

УДК 621.315.592

## ОБУСЛОВЛЕННЫЕ КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПРИМЕСНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ *n*-InSe, ЛЕГИРОВАННЫХ ГОЛЬМИЕМ И ЭРБИЕМ

© 2022 г. А. Ш. Абдинов<sup>1</sup>, Р. Ф. Бабаева<sup>2</sup>, \*

<sup>1</sup>Бакинский государственный университет, ул. З. Халилова, 23, Баку, AZ 1148 Азербайджан

<sup>2</sup>Азербайджанский государственный экономический университет (UNEC),  
ул. Истиглалийат, 6, Баку, AZ 1001 Азербайджан

\*e-mail: babayeva.rena@unec.edu.az

Поступила в редакцию 14.01.2022 г.

После доработки 22.03.2022 г.

Принята к публикации 24.03.2022 г.

Проведено комплексное экспериментальное исследование обусловленных комбинированным возбуждением примесных фотоэлектрических явлений: индуцированной примесной фотопроводимости (ИПФ), оптического и температурного стирания состояния фотоэлектрической утомляемости (ФЭУ) в чистых, а также легированных гольмием и эрбием ( $10^{-5}$ – $10^{-1}$  ат. %) кристаллах селенида индия (*n*-InSe). Показано, что специфические особенности ИПФ, обнаружение и стирание состояния ФЭУ, помимо наличия в запрещенной зоне различных типов уровней прилипания, обусловлены также наличием случайных макроскопических дефектов в изучаемых образцах.

**Ключевые слова:** индуцированная примесная фотопроводимость, фотоэлектрическая утомляемость, легирование, редкоземельные элементы, уровни прилипания, макроскопические дефекты

DOI: 10.31857/S0002337X22070016

### ВВЕДЕНИЕ

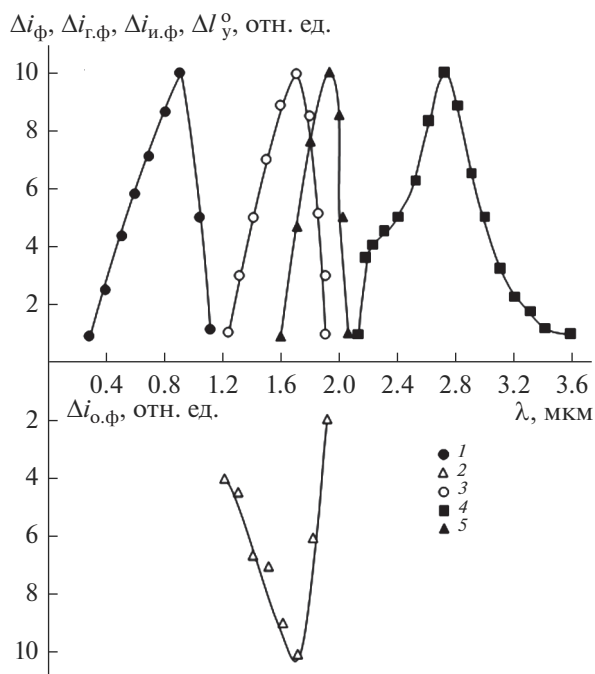
Исследование обусловленных комбинированным возбуждением фотоэлектрических явлений является одним из мощных способов для изучения структуры и свойств полупроводников [1, 2]. В ранних работах [3–7] в этом аспекте сообщалось об индуцированной примесной фотопроводимости (ИПФ) и термостимулированной проводимости в пространственно-однородных кристаллических полупроводниках.

При изучении фотоэлектрических свойств слоистых кристаллов *n*-InSe, перспективных для различных областей электроники [8, 9], помимо не присущих пространственно-однородным кристаллическим полупроводникам особенностей ИПФ, обнаружены также обусловленные комбинированным возбуждением другие фотоэлектрические явления: термическое и оптическое стирание фотоэлектрической утомляемости (ФЭУ) [10]. Однако не проводилось комплексное исследование этих явлений как в этом полупроводнике, так и в других полупроводниковых соединениях  $A^{III}B^{VI}$  со слоистой структурой, которое может быть полезным для изучения структуры и электронных свойств слоистых полупроводников  $A^{III}B^{VI}$ .

Цель данной работы – экспериментальное исследование особенностей ИПФ и обоих типов (оптического и температурного) стирания ФЭУ в нелегированных специально (чистых) и легированных Ho и Er монокристаллах *n*-InSe.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследуемые образцы срезались из выращенных методом Бриджмена крупных чистых и легированных Ho и Er ( $10^{-5} \leq N \leq 10^{-1}$  ат. %) монокристаллических слитков моноселенида индия (*n*-InSe). Выбор в качестве примеси двух разных и находящихся далеко друг от друга РЗЭ (Ho и Er) был сделан с целью выявления зависимости исследуемых явлений как от химической природы введенных примесей, так и от их индивидуальных особенностей (атомного и ионного радиусов, электронной конфигурации, химической активности, устойчивости на воздухе, температуры плавления, электрохимической подобности с In) [11] с учетом отработанной технологии получения легированных ими монокристаллов *n*-InSe [12, 13]. Количественный, элементный и фазовый состав, кристаллическая структура использованных слитков, а также состояние поверхности (001) исследуемых кристаллов были изучены термогра-



**Рис. 1.** Спектральное распределение собственной фотопроводимости ( $\Delta i_{\phi}$ ) (1), отрицательной фотопроводимости ( $\Delta i_{o,\phi}$ ) (2), ИК-гашения собственной фотопроводимости ( $\Delta i_{г.ф.}$ ) (3), ИПФ ( $\Delta i_{и.ф.}$ ) (4), оптического стирания ФЭУ ( $\Delta I_y^o$ ) (5) в чистых кристаллах *n*-InSe с  $\rho_{77} = 3 \times 10^6$  Ом см при  $T = 77$  К.

фическим, рентгенографическим и микроскопическим анализами (ДСК-910, ADVNCE-8D, SINTECSP 2, ДРОН-4-07 (CuK $\alpha$ -излучение, шаг 0.05°, диапазон углов 8°–135°)). Установлено, что как нелегированные, так и легированные кристаллы моноселенида индия имеют *n*-тип проводимости, являются гомогенными, обладают высокой степенью монокристалличности, относятся к ромбоэдрической сингонии ( $\gamma$ -политип) и пр. гр.  $R3m(C_{3p}^5)$  ( $a = 4.02$  Å,  $c = 25.05$  Å) [14], на поверхности образцов отсутствуют неоднородности и посторонние фазы.

Величины темнового удельного сопротивления ( $\rho_0$ ) различных образцов при температурах ниже 300 К заметно различались. С понижением температуры это отличие увеличивалось, и при 77 К  $\rho_0$  различных образцов изменялось в пределах  $\sim 10^3$ – $5 \times 10^6$  Ом см [12]. Измерения проводились при помощи экспериментальной установки, собранной на базе двух монохроматоров типа МДР-12 в широком диапазоне температур ( $77 \leq T \leq 300$  К), длин волн ( $0.200 \leq \lambda \leq 3.000$  мкм) и интенсивности ( $I \leq 4 \times 10^2$  лк) света [15].

Геометрические размеры образцов вдоль и перпендикулярно естественным слоям кристалла составляли  $(3-5) \times (3-5)$  мм и  $\sim 230-250$  мкм соответственно. Электрические контакты создавались путем припаивания без флюса металлического индия на двух противоположенных из четырех торцов образца, при всех измерениях ток протекал вдоль естественных слоев кристалла, а световой поток был направлен перпендикулярно к ним.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методом стационарной фотопроводимости [1] измерялись спектральное распределение (спектр), а также зависимости от времени (кинетика), температуры, интенсивности фоновой собственной подсветки ( $\Phi_c$ ) и сканирующего примесного ( $\Phi_n$ ) света ИПФ и глубин стираний ФЭУ.

Установлено, что образцы чистых кристаллов *n*-InSe вплоть до  $T \approx 350$  К обладают высокой собственной фотопроводимостью (рис. 1, кривая 1). При низких температурах в них в области примесного поглощения наблюдаются также отрицательная фотопроводимость (кривая 2), ИК-гашение собственной фотопроводимости при  $T \leq 200$  К (кривая 3) и ИПФ при  $T \leq 150$  К (кривая 4). При умеренных интенсивностях  $\Phi_c$  значение ( $\Delta i_{и.ф.} = (i_c - i_t)/i_t$ , где  $i_c$  – стационарное значение тока через образец при одновременном воздействии сканирующего примесного света и фоновой собственной подсветки,  $i_t$  – ток в темноте) и характеристики ИПФ не зависят от темнового удельного сопротивления ( $\rho_0$ ) и легирования исследуемого образца. При слабых  $\Phi_c$   $\Delta i_{и.ф.}$  в чистых кристаллах с ростом  $\rho_{77}$  плавно увеличивается (рис. 2, кривая 1), в кристаллах *n*-InSe<P3Э> от химической природы введенной примеси не зависит, но с ростом содержания введенной примеси ( $N$ ) меняется не монотонно и достигает максимума при  $N \approx 5 \times 10^{-4}$ – $10^{-3}$  ат. % (рис. 2, кривая 2).

В общем случае зависимости  $\Delta i_{и.ф.}(\Phi_c)$  и  $\Delta i_{и.ф.}(\Phi_n)$  как чистых, так и легированных кристаллов имеют степенной характер ( $\Delta i_{и.ф.} \sim \Phi_c^k$  и  $\Delta i_{и.ф.} \sim \Phi_n^k$  соответственно). В чистых образцах с  $\rho_{77} < 5 \times 10^3$  Ом см и легированных с  $N > 10^{-2}$  ат. % показатель степени ( $k$ ) с увеличением  $\Phi_c$  и  $\Phi_n$  уменьшается:  $k \approx 1.0$ ,  $k \approx 0.5$  и  $k \approx 0$ . В чистых образцах с  $\rho_{77} > 10^4$  Ом см и легированных с  $N \approx 10^{-5}$ – $10^{-2}$  ат. % в начальной области зависимостей  $\Delta i_{и.ф.}(\Phi_n)$  наблюдается также степенной участок с показателем  $k > 1$ . С ростом  $\rho_{77}$  до  $\sim 5 \times 10^6$  Ом см значение  $k$  на этом участке кривых увеличивается до  $\sim 4$ . В образцах *n*-InSe<P3Э> с ростом  $N$  значение  $k$  на начальном участке зависимостей  $\Delta i_{и.ф.}(\Phi_c)$  и  $\Delta i_{и.ф.}(\Phi_n)$  не монотонно меняется, до-

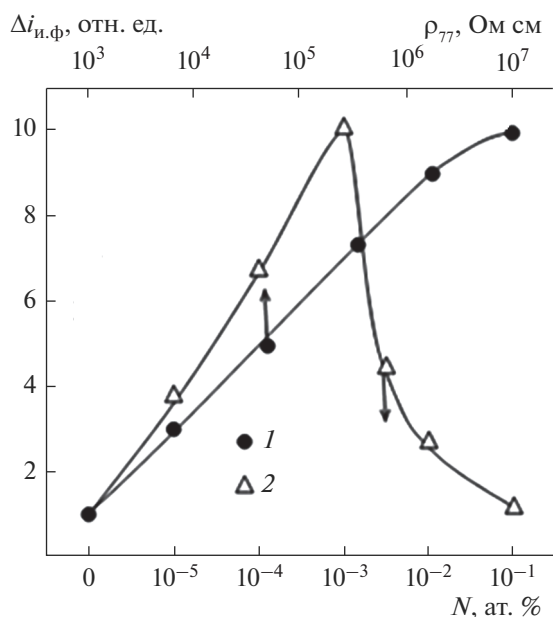


Рис. 2. Зависимости ИПФ от  $\rho_{77}$  в чистых (1) и от  $N$  в легированных РЗЭ (2) кристаллах  $n$ -InSe при  $T = 77$  К.

стигает максимального значения ( $\sim 5-6$ ) при  $N \approx 5 \times 10^{-4}-10^{-3}$  ат. %, а при  $N \approx 10^{-1}$  ат. % равняется  $\sim 1$ .

При слабых  $\Phi_{\text{п}}$  скорость процессов установления стационарного значения и исчезновения ИПФ тоже зависят от  $\rho_{77}$  и  $N$  (рис. 3). В чистых кристаллах с ростом  $\rho_{77}$  оба процесса плавно замедляются, а для легированных кристаллов зависимость их скорости от  $N$  имеет немонокотный характер. Наиболее медленная релаксация ИПФ наблюдается в образцах  $n$ -InSe(РЗЭ) с  $N \approx 5 \times 10^{-4}-10^{-3}$  ат. %, а наиболее быстрая – в образцах с  $N \approx 5 \times 10^{-2}-10^{-1}$  ат. %. В кристаллах  $n$ -InSe(РЗЭ) с  $N \approx 5 \times 10^{-2}-10^{-1}$  ат. % все параметры и характеристики ИПФ проявляют также наиболее высокую стабильность и воспроизводимость.

Установлено, что в области  $T \leq 200$  К при длительном освещении собственным светом с интенсивностью больше определенного граничного значения ( $\Phi_{\text{г.с}}$ ) чистые образцы с  $\rho_{77} > 10^5$  Ом см и легированные с  $N < 5 \times 10^{-2}$  ат. % медленно переходят в состояние с низкой фотопроводимостью (рис. 4, кривые 1 и 2 соответственно). При 77 К для различных образцов в зависимости от  $\rho_{77}$  и  $N$  значение  $\Phi_{\text{г.с}}$  составляет  $\sim 3 \times 10^2-6 \times 10^2$  лк. Это явление не связано со старением исследуемых образцов или деградацией их фотоэлектрических параметров, протеканием фотохимической реакции и остаточной фотополяризацией в них. Оно имеет медленно релаксирующий обратимый характер и связано с ФЭУ [10, 16]. Глубина ФЭУ

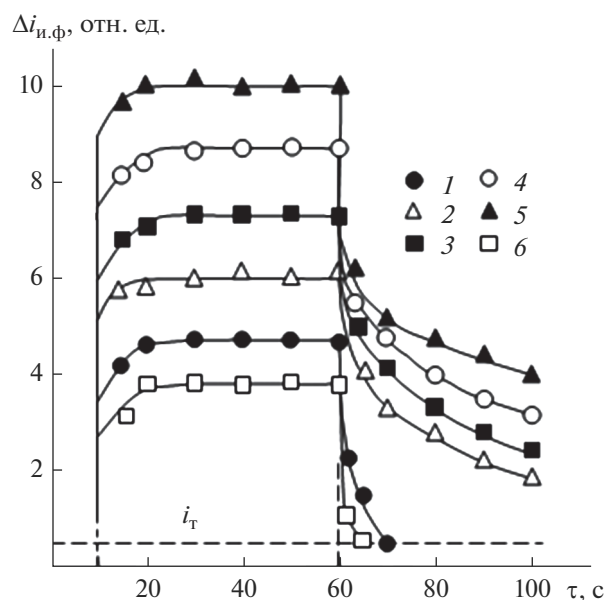
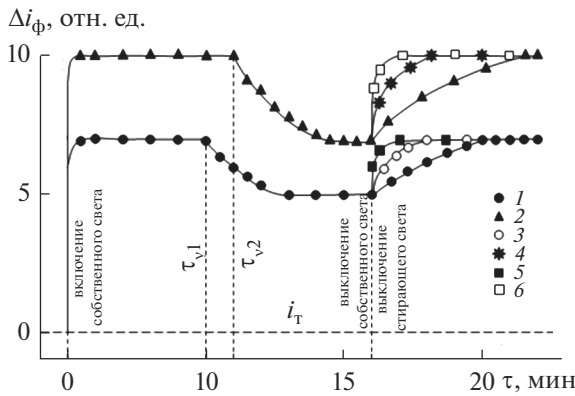


Рис. 3. Кинетика ИПФ в чистых с различным  $\rho_{77}$  (1–3) и легированных РЗЭ с различным  $N$  (4–6) кристаллах  $n$ -InSe при  $T = 77$  К:  $\rho_{77}$ , Ом см: 1 –  $2 \times 10^3$ , 2 –  $5 \times 10^5$ , 3 –  $3 \times 10^6$ ;  $N$ , ат. %: 4 –  $10^{-4}$ , 5 –  $10^{-3}$ , 6 –  $10^{-1}$ .

( $\Delta i_y = (\Delta i_c - \Delta i_k) / \Delta i_c$ , где  $\Delta i_c$  – стационарное значение собственной фотопроводимости до начала процесса ФЭУ,  $\Delta i_k$  – ее квазистационарное значение), помимо температуры, длины волны и интенсивности собственного света, зависит также от  $\rho_{77}$  и  $N$  в чистых и легированных РЗЭ кристаллах соответственно. Величина  $\Delta i_y$  с ростом  $\rho_{77}$  плавно увеличивается, а при росте  $N$  от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  ат. % немонотонно меняется и достигает своего максимального значения при  $N \approx 5 \times 10^{-4}-10^{-3}$  ат. %.

С повышением температуры процесс восстановления исходного состояния образца с высокой фоточувствительностью ускоряется – происходит термическое стирание ФЭУ. Глубина и скорость термического стирания ФЭУ ( $\Delta i_y^T = (\Delta i_k^T - \Delta i_k) / (\Delta i_c - \Delta i_k)$ , где  $\Delta i_c$  – исходное стационарное значение собственной фотопроводимости,  $\Delta i_k$  и  $\Delta i_k^T$  – квазистационарные ее значения в состоянии ФЭУ до и после повышения температуры соответственно) зависят от стирающей температуры ( $T_c$ ) и с повышением  $T_c$  резко увеличиваются. При температурном стирании ФЭУ исходное состояние образца с высокой фоточувствительностью восстанавливается почти мгновенно.

Выявлено, что ФЭУ можно стереть и оптическим способом, т.е. воздействием на находящийся в состоянии ФЭУ образец светом из определенного диапазона спектра примесного поглощения (рис. 4, кривые 3–6). Имеющий максимум при  $\lambda \approx 1.95$  мкм спектр оптического стирания ФЭУ во всех исследуемых образцах охватывает



**Рис. 4.** Кинетика собственной фотопроводимости в чистых с  $\rho_{77} = 2 \times 10^7$  Ом см (1, 3, 5) и легированных эрбием с  $N = 10^{-3}$  ат. % (2, 4, 6) кристаллах *n*-InSe при  $T = 77$  К при воздействии стирающего света с различной относительной интенсивностью  $(\Phi_{c.c.}/\Phi_{c.c.}^{max})$ :  $\Phi_{c.c.}/\Phi_{c.c.}^{max} = 0$  (1, 2), 0.4 (3, 4), 1.0 (5, 6) ( $\lambda_T = 1.95$  мкм).

диапазон длин волн  $1.60 \leq \lambda \leq 2.20$  мкм (рис. 1, кривая 5) и не совпадает со спектрами других обнаруженных в исследуемых образцах примесных фотоэлектрических явлений (рис. 1, кривые 2–4). Скорость и глубина оптического стирания ФЭУ ( $\Delta i_y^o = (\Delta i_k^o - \Delta i_k)/(\Delta i_c - \Delta i_k)$ , где  $\Delta i_c$  – исходное стационарное значение, а  $\Delta i_k$  и  $\Delta i_k^o$  – квазистационарные значения фотопроводимости в состоянии ФЭУ до и после воздействия стирающего света соответственно) зависят также от интенсивности стирающего света ( $\Phi_{c.c.}$ ) и с ростом  $\Phi_{c.c.}$  плавно увеличиваются.

Переходя к обсуждению полученных экспериментальных результатов, следует отметить, что из-за слабой связи между слоями кристаллов *n*-InSe при изготовлении отдельных образцов в них возникают вызывающие флуктуации электронных потенциалов свободных зон случайные макроскопические дефекты (СМД) [17]. В разных образцах размеры и количество СМД неодинаковы. Соответственно, в них различаются абсолютная величина флуктуации электронного потенциала, а также величины и характеристики электрофизических и фотоэлектрических параметров. В образцах с низким  $\rho_{77}$  количество СМД незначительно и в них ФЭУ не наблюдается, ИПФ удовлетворительно подчиняется теории фотопроводимости пространственно-однородного кристаллического полупроводника с равномерно распределенными по всему объему мелкими уровнями  $\alpha$ -прилипания [1, 2].

Для объяснения экспериментальных результатов, полученных в более высокоомных (с  $\rho_{77} >$

$> 10^5$  Ом см) образцах чистых кристаллов необходимо учитывать наличие СМД и локализованных в них глубоких уровней  $\beta$ -прилипания [1, 14].

В области низких температур при длительном освещении более высокоомных образцов чистых кристаллов *n*-InSe собственным светом с интенсивностью  $\Phi_c \geq \Phi_{T.c}$  вследствие долговременного захвата части неравновесных свободных носителей заряда уровнями  $\beta$ -прилипания происходит ФЭУ [10, 16]. При освещении находящегося в состоянии ФЭУ образца монохроматическим светом с  $\epsilon_\beta \leq h\nu \leq \epsilon_g$ , где  $\epsilon_g$  и  $\epsilon_\beta$  – значения ширины запрещенной зоны исследуемого полупроводника и энергетической глубины залегания глубоких уровней прилипания соответственно, аналогично случаю ИПФ, эти носители освобождаются и происходит оптическое стирание ФЭУ.

При легировании входящие в междоузлия атомы РЗЭ, благодаря малой электроотрицательности, легко ионизируются и под действием электрического поля  $p^+ - p$ -перехода [18] скапливаются на СМД и увеличивают их размеры. При малых значениях  $N$  расстояние между областями пространственного заряда (ОПЗ) соседних СМД больше длины диффузии и свободного пробега свободных носителей заряда. Поэтому с увеличением  $N$  флуктуация электронного потенциала и, соответственно, влияние СМД на фотопроводимость усиливаются. С дальнейшим увеличением  $N$  расстояние между ОПЗ соседних СМД становится сравнимым с длинами диффузии и свободного пробега свободных носителей заряда. При этом ОПЗ соседних СМД начинают постепенно “сплачиваться” и, подобно случаю для сильнолегированных полупроводников [19], образцы *n*-InSe(РЗЭ) постепенно приближаются к состоянию, характерному для пространственно-однородного кристаллического полупроводника. Помимо этого, из-за роста доли ковалентной связи между ионами трехвалентного РЗЭ, размещенными в соседних слоях и случайных вакансиях индия, усиливается также межслойная связь в кристалле.

По спектральным распределениям ИПФ (рис. 1, кривая 4) и оптического стирания состояний ФЭУ (рис. 1, кривая 5), а также по температурной зависимости величины  $\Delta i_y$  [1, 2] оценены значения энергетической глубины залегания мелких  $\alpha$ - и глубоких  $\beta$ -уровней прилипания в кристаллах *n*-InSe и *n*-InSe(РЗЭ), которые независимо от значений  $\rho_{77}$  и  $N$  для всех исследуемых образцов составляют  $\epsilon_\alpha \approx (\epsilon_c - 0.34)$  эВ и  $\epsilon_\beta \approx (\epsilon_c - 0.55)$  эВ соответственно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При комплексном исследовании ИПФ, термического и оптического стирания ФЭУ в чистых

и легированных РЗЭ монокристаллах  $n$ -InSe установлено, что:

– ИПФ и оптическое стирание ФЭУ обуславливаются комбинированным возбуждением носителей заряда, состоят из двух этапов – предварительного неравновесного заполнения при освещении фоновым собственным светом и последующего опустошения под воздействием примесного света мелких  $\alpha$ - и глубоких  $\beta$ -уровней прилипания соответственно;

– термическое стирание ФЭУ обусловлено комбинированным возбуждением носителей заряда и состоит из двух этапов – предварительного неравновесного заполнения при освещении собственным светом и последующего температурного опустошения мелких  $\alpha$ - и глубоких  $\beta$ -уровней прилипания;

– особенности ИПФ и оптического стирания ФЭУ, помимо наличия в запрещенной зоне мелких  $\alpha$ - и глубоких  $\beta$ -уровней прилипания при низких температурах, слабых освещенностях и малых содержаниях введенной примеси, обусловлены также наличием вызывающих пространственную неоднородность изучаемого образца СМД;

– пространственной неоднородностью образца, а также стабильностью и воспроизводимостью фотоэлектрических свойств, обусловленных комбинированным возбуждением, целенаправленно можно управлять путем варьирования содержания введенной примеси РЗЭ;

– энергетическая глубина залегания  $\alpha$ - и  $\beta$ -уровней прилипания независимо от величины  $\rho_{77}$  и уровня легирования составляет  $\epsilon_{\alpha} \approx (\epsilon_c - 0.34)$  эВ и  $\epsilon_{\beta} \approx (\epsilon_c - 0.55)$  эВ соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Наука, 1963. 494 с.
2. Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Зегря Г.Г., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А., Ясиевич И.Н., Берегулин Е.В. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах. Санкт Петербург: Наука, 2001. 248 с.
3. Аркадьева Е.Н., Рывкин С.М. Индуцированная инфракрасная фотопроводимость в некоторых полупроводниках // Физика твердого тела. 1960. Т. 2. С. 1889–1893.
4. Аркадьева Е.Н., Касимова Р.С., Рывкин С.М. Кинетика индуцированной примесной фотопроводимости в теллуриде кадмия // Физика твердого тела. 1961. Т. 3. С. 2411–2415.
5. Ризаханов М.А. Объяснение линейчатых спектров индуцированной примесной фотопроводимости в CdS-CdSe на основе представлений о донорных молекулах // Физика и техника полупроводников. 1982. Т. 16. № 4. С. 699–706.
6. Skipetrov E., Zvereva E., Skipetrova L., Slyn'ko E. Impurity-Induced Photoconductivity in Gallium-Doped  $Pb_{1-x}Ge_xTe$  Alloys. // Phys. B: Condens. Matter. 2001. V. 302–303. P. 393–397.
7. Панченко Т.В. Индуцированная примесная фотопроводимость в кристаллах Si- и Ge-силленитов // Физика твердого тела. 1998. Т. 40. № 6. С. 1027–1029.
8. Алиев И.И., Магаммедрагимова Р.С., Алиев О.М., Бабанлы К.Н. Синтез и рентгенографическое исследование сплавов системы  $As_2Se_3$ -InSe // Журн. неорганической химии. 2019. Т. 64. № 4. С. 421–424.
9. Алиев И.И., Джафарова Г.З., Мамедова А.З., Велиев Дж.А. Характер химического взаимодействия по разрезу InSe-In<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>Se<sub>3</sub> системы In-Sb-S-Se // Журн. неорганической химии. 2015. Т. 60. № 2. С. 282–285.
10. Вуль А.Ф., Набиев Ш.И., Шаронова Л.В., Шук А.Я. Экспериментальное и теоретическое исследование эффекта фотоэлектрической утомляемости в полупроводниках // Физика и техника полупроводников. 1977. Т. 11. № 5. С. 914–922.
11. Угай Я.А. Общая и неорганическая химия. М.: Высш. школа, 1997. 527 с.
12. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф. Особенности подвижности электронов в слое полупроводника  $n$ -InSe // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. № 13. С. 1563–1569.
13. Abdinov A.Sh., Babaeva R.F. Flexible Photocells Based on Layered  $A^{III}B^{VI}$  Semiconductor Compounds // Int. J. Tech. Phys. Probl. Eng. 2019. Issue 40. V. 11. № 3. P. 23–27.
14. Kuhn A., Chevy A., Chevalier R. Crystal Structure and Interatomic Distances in GaSe // Phys. Status Solidi A. 1975. V. 31. № 2. P. 469–475.
15. Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф. Температурная зависимость фотопроводимости монокристаллов  $n$ -InSe // Неорганические материалы. 2019. Т. 55. № 8. С. 806–812.
16. Абдинов А.Ш., Аббасова П.Г., Гасанов Я.Г. Эффект фотоэлектрической утомляемости в монокристаллах селенида индия // Физика и техника полупроводников. 1983. Т. 17. № 4. С. 761–766.
17. Шук А.Я. Фотопроводимость случайно-неоднородных полупроводников // ЖЭТФ. 1972. Т. 15. С. 408–410.
18. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Физматлит, 2008. 487 с.
19. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. 416 с.