

Характеристики гетеропереходов окисел–*p*-InSe в условиях рентгеновского облучения

© З.Д. Ковалюк[†], В.Н. Катеринчук, О.А. Политанская, Н.Д. Раранский*

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

* Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича, 58012 Черновцы, Украина

(Получена 19 июля 2005 г. Принята к печати 14 сентября 2005 г.)

Установлено влияние характеристического рентгеновского излучения (длина волны $\lambda = 0.056$ нм) на фотоэлектрические параметры гетеропереходов (собственный термический окисел)–*p*-InSe. Исследованы вольт-амперные и спектральные характеристики структур до и после облучения. Обнаруженные изменения напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, вольт-амперных характеристик и спектров fotocувствительности гетеропереходов обусловлены образованием радиационных дефектов в InSe. Они приводят к увеличению рекомбинационных процессов в механизмах токопереноса, незначительно изменяют скорость поверхностной рекомбинации и не оказывают деструктивного влияния на величину контактной разности потенциалов. Полученные результаты объясняются в рамках электростатической модели образования радиационных дефектов в кристаллической решетке.

PACS: 73.40Lq, 73.50Pz, 61.80Cb

1. Введение

Работа полупроводниковых оптоэлектронных устройств может происходить в условиях действия разного вида высокоэнергетических излучений. При этом электрофизические характеристики базовых кристаллов этих устройств могут сохраняться или изменяться в зависимости от длительности, интенсивности и энергии излучения. Установление закономерностей изменений параметров этих устройств может быть использовано для коррекции их работы.

Si, Ge, GaAs и структуры на основе этих материалов часто являются объектами исследований в вопросе радиационной стойкости. Однако существует целый класс слоистых полупроводников группы A^{III}B^{VI} с шириной запрещенной зоны (E_g), близкой к таковой в названных классических полупроводниках. Например, соединение InSe ($E_g = 1.2$ эВ при 300 К) может быть аналогом кремния и альтернативой ему с точки зрения радиационной стойкости.

Анизотропия химических связей играет фундаментальную роль в физических свойствах слоистых кристаллов и отличает их от других твердых тел [1]. Кристаллическая структура моноселенида индия представляет собой последовательность слоев, каждый из которых состоит из четырех плотно упакованных одноатомных субслоев, расположенных в последовательности Se–In–In–Se [2]. Характерным также является наличие сильной ковалентной связи внутри слоя и слабых вандер-ваальсовых связей между слоями. Такое строение предопределяет существование целого ряда модификаций, которые незначительно различаются между собой энергией образования. Возможность упаковки слоев разными способами вдоль кристаллографической оси *C*

приводит к разным политипам структуры InSe [1,3]. В структуре также могут быть нарушения в последовательности слоев — некоторые из них наряду с гексагональной упаковкой укладываются по закону кубической упаковки [4]. Вследствие этого плотность собственных дефектов велика, и представляется полезным оценить, как проявляются на их фоне радиационные дефекты, т. е. как изменяются физические свойства кристалла под действием радиации.

Отметим, что исследования радиационной стойкости InSe и фотодиодов на его основе по отношению к нейтронному, протонному и γ -воздействию показывают, что они не только не теряют, но даже увеличивают свою fotocувствительность [5–7]. Это означает, что структура потенциального барьера фотодиодов не разрушается и они могут работать в условиях проникающей радиации.

Механизмы токопрохождения в гетеропереходах (ГП) окисел–InSe в зависимости от режимов формирования собственного окисла и кристаллографической ориентации плоскости перехода исследовались нами в [8,9].

Цель настоящей работы состояла в исследовании изменения параметров ГП окисел–*p*-InSe под влиянием рентгеновского облучения.

2. Эксперимент

Кристаллы InSe выращивались методом Бриджмена из нестехиометрического состава компонент (In_{1.03}Se_{0.97}) [10]. Специально не легированные кристаллы имели проводимость *n*-типа при концентрации нескомпенсированных доноров $10^{14}–10^{15}$ см^{–3}. Для изменения типа проводимости кристаллов использовался кадмий. Его содержание в количестве 0.1% по массе приводит к концентрации нескомпенсированных акцепторов 10^{14} см^{–3}. Однородность и электрические параметры

[†] E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

монокристаллов определялись исследованием кинетических коэффициентов в разных частях слитка. Концентрация и подвижность носителей заряда составляли при комнатной температуре $2.0 \cdot 10^{14}$ – $3.0 \cdot 10^{15}$ см⁻³ и 35–50 см²/В·с соответственно. Пластины толщиной 300 мкм скальвались из слитка вдоль плоскости (001). При этом никакой дополнительной обработки поверхности при формировании ГП не требовалось.

Гетеропереходы формировались методом термического окисления подложек InSe:Cd со средними размерами $4 \times 4 \times 0.3$ мм на воздухе при температуре окисления 450°C и 96-часовой выдержке [11]. При таких режимах окисления толщина пленки окисла, измеренная с помощью эллипсометра ЛЭФ-3М-1, составляла ~ 0.5 мкм. Поверхностное сопротивление пленок было ~ 300 Ом/□, концентрация электронов 10^{20} см⁻³. Указанные режимы окисления обеспечивали получение гетеропереходов с наилучшими фотоэлектрическими параметрами [11].

В процессе окисления на поверхности подложки образуется пленка окисла, а система окисел–полупроводник обретает диодные свойства. От температурно-временных условий окисления зависит фазовый состав пленки окисла, что сказывается на величине потенциального барьера структуры и параметрах fotocувствительности [8]. Зонная диаграмма гетероперехода представляет собой контакт вырожденного (пленка окисла) и невырожденного (InSe) полупроводников с областью пространственного заряда в InSe. Величина диффузионного потенциала гетеропереходов определялась из вольт-фарадных характеристик $C(V)$ аналогично [11] и составляла 0.4–0.5 эВ. Линейность вольт-фарадной характеристики в координатах C^{-2} от V свидетельствует о резком изменении типа проводимости на *p*–*n*-переходе и указывает на несущественную роль промежуточного переходного слоя от окисла к полупроводнику.

После окисления образец повторно скальвался, чтобы осталась пленка окисла только с одной стороны. Все другие грани обрезались. Для омических контактов использовался чистый индий.

Равномерное рентгеновское облучение ГП окисел–*p*-InSe проводилось на установке типа АРОН-2 при комнатной температуре. Излучателем служила рентгеновская трубка с серебряным катодом в режиме потребляемой мощности 300 Вт. Длина волны характеристического излучения составляла $\lambda = 0.056$ нм, энергия кванта 22 кэВ. Для каждого образца общее время экспонирования t_e составляло 160 ч, доза последовательно накапливалась с шагом 40 ч.

Спектры fotocувствительности изготовленных ГП исследовались при комнатной температуре с помощью монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2.6 нм/мм. Все спектры нормировались относительно количества падающих фотонов.

Для определения механизмов токопрохождения через барьер исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ) ГП на установке „Schlumberger SI.1255“. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Влияние рентгеновского облучения на кристаллы InSe:Cd также исследовалось методом двухкристального рентгеновского спектрометра (ДКС) — одним из наиболее универсальных неразрушающих методов, точность которого по относительному изменению параметра кристаллической решетки может достигать $\Delta a/a \sim 10^{-6}$ [12].

3. Результаты и обсуждение

Вольт-амперные характеристики ГП окисел–*p*-InSe имели ярко выраженный диодный характер как до, так и после облучения. С ростом дозы облучения крутизна прямых ветвей ВАХ увеличивалась. Данный факт свидетельствует об изменении параметров ГП. Для установления причин таких изменений исследовался механизм прохождения тока через барьер.

На рис. 1, *a* представлены прямые ветви ВАХ $J(V)$ в полулогарифмических координатах. На начальном участке при малых прямых смещениях ток растет согласно

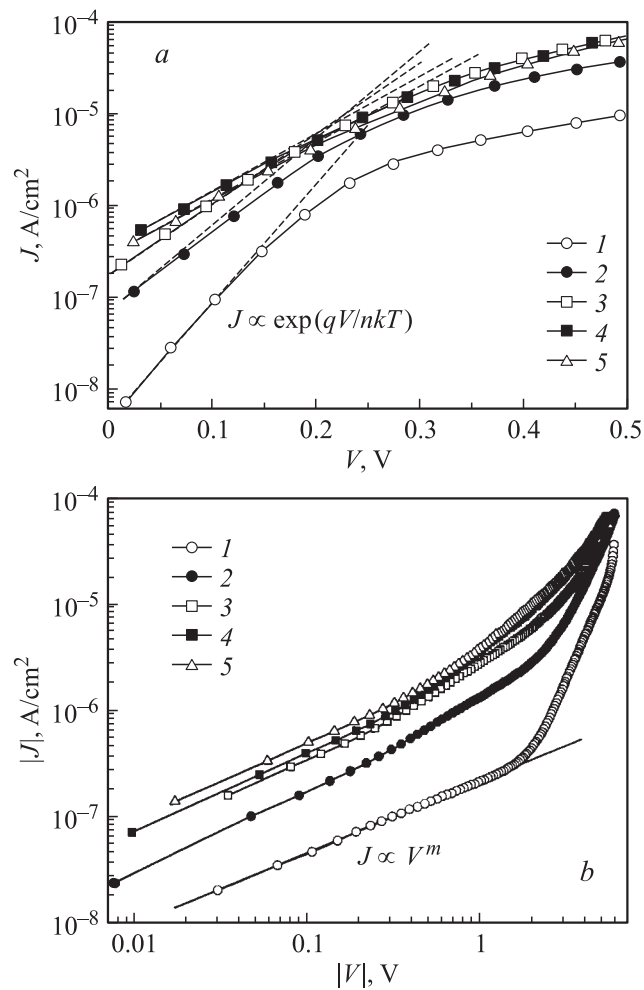


Рис. 1. Прямые (*a*) и обратные (*b*) ветви ВАХ гетероперехода окисел–*p*-InSe до (1) и после рентгеновского облучения при экспозиции 40 (2), 80 (3), 120 (4), 160 ч (5). Штриховые прямые — ВАХ с учетом последовательного сопротивления.

Влияние рентгеновского облучения на фотоэлектрические параметры ГП окисел–*p*-InSe

№ образца	Время экспозиции, ч	V_{oc} , В	J_{sc} , мА/см ²	n
1	0	0.43	5.0	1.3
	40	0.57	3.3	1.8
	80	0.58	3.0	2.2
	120	0.6	3.4	2.6
	160	0.6	3.2	2.8
2	0	0.48	7.2	1.3
	40	0.55	5.5	1.5
	80	0.58	4.5	1.8
	120	0.6	4.6	2.3
	160	0.6	4.4	2.6
3	0	0.45	5.0	1.3
	40	0.55	3.6	1.4
	80	0.57	3.2	1.6
	120	0.59	3.2	1.7
	160	0.59	3.1	1.7

известному экспоненциальному закону

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

где q — заряд электрона, T — температура, k — постоянная Больцмана. При напряжениях $V \gtrsim 0.4$ В наблюдается отклонение ВАХ от закона (1). Это связано с существованием достаточно большого последовательного сопротивления R_s базового материала подложки, вследствие чего значительная часть напряжения падает не на барьере, а на сопротивлении R_s . На рис. 1, а штриховыми прямыми линиями показаны ВАХ, перестроенные в координатах $\lg J$ от $V - R_s J$, т.е. с учетом падения напряжения на последовательном сопротивлении R_s , найденном из импедансных измерений. По этим прямым определялся диодный коэффициент n из соотношения $n = (q/kT)(\Delta V/\Delta \ln J)$, и его значения представлены в таблице. Динамика изменения n свидетельствует о том, что после рентгеновского облучения наблюдается изменение экспоненциальной зависимости тока от напряжения, т.е. изменение механизма прохождения тока через потенциальный барьер. Помимо диффузионной имеет место рост рекомбинационная составляющая. Увеличение n от 1.3 к 2.8 позволяет предположить, что надбарьерный механизм ($n = 1.3$ при $t_e = 0$ и $n = 1.8$ при $t_e = 40$ ч) переходит в туннельно-рекомбинационный (с $n = 2.2, 2.6$ и 2.8 для времени экспозиции 80, 120 и 160 ч соответственно). Существование туннельно-рекомбинационной составляющей в механизме токопереноса, очевидно, связано с изменениями поверхностных свойств границы раздела ГП после облучения. Подтверждением этого являются результаты исследования спектров квантовой эффективности фототока и их изменения в условиях облучения. Спектры представлены

на рис. 2 и имеют вид полосы, ограниченной с двух сторон, что характерно для спектров ГП. Длинноволновый край фоточувствительности при 1.2 эВ обусловлен поглощением света в базовом полупроводнике, а коротковолновый, при энергии фотонов $h\nu = 2.0$ эВ, — поглощением света в пленке окисла [11]. Незначительная фоточувствительность при $h\nu > 2.0$ эВ объясняется малой толщиной слоя окисла. В этой области спектра после облучения квантовая эффективность фототока уменьшается. Наблюдаемое уменьшение может быть связано с увеличением скорости поверхностной рекомбинации неравновесных носителей как за счет изменения поверхностных свойств границы раздела, так и за счет сужения приповерхностной области генерации фотоносителей, обусловленной возрастом коэффициента поглощения света в InSe [13].

Отметим, что для обратных ветвей ВАХ (рис. 1, б) характерна степенная зависимость тока от напряжения. Видно, что показатель степени m не изменяется с облучением и равен 0.6–0.7, что отвечает генерационно-рекомбинационным процессам в области пространственного заряда [14].

Проведенные измерения напряжения холостого хода V_{oc} и тока короткого замыкания J_{sc} исследуемых ГП до и после рентгеновского облучения позволили установить, что эти параметры испытывают незначительные изменения. После облучения для лучших образцов зарегистрированы рост V_{oc} на 40% и уменьшение J_{sc} на 30%. Надо отметить, что исследование ВАХ образцов через 30 и 50 дней после общего времени экспонирования показало стабильность и воспроизводимость результатов (см. таблицу).

Рост V_{oc} при облучении ГП отражает факт увеличения контактной разности потенциалов и качественно может быть объяснен следующим образом. Специально легированный акцепторной примесью InSe представляет собой компенсированный полупроводник [15]. При этом

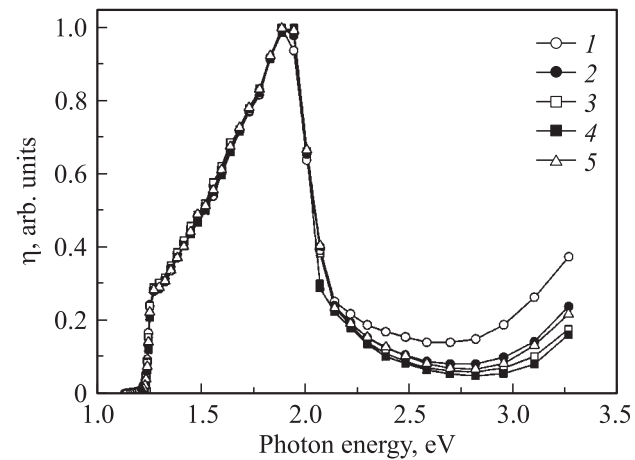


Рис. 2. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фототока η для ГП окисел–*p*-InSe до (1) и после рентгеновского облучения при экспозиции 40 (2), 80 (3), 120 (4), 160 ч (5).

различного рода дефекты и примеси создают сложную многоуровневую систему в запрещенной зоне с определенным положением уровня Ферми. При взаимодействии полупроводника с рентгеновским излучением происходит ионизация не только валентных электронов, но и электронов внутренних оболочек атомов. В результате этого кулоновское взаимодействие между сильно ионизированными атомами растет и приводит к необратимым пространственным смещениям [16]. Следствием кулоновского взаимодействия может стать перекompенсация полупроводника и смещение уровня Ферми таким образом, что контактная разница потенциалов ГП растет. Последовательное увеличение экспозиции облучения приводит к стабилизации этого уровня и неизменности фотоэлектрических параметров при последующем облучении.

На фоне большого количества собственных дефектов образование новых практически не влияет на структуру монокристалла InSe: Cd, что подтверждается методом ДКС. Кривые качания для слоистого полупроводника до и после облучения почти идентичны.

4. Заключение

Исследовано влияние характеристического рентгеновского излучения (22 кэВ) на свойства ГП окисел–*p*-InSe. Установлено, что в результате облучения имеет место рост напряжения холостого хода, свидетельствующий об изменении контактной разницы потенциалов между полупроводниками. Полученные изменения обсуждаются в рамках электростатической модели образования радиационных дефектов в кристалле. Анализ ВАХ позволяет сделать вывод о возрастании роли рекомбинационных процессов в механизмах токопрохождения через барьер. Следствием облучения являются увеличение диодного коэффициента ВАХ и (или) уменьшение квантовой эффективности фототока в коротковолновой части спектра.

Улучшение фотоэлектрических параметров ГП окисел–*p*-InSe и последующая их стабилизация свидетельствует о возможности использования таких структур в условиях повышенной радиации, в частности рентгеновского облучения.

Список литературы

- [1] J.C. Terhell. *Progr. Cryst. Growth Charact.*, **7**, 55 (1983).
- [2] З.С. Медведева. *Халькогениды элементов IIIБ подгруппы Периодической системы* (М., Наука, 1968).
- [3] Л.И. Ман, Р.М. Имамов, С.А. Семилетов. *Кристаллография*, **21**, 628 (1976).
- [4] Z.T. Kuznicki, K. Maschke, Ph.E. Schmid. *J. Phys. C: Sol. St. Phys.*, **12**, 3749 (1979).
- [5] Р.Ю. Алиев, К.А. Аскеров. *Прикл. физика*, № 3, 78 (1999).
- [6] З.Д. Ковалюк, В.Н. Катеринчук, О.А. Политанская, О.Н. Сидор, В.В. Хомяк. *Письма ЖТФ*, **31** (9), 1 (2005).
- [7] К.А. Аскеров, А.З. Абазова, Ф.К. Исав. *Прикл. физика*, № 4, 94 (2004).
- [8] В.Н. Катеринчук, З.Д. Ковалюк, А.В. Заслонкин. *Письма ЖТФ*, **25** (13), 34 (1999).
- [9] В.Н. Катеринчук, З.Д. Ковалюк, Т.В. Беца, В.М. Каминский, В.В. Нетяга. *Письма ЖТФ*, **27** (10), 62 (2001).
- [10] A. Chevy, A. Kuhn, M.S. Martin. *Cryst. Growth*, **38**, 118 (1977).
- [11] Z.D. Kovalyuk, V.M. Katerynychuk, A.I. Savchuk, O.M. Sydor. *Mater. Sci. Eng. B*, **109**, 252 (2004).
- [12] В.А. Ушаков. *Прецизионный двухкристальный рентгеновский спектрометр для получения кривых качания* (Новосибирск, ИЯФ, 1980).
- [13] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 2, гл. 14, с. 404.
- [14] В.И. Стриха. *Контактные явления в полупроводниках* (Киев, Выш. шк., 1982).
- [15] S. Shigetomi, H. Ohkubo, T. Ikari. *J. Phys. Chem. Sol.*, **51** (1), 91 (1990).
- [16] В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. *Действие излучений на полупроводники* (М., Наука, 1988).

Редактор Л.В. Шаронова

Characteristics of oxide–*p*-InSe heterojunctions under X-ray irradiation conditions

Z.D. Kovalyuk, V.N. Katerynychuk, O.A. Politanska, N.D. Raransky*

Chernovtsy Department of the Institute of Materials Science Problems, National Academy of Sciences of Ukraine, 58001 Chernovtsy, Ukraine
* Chernovtsy National University, 58012 Chernovtsy, Ukraine

Abstract The influence an X-ray characteristic irradiation ($\lambda = 0.056$ nm) on photoelectric parameters of intrinsic oxide–*p*-InSe heterojunctions has been established. Current–voltage and spectral characteristics of structures before and after irradiation have been obtained. The changes of the open-circuit voltage, short-circuit current, current–voltage characteristics and photosensitivity spectra of the heterojunctions are caused by formation of radiation-induced defects in InSe. They lead to more significant recombination processes in current transfer mechanisms, slightly changing the surface recombination velocity and having no any destructive effects. The results obtained explain within the framework of an electrostatic model the formation of radiation-induced defects in the crystalline lattice.