

# Коэффициент фотоплекроизма и его температурная динамика в гетеропереходах собственный оксид-*p*-InSe

© В.Н. Катеринчук, З.Р. Кудринский<sup>¶</sup>, З.Д. Ковалюк

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

(Получена 29 августа 2013 г. Принята к печати 25 сентября 2013 г.)

Исследована температурная зависимость коэффициента фотоплекроизма для гетероперехода собственный оксид-*p*-InSe. Зарегистрирована разная температурная зависимость сдвига длинноволнового края фототока для двух ориентаций поляризации  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{C}$  и  $\mathbf{E} \perp \mathbf{C}$ .

## 1. Введение

В настоящее время наблюдается возрастающее количество публикаций, посвященных изучению явления фотоплекроизма в разных анизотропных, изотропных полупроводниках и структурах на их основе. Следствием этих публикаций было появление обзорных работ [1,2]. Явление фотоплекроизма заключается в зависимости концентрации фотогенерированных носителей заряда от пространственной ориентации вектора электрического поля световой волны относительно кристаллографических осей анизотропных полупроводников. Интерес к его исследованию обусловлен использованием линейно-поляризованного света в изучении энергетического спектра полупроводников, поиском создания фотоанализаторов линейно-поляризованного излучения для волоконно-оптических систем передачи и обработки информации, систем дистанционной коррекции угловых координат отдаленных объектов и т. п. Все более широкое использование лазерных излучений в медицине, науке и технике, а также отсутствие серийного производства подобных анализаторов способствуют повышенному вниманию к таким исследованиям. Возникает необходимость создания поляризационно-чувствительных фотоприемников, которые работали бы в разных спектральных диапазонах. Анализ работ, посвященных созданию подобных фотоприемников, указывает на то, что наиболее перспективными в этом отношении являются структуры, созданные на основе анизотропных полупроводников, в частности, на основе слоистых кристаллов (СК) InSe и GaSe.

Для реализации поляризационно-чувствительных фотоприемников необходимо формировать потенциальный барьер структуры в перпендикулярной к сколу плоскости. Технологическим препятствием к созданию таких гетеропереходов (ГП) является необходимость механических и химических обработок поверхности указанной ориентации. Осложнения заключаются еще и в том, что по причине мягкости СК во многих случаях операция механического шлифования не улучшает качество поверхности. Выход был найден в выращивании слоистых материалов специально блочными [3]. В таком случае удастся получить образцы кристаллов с естественной

совершенной поверхностью, которая практически перпендикулярна к плоскости спайности слоев.

Явление фотоплекроизма в СК GaSe и InSe исследовалось с использованием фоторезисторного эффекта [4]. Созданию разных типов диодных структур для исследования этого явления уделялось меньше внимания. Это было обусловлено сложностью формирования *p-n*-перехода, ориентированного параллельно кристаллографической оси  $\mathbf{C}$ .

Различают естественный и наведенный фотоплекроизм. Для реализации первого необходимым условием является анизотропный полупроводник. В случае наведенного фотоплекроизма явление имеет место для произвольного фоточувствительного материала, но при определенном угле падения линейно-поляризованного света к его поверхности [2].

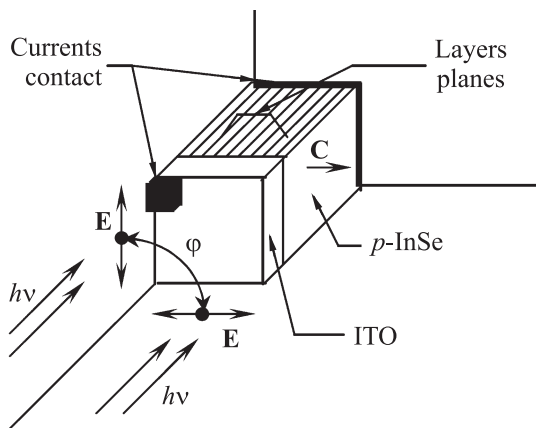
## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Слитки кристаллов  $\gamma$ -InSe ( $R\bar{3}m$ ) выращивались методом Бриджмена. Для получения фоточувствительных образцов кристаллы InSe легировались примесью кадмия и имели дырочный тип проводимости.

Особенностью исследуемых гетеропереходов оксид-*p*-InSe является то, что они сформированы на основе анизотропных кристаллов InSe. Такие кристаллы фоточувствительны как к естественному, так и к поляризованному свету, причем в зависимости от кристаллографической ориентации подложки [5–8]. Если кристаллографическая ось  $\mathbf{C}$  совпадает с направлением распространения света, то кристаллы InSe нечувствительны к поляризованному свету. В случае освещения, когда  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{C}$ , наблюдается фотоплекроизм ( $\mathbf{E}$  — вектор электрического поля световой волны). Поэтому нами представлены результаты исследований гетеропереходов оксид-*p*-InSe, сформированных в плоскости, параллельной  $\mathbf{C}$ , термическим окислением [5,6], а сама плоскость была получена по методике, предложенной в работе [3].

Конфигурация ГП и схема освещения образцов показаны на рис. 1. За направление вектора поляризации света принято направление вектора электрического поля падающего света. Угол  $\varphi$  изменяется от 0 до 90°,

<sup>¶</sup> E-mail: kudrynskyi@gmail.com



**Рис. 1.** Схематическое изображение гетероструктуры и конфигурация освещения.

что отвечает двум предельным положениям освещения линейно-поляризованным светом:  $E \parallel C$  и  $E \perp C$ .

Фотоэлектрические свойства ГП собственный оксид- $p$ -InSe исследовались в области температур 150–300 К с помощью монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2.6 нм/мм.

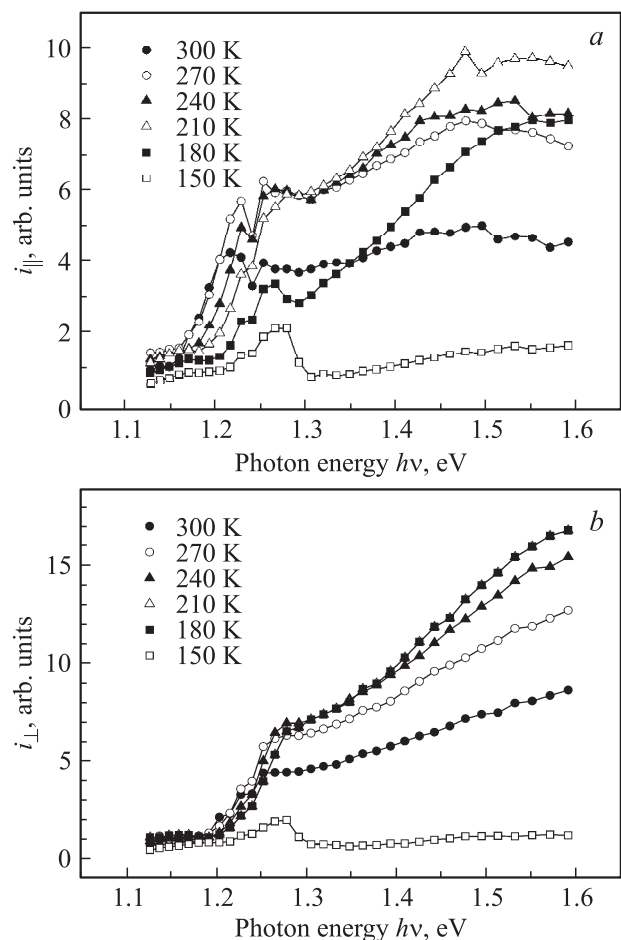
Важно знать не только спектральные характеристики коэффициента фотопоглощения, но и их температурные зависимости. В литературе этот вопрос не отражен, хотя в работе [4] отмечалось, что при 77 К анизотропия фоточувствительности в кристаллах GaSe и InSe не испытывает принципиальных изменений. Такая ситуация возможна лишь при условиях, когда энергетические параметры кристаллов имеют одинаковую температурную зависимость, а структура их спектров оптического поглощения остается неизменной. В то же время известно, что в анизотропных полупроводниках именно при снижении температуры структура спектра краевого поглощения существенно изменяется. Она проявляется в виде четко выраженных экситонных пиков с их сериальной структурой, присущей водородоподобным спектрам. Поскольку максимальные значения коэффициента фотопоглощения достигаются при энергиях, отвечающих ширине запрещенной зоны, изменения, вызванные температурой, должны быть заметными. Именно присутствие экситонных линий может приводить к изменениям в абсолютной величине коэффициента фотопоглощения.

С этой целью исследовались спектры фотоотклика ГП собственный оксид- $p$ -InSe в поляризованном свете в температурном диапазоне 150–300 К для двух крайних ориентаций:  $E \parallel C$  и  $E \perp C$ . Результаты исследований представлены на рис. 2. Выявлено, что для двух поляризаций освещения наблюдается разная температурная зависимость сдвига длинноволнового края фототока ( $i_{\parallel}$ ,  $i_{\perp}$ ), что видно из рис. 2, *a*, *b*. Оценка средней величины температурного сдвига длинноволнового края при фиксированном значении фототока составляет для двух представленных случаев  $E \parallel C$  и  $E \perp C$  соответственно  $-4.8 \cdot 10^{-4}$  и  $-1.7 \cdot 10^{-4}$  эВ/К. При снижении

температуры неодинаковое смещение края в спектре фототока должно приводить к уменьшению коэффициента фотопоглощения в исследуемых ГП собственный оксид- $p$ -InSe.

Следует отметить, что при снижении температуры абсолютные значения фототока сначала растут, а потом уменьшаются для поляризаций освещения как  $E \parallel C$ , так и  $E \perp C$ . Такое поведение фототока может быть объяснено ростом ширины области пространственного заряда (ОПЗ) при снижении температуры, потому что при этом растет величина потенциального барьера. В результате расширения обедненной области растет коэффициент собирания фотогенерированных носителей и соответственно увеличивается фототок. Существенное уменьшение температуры (150 К) может приводить к возникновению механических напряжений на гетерогранице и к ухудшению характеристик ГП. В таком случае могут наблюдаться эффекты уменьшения фототока, вызванные поверхностной рекомбинацией.

Температурное поведение спектра коэффициента фотопоглощения  $\mathcal{P}$  показано на рис. 3. Как видно, в температурном диапазоне 300–210 К спектр  $\mathcal{P}$  сдвигается в высокоэнергетическую область. При этом сдвиге макси-



**Рис. 2.** Температурные зависимости спектров фотоотклика ГП собственный оксид- $p$ -InSe в поляризованном свете: *a* —  $E \parallel C$ ; *b* —  $E \perp C$ .

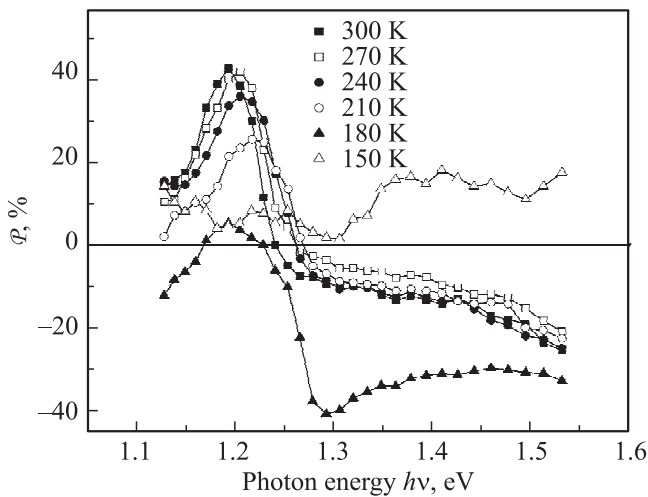


Рис. 3. Температурные зависимости спектрального распределения коэффициента фотоплекроизма ГП собственный оксид-*p*-InSe.

мальные положительные значения  $\mathcal{P}$  уменьшаются от 40 до 25%. При отрицательных  $\mathcal{P}$  значения коэффициента фотоплекроизма изменяются в небольших пределах. Энергетический сдвиг спектра  $\mathcal{P}$  можно объяснить на основе разной температурной зависимости ширины запрещенной зоны при двух поляризациях освещения. При  $\mathcal{P} < 0$  значения коэффициента фотоплекроизма менее расходятся, хотя тенденция к их уменьшению по абсолютной величине сохраняется. Уменьшение  $\mathcal{P}$  со снижением температуры можно объяснить на основе более эффективного собирания фотоносителей обедненной областью ГП в поляризации освещения  $\mathbf{E} \perp \mathbf{C}$  по сравнению с собиранием в поляризации  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{C}$ , для которой это собирание остается неизменным. Расхождения между величинами фототоков для двух случаев при воздействии линейно-поляризованным светом заключаются в значительном различии коэффициентов поглощения света и вызваны изменением ширины ОПЗ с уменьшением температуры. При этом соотношение фототоков  $i_{\parallel}/i_{\perp}$  уменьшается.

Существенные отличия в поведении коэффициента фотоплекроизма были выявлены лишь при двух температурах: 180 и 150 К. При 180 К функциональный характер спектра  $\mathcal{P}$  остается неизменным, как и при более высоких температурах, однако  $\mathcal{P}$  существенно смещается по оси ординат в сторону отрицательных значений. Его максимальное абсолютное значение достигает 40% при другой длине волны (энергия  $h\nu = 1.3$  эВ) относительно максимумов кривых при высоких температурах. Такое поведение спектра  $\mathcal{P}$  также может быть объяснено на основе разного характера температурного сдвига энергетического спектра InSe и особенностей собирания фотоносителей в ГП при двух поляризациях освещения. При 150 К выявлено, что  $\mathcal{P} > 0$  во всей спектральной области, а его значения не превышают 20%, хотя функциональная зависимость подобна зависимости при 180 К.

Для выяснения подобного поведения спектра коэффициента фотоплекроизма необходимы прецизионные измерения спектров фототока в поляризованном свете при низких температурах и усовершенствование методики формирования ГП, от качества которого в значительной степени зависит абсолютная величина коэффициента  $\mathcal{P}$  и его спектр.

### 3. Заключение

Впервые исследована температурная динамика спектров поляризационной чувствительности ГП собственный оксид-*p*-InSe. Зарегистрирована разная температурная зависимость сдвига длинноволнового края фототока для двух ориентаций поляризации:  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{C}$  и  $\mathbf{E} \perp \mathbf{C}$ . Оценка средней величины этого сдвига при фиксированном значении фототока составляет для двух случаев освещения соответственно  $-4.8 \cdot 10^{-4}$  и  $-1.7 \cdot 10^{-4}$  эВ/К. При снижении температуры неодинаковое смещение края в спектре фототока приводит к уменьшению коэффициента фотоплекроизма в исследуемых ГП собственный оксид-*p*-InSe.

Для ГП собственный оксид-*p*-InSe поведение коэффициента фотоплекроизма  $\mathcal{P}$  в спектральном диапазоне 1.1–1.6 эВ характеризуется изменением его знака с положительного на отрицательный при уменьшении длины волны. Максимум  $\mathcal{P}$  наблюдается для длины волны  $\lambda = 1.04$  мкм и достигает 40%. Данная длина волны очень близка к длине излучения инфракрасного неодимового лазера ( $\lambda = 1.06$  мкм). Нулевое значение коэффициента фотоплекроизма проходит при  $\lambda = 1.0$  мкм. При уменьшении длины волны  $\mathcal{P}$  становится отрицательным и монотонно растет по абсолютной величине во всей исследованной спектральной области, достигая значения 30% при  $\lambda = 0.81$  мкм.

Полученные результаты являются важными с точки зрения разработки фоточувствительных структур как для естественного, так и для поляризованного света.

### Список литературы

- [1] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **30** (11), 1921 (1996).
- [2] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **33** (5), 513 (1998).
- [3] З.Д. Ковалюк, В.Н. Катеринчук, А.В. Заслонкин, М.В. Товарницкий, В.Й. Дуплавый. Патент Украины № 101001 на изобретение. Заявка № а 2010 07904 от 24.06.2010; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4.
- [4] Н.М. Мехтиев, Ю.В. Рудь, Э.Ю. Салаев. ФТП, **12** (8), 1566 (1978).
- [5] В.Н. Катеринчук, З.Д. Ковалюк, А.В. Заслонкин. Письма ЖТФ, **25** (13), 34 (1999).
- [6] В.Н. Катеринчук, З.Д. Ковалюк. ФТП, **38** (4), 417 (2004).
- [7] Z.D. Kovalyuk, V.N. Katerinchuk, T.V. Betsa. Optical Mater., **17** (1–2), 279 (2001).
- [8] В.Н. Катеринчук, З.Р. Кудринский. ФТП, **47** (3), 320 (2013).

Редактор Л.В. Шаронова

## Photopletochroism coefficient and its temperature dynamics in natural oxide-*p*-InSe heterojunctions

*V.M. Katerynchuk, Z.R. Kudrynskyi, Z.D. Kovalyuk*

Frantsevich Institute of Materials Science Problems,  
National Academy of Sciences of Ukraine  
(Chernivtsi Branch),  
58001 Chernivtsi, Ukraine

**Abstract** Temperature dependence of the photopletochroism coefficient for the natural oxide-*p*-InSe heterojunction was investigated. We observed different temperature dependences of the shift of photocurrent longwave edge for two polarization orientations:  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{C}$  and  $\mathbf{E} \perp \mathbf{C}$ .