительно синтезированных слитков. В качестве легирующего элемента для получения дырочной проводимости использовали кадмий. Его введение в количестве 0,2% от массы приводило к росту концентрации нескомпенсирован-

ных акцепторов (примерно до 10^{13} см^{-3}) и подвижности дырок (около $80 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 300 К). Для изготовления фотодиодов (ФД) использовали пластинки селенида индия толщиной 0,3–0,4 мм. Их подвергали термической обработке на воздухе при температуре 700 К. В результате на поверхности пластин образовывались однородно окрашенные слои собственного оксида. В качестве омических контактов использовали чистый индий.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФД определяли на установке «Schlumberger SI 1255» с компьютерным интерфейсом. Минимальная разрешающая способность по напряжению и по току составляла, соответственно, 100 мкВ и 100 пА с допускаемыми погрешностями измерения $\pm 0,2\%$.

Спектры fotocувствительности ФД получали с помощью монохроматора МДР-23. Спектральное распределение фотоотклика определяли отношением фототока к числу падающих фотонов. Измерение сигнала с ФД проводили на микровольтнаноамперметре Ф-136 в режиме постоянного тока со значением основной погрешности 1,5%. Развертку спектра осуществляли с шагом, не превышающим 200 нм.

Фотоэлектрические параметры исследовали на приборе В7-21А с допускаемыми значениями погрешностей измерения напряжения постоянного тока и силы постоянного тока $\pm 0,22$ и $\pm 0,46\%$ соответственно.

Все измерения проводились при комнатной температуре.

Облучение полупроводниковых образцов проводили на линейном ускорителе КУТ-10 с энергией электронов 12 МэВ. Время облучения выбиралось таким, чтобы флюенсы составили

$10^{13} - 10^{15}$ электрон/см², что соответствовало дозам 0,33–33 Мрад.

Результаты и их обсуждение

Фотодиоды на основе полупроводниковой структуры «собственный оксид – *p*-InSe» облучали разными дозами электронов. Прямые ветви полученных ВАХ ФД на **рис. 1** показывают, что структуры обладают четко выраженными диодными свойствами. Об этом свидетельствуют значения коэффициента выпрямления $K_{\text{вып}}$ из **таблицы**. Ток J на начальных участках ВАХ при малых прямых смещениях U (до 0,3 В) растет по известному экспоненциальному закону [3, с. 100]

$$J = J_{\text{нас}} \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где $J_{\text{нас}}$ – плотность тока насыщения;
 q – элементарный заряд;
 n – коэффициент неидеальности ВАХ;
 k – постоянная Больцмана;
 T – температура,

а затем (при $U > 0,3$ В) начинает отклоняться от него. Основной причиной, ограничивающей ток в исследуемых ФД, является низкая электропроводность $\sigma_{\perp}$ в направлении, перпендикулярном слоям (вдоль кристаллографической оси *C*).

Для необлученных ФД коэффициент неидеальности ВАХ, определенный по наклону графика зависимости $\ln J = f(U)$, принимал значение $n=1,4$, что указывает на одновременное существование конкурирующих механизмов токопрохождения. Кроме диффузионной составляющей тока, для которой $n=1$, в данных диодах имеет место рекомбинационная составляющая, для которой $n=2$. В пользу этого свидетельствуют зна-

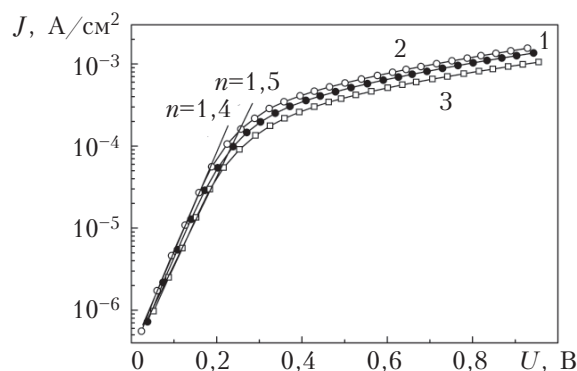


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ исследуемого ФД до (1) и после электронного облучения дозами 0,33 Мрад (2) и 33 Мрад (3)

чительный диффузионный потенциал ($\approx 0,7$ В), низкая концентрация и подвижность носителей заряда в селениде индия дырочного типа, а также малая диффузионная длина неосновных носителей поперек слоев в направлении *p*–*n*-перехода [4]. При этом не исключается, что при $n > 1$ на его значение могут оказывать влияние неконтролируемые шунтирующие токи [5]. В результате электронного облучения наблюдается несущественное изменение параметра n механизмов токопереноса через потенциальный барьер и, как следствие, доза 0,33 Мрад не влияет на коэффициент неидеальности ВАХ ($n=1,4$), рост (до $n=1,5$) происходит при дозе в 100 раз большей (рис. 1). Последнее свидетельствует об увеличении рекомбинационной компоненты тока, протекающего через *p*–*n*-переход. Причиной является возникновение дефектов под действием высокоэнергетического излучения, которые увеличивают концентрацию рекомбинационных цент-

Параметры InSe-фотодиодов до и после электронного облучения

Параметры фотодиодов	Доза облучения, Мрад		
	0	0,33	33
Коэффициент выпрямления $K_{\text{вып}}$ (при $ U = 1$ В)	235 ± 5	270 ± 5	225 ± 5
Коэффициент неидеальности ВАХ n	$1,4 \pm 0,05$	$1,4 \pm 0,05$	$1,5 \pm 0,05$
Напряжение холостого хода $U_{\text{хх}}$, мВ	550 ± 5	560 ± 5	570 ± 5
Ток короткого замыкания $J_{\text{кз}}$, мА/см ²	$3,9 \pm 0,1$	$4,2 \pm 0,1$	$3,7 \pm 0,1$
Последовательное сопротивление $R_{\text{п}}$, Ом·см ²	300 ± 5	275 ± 5	325 ± 5
Токовая фоточувствительность S_I ($\lambda=0,98$ мкм), мА/Вт	88 ± 1	98 ± 1	82 ± 1
Вольтовая фоточувствительность S_U ($\lambda=0,98$ мкм), кВ/Вт	11 ± 1	13 ± 1	16 ± 1
Крутизна длинноволновой границы спектра фотоотклика S , эВ ^{–1}	51 ± 1	67 ± 1	60 ± 1
Ширина спектра фотоотклика на полувысоте $\delta_{1/2}$, эВ	$0,602 \pm 0,001$	$0,901 \pm 0,001$	$1,005 \pm 0,001$
Длина волны, соответствующая основному максимуму фотоотклика, $\lambda_{\text{мах}}$, мкм	$0,66 \pm 0,01$		

ров в области пространственного заряда [6]. Для исследуемых структур незначительный рост n при максимальной дозе облучения доказывает, что количество радиационных дефектов не превышает количества собственных дефектов в слоистом кристалле. При облучении прямые токи, величина которых определяется квазинейтральными областями исследуемых структур, увеличиваются при меньшей дозе и уменьшаются при максимальной. Это указывает на изменение последовательного сопротивления ФД R_{Π} (см. таблицу), что обычно связывают с изменением проводимости материала при облучении [6]. В отличие от полупроводников с одним типом химической связи (Si, Ge и т. п.), для слоистых кристаллов характерным является, если не считать собственных дефектов решетки, наличие неконтролируемых примесей в межслоевом пространстве. К тому же, при легировании InSe ионы примеси могут входить и в слои (замещая вакансии In или занимая междоузлия), и в межслоевое пространство [7, 8]. При выбранной для эксперимента концентрации легирующей добавки значительное число ионов кадмия входит в межслоевое пространство, что снижает степень пространственной неоднородности кристаллов. В то же время, образование радиационных дефектов также происходит преимущественно в межслоевых промежутках [9], где дефекты могут взаимодействовать с внедренной примесью. В результате оба вышеупомянутых процесса оказывают влияние на движение носителей вдоль кристаллографической оси C и, как следствие, изменяют величину электропроводности $\sigma_{\parallel C}$.

На границах спектральной зависимости фотоотклика ФД основные изменения заметны в коротковолновой области (рис. 2). В сравнении с необлученными образцами, квантовая эффективность фототока η в этой области после облучения возрастает, соответственно возрастает и полная ширина спектра фотоотклика на полувысоте $\delta_{1/2}$: с 0,6 до 1,0 эВ (см. таблицу). При этом значение $\lambda_{\max}$, соответствующее основному максимуму η , не смещается. Появление нового пика интенсивности при энергии $h\nu \approx 2,48$ эВ, которая растет с ростом дозы, может быть связано с глубокими межзонными состояниями экситонов [10]. Только в этом случае вклад экситонов в фототок уже положителен, и происходит это вследствие их ионизации сильным электрическим полем. Последнее может возникать на локальных микрон неоднородностях гетероинтерфейса, вызванных действием высокоэнергетических электронов. Случай с максимумами на спектральных характеристиках диодов с барьером Шоттки на основе Au — n -InSe, связанных с существованием глубоких межзонных состояний экситонов, наблюдался также авторами [11].

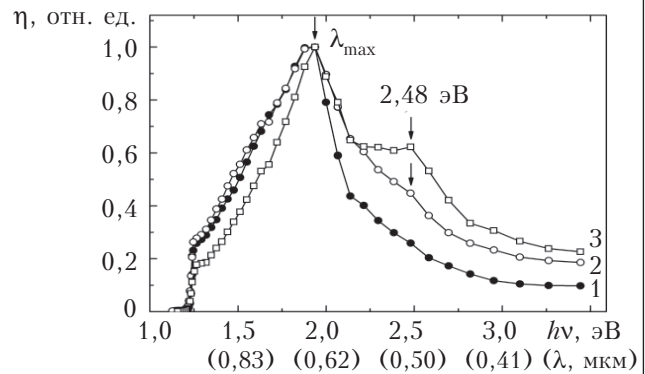


Рис. 2. Спектры фотоотклика исследуемого ФД до (1) и после электронного облучения дозами 0,33 Мрад (2) и 33 Мрад (3)

Экспоненциальная форма длинноволновой границы спектра фотоотклика позволяет ввести параметр S , который определяет ее крутизну:

$$S = \frac{d \ln \eta}{d(h\nu)}. \quad (2)$$

Параметр S для ФД со структурой «собственный оксид — p -InSe» составляет порядка 50 эВ^{-1} , что характерно для прямых межзонных переходов в InSe [12]. Он весьма чувствителен к нарушениям кристаллической решетки различного рода, что было важно в данном исследовании. При облучении малыми дозами электронов параметр S увеличился, а максимальная доза привела к его уменьшению, хотя и не до начального значения (см. таблицу). Это коррелирует с изменениями электрических характеристик, описанными выше. Подобное поведение параметра S отражает общее структурное совершенство слоистого кристалла. Другими словами, рост данного параметра ФД связан с избавлением от мелкокомасштабных нарушений кристаллической структуры, а падение — с внесением искажений в структуру за счет радиационных дефектов. Аналогичное поведение длинноволнового участка спектральной характеристики авторы наблюдали ранее в структурах на базе селенида индия при гамма-облучении [13]. Наконец, увеличение интенсивности поглощения экситона в оптических спектрах InSe интерпретировалось в [14, 15] как «залечивание» собственных структурных дефектов кристаллов.

С ростом дозы электронного облучения наблюдается некоторое увеличение и последующее уменьшение фотоотклика в спектральном диапазоне 1,2 — 2,0 эВ (рис. 2), что, вероятно, обусловлено появлением вместе с излучательными также безызлучательных центров рекомбинации. Известно [16], что высокоэнергетические электроны приводят в основном к возникновению неравновесных пар Френкеля, которые можно представить как пространственное распределение простых точечных дефектов. Такими в кри-

сталлах InSe могут быть вакансии атомов индия и атомы халькогена в междоузлиях. Точечные дефекты могут объединяться в бивакансионные комплексы $V_{In} + V_{Se}$. Они отвечают за безызлучательные центры рекомбинации [17], которые, накапливаясь с ростом облучения, перераспределяют на себя значительную долю рекомбинационного потока неравновесных носителей тока.

В целом следует отметить, что изучение фотоотклика (и крутизны его экспоненциального края — в частности) может служить чувствительным методом исследования влияния радиации на полупроводниковые структуры в дополнение к вольт-амперным характеристикам.

Для ФД со структурой «собственный оксид — p -InSe» после облучения дозой 0,33 Мрад наблюдалось увеличение токовой фоточувствительности S_I и монохроматической вольтовой чувствительности S_U на 11 и 20% соответственно. Последующее облучение приводило к падению величины S_I на 7% от исходного значения при росте S_U на 45%. Аналогичную динамику демонстрировали еще два параметра — ток короткого замыкания $J_{кз}$ и напряжение холостого хода $U_{хх}$.

Таким образом, отсутствие значительных изменений ВАХ и спектров фотоотклика облученных электронами ФД доказывает, что количество внесенных радиационных дефектов меньше, чем количество собственных дефектов слоистого кристалла.

Выводы

Проведенные исследования показали, что влияние высокоэнергетического (12 МэВ) электронного облучения на ФД со структурой «собственный оксид — p -InSe» сводится к возникновению в слоистом полупроводнике точечных дефектов, которые, накапливаясь с ростом дозы, могут создавать бивакансионные комплексы «металл — халькоген». Это приводит к увеличению рекомбинационной составляющей тока и к некоторому уменьшению фотоотклика в исследуемом спектральном диапазоне. При облучении дозой 0,33 Мрад происходит только улучшение всех электрических и фотоэлектрических параметров исследуемого ФД при неизменном коэффициенте неидеальности ВАХ. Даже при максимальной дозе (33 Мрад) наблюдается рост напряжения холостого хода и монохроматической вольтовой чувствительности, а также минимальное увеличение коэффициента неидеальности ВАХ. Рост последовательного сопротивления сказывается на снижении тока короткого замыкания. Можно утверждать, что значительных изменений ВАХ и спектров фотоотклика не установлено из-за того, что энергия и дозы электронного облучения оказались недостаточными для существенного преобразования собственной дефектной структуры слоистого полупроводника.

Полученные результаты показывают высокую стойкость ФД на основе структуры «собственный оксид — p -InSe» к электронному излучению и перспективность эксплуатации в условиях значительного радиационного фона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kovalyuk Z. D., Katerynychuk V. M., Savchuk A. I., Sydor O. M. Intrinsic conductive oxide- p -InSe solar cells // Materials Science and Engineering B. — 2004. — Vol. 109. — P. 252—255.
2. Ковалюк З. Д., Сидор О. Н. Получение структуры «собственный оксид- p -InSe» с улучшенными фотоэлектрическими параметрами // Альтернативная энергетика и экология. — 2006. — 10. — С. 23—25. [Kovalyuk Z. D., Sidor O. N. // Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2006. 10. P. 23]
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн.1. — Москва: Мир, 1984. [Zi S. Fizika poluprovodnikovyykh priborov. Kn.1. Moskva: Mir, 1984]
4. Shigetomi S., Ikari T., Koga Y., Shigetomi S. Drift mobility of electrons parallel to the c -axis in InSe // Phys. St. Sol. (a). — 1985. — Vol. 88, N 1. — P. K71—K73.
5. Манассон В. А., Малик А. И., Баранюк В. Б. Эффективный солнечный элемент для работы при низких уровнях освещенности // Письма в ЖТФ. — 1981. — Т. 7, 9. — С. 549—552. [Manasson V. A., Malik A. I., Baranyuk V. B. // Pis'ma v ZhTF. 1981. Vol. 7, 9. P. 549]
6. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. — Москва: Атомиздат, 1969. [Vavilov V. S., Ukhin N. A. Radiatsionnye efekty v poluprovodnikakh i poluprovodnikovyykh priborakh. Moskva: Atomizdat, 1969]
7. Нуруллаев Ю. Г. К вопросу о дефектообразовании в кристаллах InSe, GaSe и $Cd_{1-x}Hg_xTe$ // Fizika. — 1999. — Vol. 5, N 1. — P. 6—8. [Nurullaev Yu. G. // Fizika. 1999. Vol. 5, N 1. P. 6]
8. Abidinov A. Sh., Babaeva R. F., Rzaev R. M., Gasanov G. A. Photoluminescence of rare-earth-doped InSe and GaSe single crystals // Inorganic Materials. — 2004. — Vol. 40, N 6. — P. 567—569.
9. Аскеров К. А. Дефектообразование в селениде галлия при воздействии проникающей радиации // Fizika. — 1996. — Vol.2, N 2. — P. 36—39. [Askerov K. A. // Fizika. 1996. Vol.2, N 2. P. 36]
10. Alekperov O. Z., Godjaev M. O., Zarbaliev M. Z., Suleymanov R. A. Interband photoconductivity in layer semiconductors GaSe, InSe and GaS // Solid State Commun. — 1991. — Vol. 77, N 1. — P. 65—67.
11. Alekperov O. Z., Guseinov N. M., Nadjafov A. I. Intermediate type excitons in Schottky barriers of A^3B^6 layer semiconductors and UV photodetectors // Phys. stat. sol. (C). — 2006. — Vol. 3, N 8. — P. 2669—2672.
12. Camassel J., Merle P., Mathie H., Chevy A. Excitonic absorption edge of indium selenide // Phys. Rev. B. — 1978. — Vol. 17, N 12. — P. 4718—4725.
13. Kovalyuk Z. D., Politanska O. A., Tkachenko V. G. et al. Radiation resistance of photodiodes based on indium monoselenides under g -irradiation // Journal of Nuclear Materials. — 2009. — Vol. 385. — P. 489—494.
14. Abay B., Guder H.S., Efeoglu H., Yogurtcu Y.K. Excitonic absorption and Urbach-Martienssen's tails in Er-doped and undoped n -type InSe // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1999. — Vol. 32, N 22. — P. 2942—2948.

15. Gurbulak B. Growth and optical properties of Dy doped and undoped *n*-type InSe single crystal // Sol. State Commun. — 1999. — Vol. 109, N 10. — P. 665—669.

16. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. — Москва: Наука, 1988. [Vavilov V. S., Kekelidze N. P., Smirnov L. S. Deistvie izluchanii na poluprovodniki. Moskva: Nauka, 1988]

17. Мадатов Р. С., Аббасова А. З., Тагиев Т. Б., Шекили Ш. П. Влияние электронного облучения на фотоэлектрические свойства в слоистых полупроводниках АВ^{VI} / Тр. Междунар. конф. "Fizika-2005". — Азербайджан, г. Баку. — 2005. — С. 373—375. [Madatov R. S., Abbasova A. Z., Tagiev T. B., Shekili Sh. P. / Tr. Mezhd. konf. "Fizika-2005". Azerbaidzhan, Baku. 2005. P. 373]

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.06 2012 г.

Sydor O. N., Sydor O. A., Kovalyuk Z. D., Dubinko V. I. **Characteristics of photodiodes with «intrinsic oxide — InSe» structure, irradiated with high-energy electrons.**

Keywords: layered crystals, indium selenide, photodiode, high-energy electrons, radiation defects.

The article describes the research of the influence of electrons with an effective energy of 12 MeV in the 0,33—33 Mrad dose range on the electrical and photovoltaic properties of photodiodes with «intrinsic oxide — *p*-InSe» structure. It has been found that the minimum dose improves their basic parameters, while

the maximum dose significantly reduces the short circuit current and devices photosensitivity. In this case, an increase in volt-watt sensitivity and a minimal increase in coupling coefficient of the I-V characteristic are observed.

Ukraine, Chernivtsi Department of Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NASU; Kharkov Institute of Physics and Technology of NASU.

Сидор О. Н., Сидор О. А., Ковалюк З. Д., Дубінко В. І. **Характеристики фотодіодів зі структурою «власний оксид — InSe», опромінених високоенергетичними електронами.**

Ключові слова: шаруваті кристали, селенід індію, фотодіод, високоенергетичні електрони, радіаційні дефекти.

Досліджено вплив електронів з ефективною енергією 12 МеВ в діапазоні доз 0,33—33 Мрад на електричні та фотоелектричні властивості фотодіодів зі структурою «власний оксид — *p*-InSe». Встановлено, що мінімальна доза опромінення покращує їх основні параметри, а максимальна — незначно знижує струм короткого замикання і фоточутливість приладів. При цьому спостерігається зростання вольт-ватної чутливості і мінімальне збільшення коефіцієнта неідеальності вольт-амперної характеристики.

Україна, Чернівецьке відділення ІПМ ім. І. М. Францевича НАНУ; ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАНУ.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ащеулов А. А., Романюк И. С. Анизотропные оптикотермоэлементы на основе антимонида кадмия и их применение.— Черновцы: Золотые литавры, 2012.— 228 с.

В книге представлены результаты исследования термоэлектрических явлений в оптических прозрачных анизотропных средах, поперечная составляющая термо-эдс которых стала основой для появления ряда оригинальных термоэлементов. Это позволило предложить новый метод регистрации лучистых потоков — метод «прозрачной стенки», который обусловил появление соответствующих технологий и материалов на основе антимонида кадмия и позволил реализовать новое поколение различных приборов и устройств.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников в области термоэлектрического приборостроения, а также будет полезна аспирантам и студентам соответствующих специальностей.

