



ВЛИЯНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ И СЕЛЕНИДА ЦИНКА НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$ *

С.З. Зайнабидинов¹, А.Й. Бобоев^{1,2}, Ж.Н. Усмонов¹

¹Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура
д.129, ул. Университетская, г. Андижан, 170100, Узбекистан
тел.: +9(989)0122-20-50, +9(989)74 225-61-30; e-mail: aboboevscp@gmail.com

²Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан
д. 1, ул. Хуросон, г. Ташкент, 100214, Узбекистан
тел.: +9(989)0211-52-25; e-mail: prof_sirojiddin@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.10-12.43-51

Заключение совета рецензентов: 25.03.19 Заключение совета экспертов: 03.04.19 Принято к публикации: 10.04.19

Определены технологические условия выращивания пленки твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ на подложках GaAs методом жидкофазной эпитаксии из оловянного раствора-расплава. Выращенные эпитаксиальные пленки имели толщину ~ 10 мкм, n -тип проводимости с удельным сопротивлением $\sim 0,1$ Ом·см и концентрацию носителей тока $5,1 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Исследована спектральная фоточувствительность гетероструктур $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$ и обнаружены два явных пика, соответствующих нанокристаллам Ge с соединениями молекул GaAs и квантовым точкам ZnSe. Показано, что спектр фоточувствительности исследуемого твердого раствора обладает шестью гауссовыми компонентами, которые соответствуют парным атомам Ge₂ и соединениям AsGe, GaGe, GeSe, AsZn, GaSe и ZnSe. Представлены пространственные конфигурации тетраэдрических связей в пределах нанокластеров, образуемых примесями Ge и ZnSe на основе элементарной ячейки GaAs. Кроме того, установлено, что нанокластеры в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ состоят из трех атомов As, двух атомов Ge и трех атомов Ga. Поскольку элементарная ячейка решетки с алмазоподобной структурой состоит из восьми атомов, линейные размеры нанокластера будут следующими: 5,6Å; 5,6Å; 5,6 Å. В нанокластере в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, образованном молекулами GaAs, ZnSe и парными атомами Ge₂, находятся 14 атомов: пять атомов As, два атома Ge, один атом Se, один атом Zn и пять атомов Ga, то есть атомы As и Ga связываются атомами Ge, Zn и Se, поэтому линейные размеры нанокластеров становятся: 5,6Å; 5,6Å; 10 Å. Таким образом, матричная решетка состоит из молекул GaAs и парных атомов Ge₂, а молекулы ZnSe находятся в их поверхностных дефектоспособных областях. В связи с тем что молекулы селенида цинка и соединения селенида германия образуют три акцепторных уровня в валентной зоне GaAs, а параметр решетки ZnSe незначительно больше, чем параметр матричной решетки, в местах расположения ZnSe наблюдаются микроискажения решетки. Эти искажения обладают повышенным потенциалом, который способствует образованию нанокристаллов ZnSe.

Ключевые слова: галлий; мышьяк; германий; цинк; селен; твердый раствор; соединение; подложка; гетероструктура; эпитаксия; фоточувствительность; молекула; атом; нанокристалл; валентность.

INFLUENCE OF GERMANIUM AND ZINC SELENIUM NANOCRYSTALS ON THE PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF THE $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$ HETEROSTRUCTURE

*Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н. Влияние нанокристаллов германия и селенида цинка на фотоэлектрические свойства гетероструктуры $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$ // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;10-12:43-51.

S.Z. Zainabidinov¹, A.Y. Boboev^{1,2}, J.N. Usmonov¹

¹Andijan State University named after Z.M. Babur
129 University Str., Andijan, 170100, Uzbekistan
tel.: +9 989 0122 20 50, +9 989 74 225 61 30, e-mail: aboboevscp@gmail.com

²Institute of Nuclear Physics, Academy Sciences of Uzbekistan
1 Khuroson Str., Tashkent, 100214, Uzbekistan
tel.: +9 989 0211 52 25, e-mail: prof_sirojiddin@mail.ru, aboboevscp@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2019.10-12.43-51

Referred 25 March 2019 Received in revised form 3 April 2019 Accepted 10 April 2019

The article determines the technological conditions of growing the films of solid solution $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ on GaAs substrates by the method of liquid phase epitaxy from the tin melt-solution. The grown epitaxial films had the thickness of $\sim 10 \mu\text{m}$, n -type conductivity with specific resistances of $\sim 0.1 \Omega\cdot\text{cm}$ and the current carrier concentration of $5.1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Spectral photosensitivity of $n\text{-GaAs} - p\text{-}(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ heterostructures have been studied and two distinct peaks corresponding to Ge nanocrystals with GaAs molecule compounds and ZnSe quantum dots have been detected. It is shown that the photosensitivity spectrum of the studied solid solution has six Gaussian components which correspond to the pair atoms of Ge_2 and compounds AsGe, GaGe, GeSe, AsZn, GaSe and ZnSe. The spatial configurations of tetrahedral bonds within nanoclusters formed by Ge and ZnSe impurities based on a GaAs unit cell are presented. It is also determined that the nanoclusters in the solid solution $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ consist of three As atoms, two Ge atoms and three Ga atoms. Since the unit cell of the lattice with the diamond-like structure consists of eight atoms, the linear dimensions of the nanocluster are 5.6, 5.6, 5.6 Å. In the nanocluster in the solid solution $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ formed by the GaAs molecule, ZnSe and the Ge_2 pair atoms contains 14 atoms: five As atoms, two Ge atoms, one Se atom, one Zn atom, and five Ga atoms. So the As and Ga atoms are bound through the Ge, Zn, and Se atoms, and therefore the linear dimensions of the nanoclusters become 5.6; 5.6; 10 Å. Thus, the matrix lattice consists of GaAs molecules and twin Ge atoms, and ZnSe molecules are located on their surface defective regions. Since zinc selenide molecules and germanium selenide compounds form three acceptor levels in the GaAs valence band, and the ZnSe lattice parameter is slightly larger than the matrix lattice, at ZnSe locations, the lattice microdistortions are observed and they have an increased potential which promotes the formation of ZnSe nanocrystals.

Keywords: gallium; arsenium; germanium; zinc; selenium; solid solution; compound; substrate; heterostructure; epitaxy; photosensitivity; molecule; atom; nanocrystal; valence.



*Сиражиддин
Зайнабидинович
Зайнабидинов
Sirojiddin Zainabidinov*

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики Андижанского государственного университета, академик АН РУз.

Образование: Ташкентский государственный университет им. Мирзо Улугбека (1971 г.).

Область научных интересов: полупроводниковое материаловедение и физические эффекты в легированных полупроводниках и многослойных структурах на их основе.

Публикации: более 200, включая 6 монографий, 6 патентов.
h-index 3; ORCID 0000 0003 2943 5844

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor at Chair of Physics, Andijan State University, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

Education: Tashkent State University, 1971.

Research interests: semiconductor material science and physical effects in doped semiconductors and multilayered structures on their basis.

Publications: more than 200, including 6 monographs, 6 patents.



*Акрамжон Юлдашбоевич
Бобоев
Akramjon Boboev*

Сведения об авторе: младший научный сотрудник, Институт ядерной физики АН РУз.

Образование: Андижанский государственный университет (2011 г.).

Область научных интересов: рентгенография, фазовые переходы, радиационно-индуцированные и фотоэлектрические эффекты в полупроводниковых структурах; взаимодействие примесей в алмазоподобных полупроводниках.

Публикации: более 20.
h-index 1; ORCID 0000 0002 3963 708X

Information about the author: Junior Researcher at Institute of Nuclear Physics of Uzbekistan AS.

Education: Andijan State University, 2011.

Research interests: roentgenography, phase transitions, and radiation-induced and photoelectric effects in semiconductor structures; interaction of impurities in diamond-like semiconductors.

Publications: more than 20.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



Жохонгир Нишонбоевич
Усмонов
Johongir Usmonov

Сведения об авторе: докторант Андижанского государственного университета.

Образование: Андижанский государственный университет (2013 г.)

Область научных интересов: фотоэлектрические эффекты в полупроводниках и полупроводниковых структурах; взаимодействие примесей в алмазоподобных полупроводниках.

Публикации: более 10.
ORCID 0000 0002 7243 4938

Information about the author: Doctoral Student, Andijan State University.

Education: Andijan State University, 2013.

Research interests: photoelectric effects in semiconductors and semiconducting structures; interaction of impurities in diamond-like semiconductors.

Publications: more than 10.

1. Введение

Современные тенденции развития мировой энергетики стимулируют рост интереса к альтернативным источникам энергии. Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), или солнечные элементы, являются наиболее перспективными, экологически чистыми первичными преобразователями энергии и, в отличие от органических и неорганических преобразователей энергии, преобразуют солнечное излучение непосредственно в электроэнергию.

Важными преимуществами такого рода ФЭП по сравнению с фотоэлементами на основе кремния являются более высокий КПД (18,3 % [1] и 15,8–17,1 % [2] соответственно), повышенная радиационная и температурная стабильность, эффективность преобразования концентрированного солнечного излучения. В настоящее время для повышения КПД фотоэлементов ученые все чаще обращаются к полупроводниковым структурам с самоорганизующимися квантовыми точками (КТ) – гетероструктурам с предельным случаем размерного

квантования [3]. Благодаря дискретному энергетическому спектру КТ в принципе появляется возможность решить проблему потерь на термализацию [4]. Управляя размерами, формой КТ и составом матрицы (слой, окружающий КТ), можно контролируемо модифицировать край зоны поглощения дополнительного перехода на КТ [5], что позволит расширить спектральный диапазон чувствительности и увеличить фототок солнечного элемента (СЭ) на КТ при сохранении псевдоморфного роста. В работе [6] показан прирост фототока СЭ на основе GaAs за счет поглощения длинноволнового компонента излучения массивом КТ InGaAs. Однако эффективность использования КТ в качестве поглощающей среды ограничивалась недостаточно высокими значениями коэффициента поглощения вследствие невысокой плотности состояния массива даже при применении нескольких слоев КТ.

В настоящей работе рассматривалась возможность влияния нанокристаллов германия и селенида цинка на фотоэлектрические свойства гетероструктуры $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
ν	Частота света, эВ ($h = 1$)
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
<i>Ga</i>	Галлий
<i>As</i>	Мышьяк
<i>Ge</i>	Германий
<i>Zn</i>	Цинк
<i>Se</i>	Селен
<i>Sn</i>	Олово
<i>GaAs</i>	Арсенид галлия
<i>ZnSe</i>	Селенид цинка
<i>E</i>	Энергия фотона, эВ
<i>h</i>	Постоянная Планка
<i>n</i>	Электронная проводимость
<i>p</i>	Дырочная проводимость
<i>Индексы нижние</i>	
<i>i</i>	Порядковый номер энергетического уровня электрона
<i>ph</i>	Фотон
<i>Аббревиатуры</i>	
КПД	Коэффициент полезного действия
КТ	Квантовая точка
СЭ	Солнечный элемент
ФЭП	Фотоэлектрические преобразователи

2. Образцы и методика эксперимента

Широкозонные непрерывные твердые растворы $p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$ выращивались методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного объема раствора-расплава по технологии, описанной в работе [7]. Эпитаксиальные слои выращивались на монокристаллических GaAs подложках n -типа проводимости, имеющих кристаллографическую ориентацию (100). Состав раствора-расплава был рассчитан по результатам исследований системы GaAs – ZnSe – Ge – Sn [8, 9]. Рост слоев осуществлялся принудительным охлаждением из оловянного раствора-расплава в атмосфере очищенного палладием водорода. Скорость принудительного охлаждения в оптимальном режиме составляла 1 град/мин. Кристаллизация слоев твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ осуществлялась в интервале температур 730–640 °С. Выращенные эпитаксиальные пленки имели в среднем толщину 10 мкм и p -тип проводимости с удельным сопротивлением 0,1 Ом·см и концентрацией основных носителей $5,1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Спектральная зависимость фоточувствительности $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$ гетероструктуры была измерена оптическим спектрометром, оснащенным зеркальным монохроматором фирмы

CARLZEISJENA с кварцевой оптикой, что дало возможность исследовать образцы в диапазоне энергии фотонов от 1эВ до 3 эВ.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 представлена спектральная зависимость фоточувствительности $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$ гетероструктуры при комнатной температуре. На рис. 1 видно, что спектральная фоточувствительность начинается при энергии фотонов 1,16 эВ, а максимальная фоточувствительность наблюдается при 1,38 эВ. В коротковолновой области спектра излучения, начиная с 1,38 эВ, наблюдается монотонный, плавный спад фоточувствительности структуры $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$. Далее наблюдаются четыре пика с максимумами при 1,37 эВ, 1,47 эВ, 1,65 эВ, 1,88 эВ, 2,3 эВ и 2,62 эВ, а также пологий участок при 2,26–2,46 эВ.

Кроме того, исследование фоточувствительности гетероструктур показало заметное перекрытие профилей большинства фотооткликов с различной интенсивностью, которое может быть обусловлено близостью их энергий поглощения.

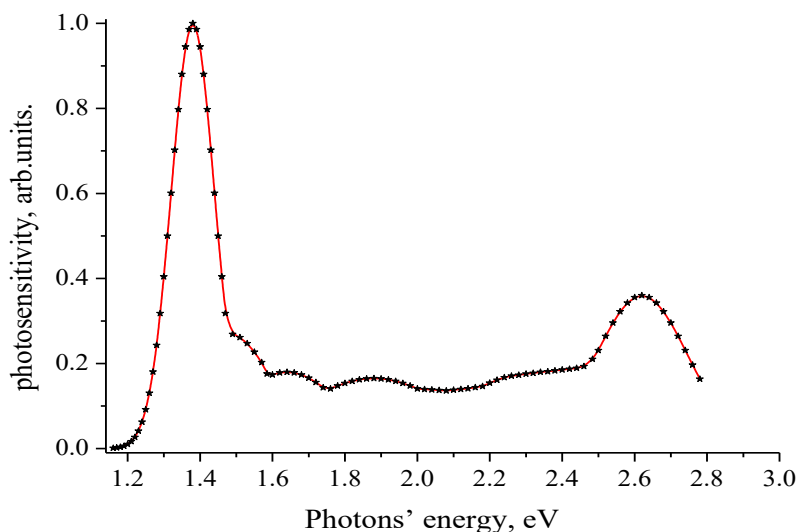


Рис. 1 – Спектральная фоточувствительность $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$ гетероструктур
Fig. 1 – Spectral photosensitivity of $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{0,69}\text{(Ge}_2\text{)}_{0,17}\text{(ZnSe)}_{0,14}$ heterostructures

Для того чтобы глубоко изучить механизмы поглощения энергии, фоточувствительность гетероструктуры оценивалась по программе Wolfram Mathematica 7 в гауссовом приближении – результаты разложены на гауссовы линии. Исходные значения энергий E_i отдельных фотопиков задавались с учетом максимумов поглощения на экспериментальной кривой. В результате выяснилось, что проанализированный спектр можно описать совокупностью шести гауссовых линий со значениями E_i , отвечающими оптимальному совпадению экспериментальной и суммарной аппроксимирующей гауссовых кривых. При этом разброс экспериментальных и таб-

личных значений E_i фотопиков не превышал 0,03 эВ. Все шесть фотопиков, соответствующих гауссовым кривым, наблюдались в интервале энергий фотонов: $E_{ph,1} - 1,076\text{--}1,61$ эВ, $E_{ph,2} - 1,16\text{--}1,75$ эВ, $E_{ph,3} - 1,45\text{--}1,84$ эВ, $E_{ph,4} - 1,48\text{--}2,35$ эВ, $E_{ph,5} - 1,85\text{--}2,78$ и $E_{ph,6} - 2,77\text{--}3$ эВ, и их максимумы выделялись при энергиях 1,37 эВ, 1,47 эВ, 1,65 эВ, 1,88 эВ, 2,3 эВ и 2,62 эВ соответственно (рис. 2).

На рис. 2 приведен спектр первого гауссового компонента (рис. 2, жёлтая кривая), который начинается со значения 1,076 эВ, что, возможно, обусловлено узкозонным компонентом атомов германия, размещенных в узлах галлия. Это создает ковалент-



ную связь с атомами арсенида и образует энергетический уровень мелких доноров [10]. Кроме того, спектр этого компонента резко возрастает, начиная с 1,2 эВ, что свидетельствует об образовании комплексов между рекомбинационными центрами, которые имеют мелкий донорный (As+Ge гантель) и глубокий акцепторный (нанокристалл Ge) энергетические уровни [10]. Это означает, что парные атомы Ge частично замещают некоторые молекулы арсенида галлия в дефектоспособных областях арсенидо-галлиевой решетки, и в этих местах образуются нанокристаллы [12]. Поэтому максимум первого гауссова компонен-

та наблюдается при 1,37 эВ, что связано с шириной запрещенной зоны твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ [13]. Анализ на основе работы авторов [14] показывает, что в арсенид-галлиевых монокристаллах нанокристаллы Ge имеют собственный энергетический уровень с акцепторным характером.

Максимум второго гауссова компонента (рис. 2, зеленая кривая) наблюдается при 1,47 эВ, и этот пик также соответствует рекомбинации из зоны проводимости на акцепторные состояния в *p*-GaAs, что подтверждает фотолюминесценция кристаллов *p*-GaAs при 1,35–1,65 эВ [15].

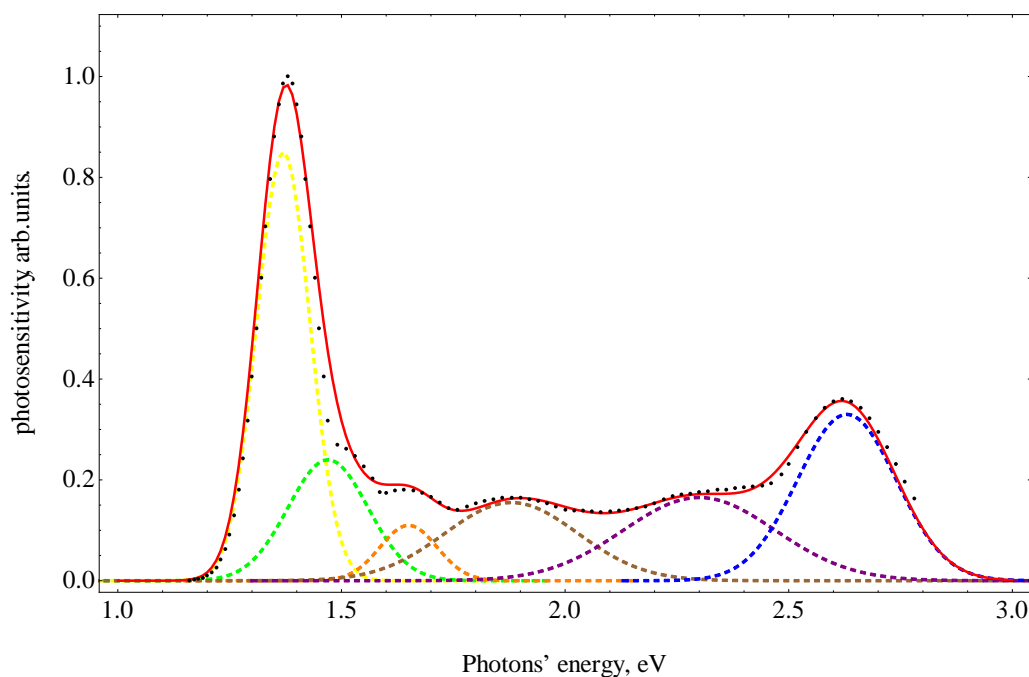


Рис. 2 – Спектр фоточувствительности *n*-GaAs – *p*-(GaAs)_{0.69}(Ge₂)_{0.17}(ZnSe)_{0.14} в гауссовом приближении: экспериментальные точки; сплошная красная кривая – суммы расчетного гауссового спектра; пунктирные кривые – гауссовые компоненты расчетного спектра

Fig. 2 – The photosensitivity spectrum of *n*-GaAs – *p*-(GaAs)_{0.69}(Ge₂)_{0.17}(ZnSe)_{0.14} in the Gaussian approximation: experiment points; solid (continuous) red curve – the sum of the calculated Gaussian spectrum; the dotted curves is the Gaussian components of the calculated spectrum

Максимум третьего гауссового компонента (см. рис. 2, оранжевая кривая) наблюдается при 1,65 эВ, что может быть обусловлено валентно-зонными изо-валентными примесями соединений GeSe в слое GaAs. В работе [16] было показано, что на спектре фотопроводимости слоистого кристалла GeSe наблюдается три чувствительных пика при 1,43 эВ, 1,63 эВ и 2,25 эВ. В экспериментах авторов настоящей статьи также наблюдались все эти три пика: первый пик соответствует второму компоненту гауссовой кривой, находящемуся в длинноволновой области спектра. Второй фотоотклик наблюдался как третий гауссовый компонент при 1,65 эВ.

Следующие три компонента (см. рис. 2, коричневая, фиолетовая и синяя кривые) фотоотклика на этих зависимостях наблюдаются в интервале 1,48 ÷ 3 эВ, и их максимумы соответствуют 1,88 эВ, 2,3 эВ и 2,62 эВ.

Известно [17], что спектр фотолюминесценции поверхности эпитаксиального слоя $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ имеет широкую полосу и охватывает практически весь видимый диапазон спектра излучения от 400 нм до 760 нм. Авторы работы [18] показали, что глубокие уровни обусловлены соединениями GaSe ($h\nu_{\text{max}} = 1,88$ эВ), ZnAs ($h\nu_{\text{max}} = 2,15$ эВ) и ZnSe ($h\nu_{\text{max}} = 2,69$ эВ). В наших экспериментах определены фотоотклики при трех различных энергиях фотонов 1,88 (1) эВ, 2,3 (2) эВ и 2,62 (3) эВ. Незначительная разница между энергией фотона (2) и нашими экспериментальными данными, возможно, обусловлена присутствием соединений атомов GaSe и ZnAs в соответствии с литературными данными [18], а также для фотона (3), соответствующего примеси замещения олова в анионной подрешетке ZnSe. Это следует из данных [19] по энергии ионизации примесного атома олова, оцениваемо-



го ≈ 70 мэВ. Это может быть следствием того, что процесс выращивания твердого раствора $(\text{GaAs})_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$ осуществлялся принудительным охлаждением из оловянного раствора-расплава и, вероятно, тем, что небольшое количество атомов Sn находится на поверхности пленки. Кроме того, анализ рентгеноструктурного исследования данного твердого раствора показал, что нанокристаллиты селенида цинка растут на поверхности твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Ge}_x$ в форме наноостровков – квантовых точек [20].

Для того чтобы объяснить экспериментальные данные фоточувствительности гетероструктуры $n\text{-GaAs} - p\text{-}(\text{GaAs})_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$ и применимости гауссова приближения аппроксимации их спектров, авторы данной статьи исследовали роль компонентов исследуемого твердого раствора.

На рис. 3а и 3б представлены пространственные конфигурации тетраэдрических связей в пределах нанокластеров, образуемых примесями Ge и ZnSe на основе GaAs. Как видно на рис. 3а, нанокластеры

в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)$ охватывают 3 As-Ge, 1 Ge-Ge и 3 Ga-Ge связей, 8 атомов Ga, Ge и As. Так как элементарная ячейка материалов с алмазоподобной структурой состоит из 8 атомов, линейный размер нанокластера $5,6 \text{ \AA}$ почти равняется параметру решетки GaAs. А в нанокластере в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)(\text{ZnSe})_y$, образованном молекулами GaAs, ZnSe и парными атомами Ge (рис. 3б) находится 14 атомов, 2 As-Ge, 1 Ge-Ge, 3 Ga-Ge, 1 Ge-Se, 3 As-Zn, 1 Zn-Se и 2 Ga-Se связей, то есть атомы As и Ga заменяются атомами Zn и Se, поэтому линейные размеры нанокластеров изменяются на $5,6 \text{ \AA}$ $5,6 \text{ \AA}$ 10 \AA . Таким образом, в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)$ образование нанокластеров такого типа, как показано на рис. 3а, происходит относительно легко по сравнению с образованием нанокластеров такого типа, как показано на рис. 3б. Поэтому в этом случае матричная решетка состоит из молекул GaAs и парных атомов Ge, а молекулы ZnSe находятся в поверхностных дефектоспособных областях матричной решетки.

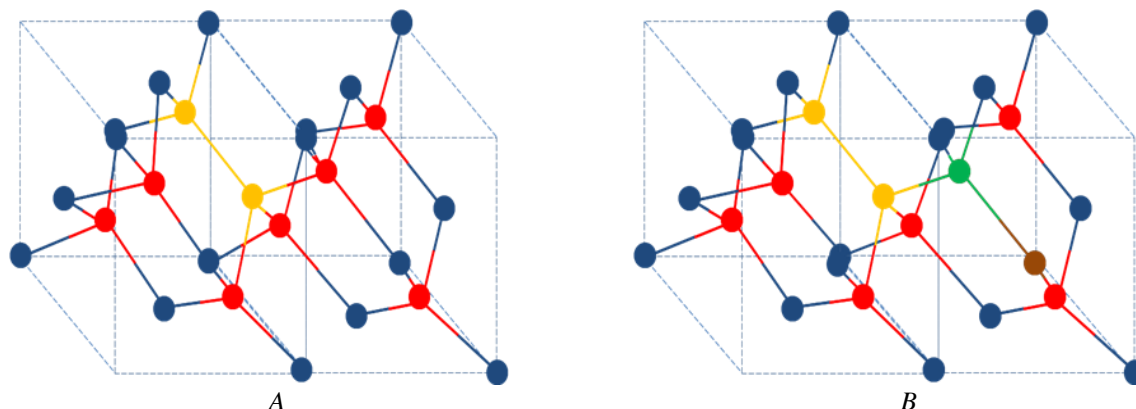


Рис. 3 – Пространственная конфигурация тетраэдрических связей молекул непрерывных твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ (а) и $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ (б):

- – As;
- – Ga;
- – Se;
- – Ge;
- – Zn

Fig. 3 – Spatial configuration of tetrahedral bonds of molecules of continuous solid solutions $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ (a) and $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ (b):

- – As;
- – Ga;
- – Se;
- – Ge;
- – Zn

Нанокластеры Ge в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ содержат три вида межатомных As-Ge, Ge-Ge и Ga-Ge связей, по этой причине число энергетических уровней равно трем. Парные атомы Ge_2 , размещаясь в узлах галлия, играют роль простых мелких доноров, а в узлах мышьяка – роль акцепторов [21]. Помимо этого, атомы Ge образуют нанокристаллиты в дефектоспособных областях матричной решетки, и они тоже имеют собственный энергетический уровень. В работе [22] авторы предположили, что число энергетических уровней нанокластера равняется количеству видов межатомных связей. В нашем случае ширина запрещенной зоны соединения парных атомов Ge_2 меньше, чем шири-

на запрещенной зоны GaAs, также они являются запрещенно-зонными изовалентными примесями, и их уровни находятся в пределах запрещенной зоны GaAs (рис. 4а). А нанокластеры ZnSe в поверхностных дефектоспособных областях матричной решетки твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ содержат межатомные связи с GaAs и Ge_2 и вносят по четыре уровня в энергетической зоне GaAs. Однако ширина запрещенной зоны ZnSe и его примесных комплексов больше, чем ширина запрещенной зоны GaAs, поэтому их уровни располагаются в валентной зоне (рис. 4б) и являются валентно-зонными изовалентными примесями.

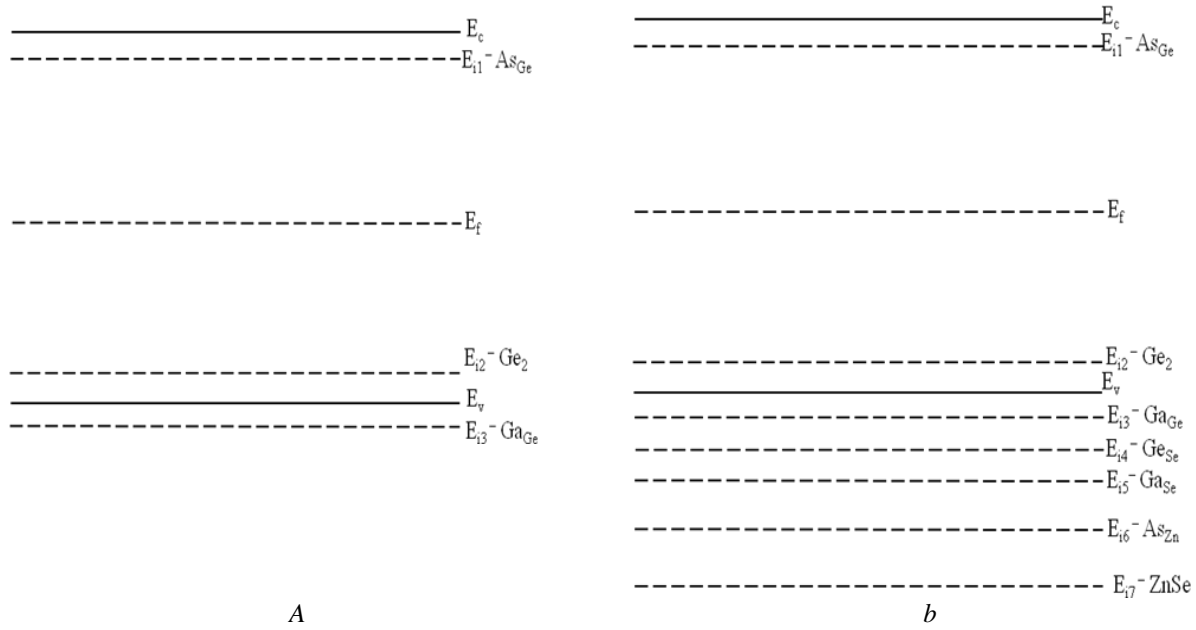


Рис. 4 – Количество и расположение энергетических уровней нанокластеров в твердом растворе:

а – $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ и б – $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$
 Fig. 4 – Quantities and locations of the energy levels of nanoclusters in the solid solution
 $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ (a) and $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ (b)

Поскольку молекулы селенида цинка и соединения селенида германия дают три акцепторных уровней в валентной зоне GaAs, а параметр решетки ZnSe незначительно больше параметра матричной решетки, на местах расположения ZnSe наблюдаются микроискажения в решетке, и такие места обладают высоким потенциалом, что способствует образованию нанокристаллов ZnSe.

4. Заключение

Наличие атомов Ge и молекул ZnSe в тетраэдрической решетке GaAs свидетельствует о том, что в ее спектре fotocувствительности наблюдаются два явных пика, которые принадлежат нанокристаллам Ge, объединенным с молекулами GaAs и квантовыми точками ZnSe. Результаты анализа спектров fotocувствительности $n\text{-GaAs} - p\text{-}(\text{GaAs})_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$ гетероструктур с помощью программы Wolfram Mathematics 7 показали, что в спектре общей гауссовой линии имеется крайняя длинноволновая область с энергией фотонов 1,076 эВ и шести компонентов, которые соответствуют парным атомам Ge_2 и соединениям AsGe, GaGe, GeSe, AsZn, GaSe и ZnSe. Это подтверждается образованием соответствующих энергетических уровней, связанных с такими соединениями в запрещенной и валентной зонах арсенида галлия. Данные твердые растворы могут быть использованы как фотоактивный материал для селективного фото-

приемника, работающего в ближней ИК и видимой областях спектра излучения.

Благодарности

Авторы благодарны д-р физ.-мат. наук Саидову А.С. за проведение экспериментальных исследований по спектральной fotocувствительности гетероструктур.

Работа выполнена по гранту № Ф2-68 Комитета по координации и развитию науки и технологии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Acknowledgments

The authors were grateful to Dr. Sc. Saidov A.S. for conducting experimental studies on the spectral photosensitivity of heterostructures.

The work was performed under grant number F2-68 of the Committee for the Coordination and Development of Science and Technology under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan.

Список литературы

- [1] Блохин, С.А. Фотоэлектрические преобразователи AlGaAs/GaAs с массивом квантовых точек InGaAs / С.А. Блохин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – Вып. 4. – С. 537–542.
- [2] Мукашев, Б.Н. Исследования процессов получения кремния и разработка технологий изготовления солнечных элементов / Б.Н. Мукашев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49. – Вып. 10. – С. 1421–1428.
- [3] Saidov, A.S. Peculiarities of Photosensitivity of $n\text{-}(\text{GaAs})\text{-}p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{Ge}_2)_y$ Structures with

Quantum Dots / A.S. Saidov [et al.] // Applied Solar Energy. – 2015. – Vol. 51. – Iss. 3. – P. 206–208.

[4] Aroutiounian, V. Quantum dot solar cells / V. Aroutiounian [et al.] // Appl. Phys. – 2001. – No. 89. – P. 2268.

[5] Ledentsov, N.N. Quantum dot heterostructures: fabrication, properties, lasers / N.N. Ledentsov [et al.] // Fiz. Tekh. Poluprovodn. – 1998. – No. 32. – P. 385.

[6] Saidov, A.S. Growth of solid solutions of replacement $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ and $(\text{GaAs})_{0.76}(\text{ZnSe})_{0.15}(\text{Ge}_2)_{0.09}$ / A.S. Saidov, A.Y. Boboev // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Perspectives” November 10–11, 2016. – P. 178–180.

[7] Zainabidinov, A.S. Growth, Structure, and Properties of GaAs-Based $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ Epitaxial Films / A.S. Zainabidinov [et al.] // Semiconductors. – 2016. – Vol. 50. – No. 1. – P. 59–65.

[8] Саидов, А.С. Жидкостная эпитаксия компенсированных слоев арсенида галлия и твердых растворов на его основе / А.С. Саидов, М.С. Саидов, Э.А. Кошчанов. – Ташкент: Издательство «Фан», 1986. – С. 127.

[9] Хлудков, С.С. Диффузия примесей в арсениде галлия, диффузионные структуры и приборы / С.С. Хлудков // Вестник Томского государственного университета общенаучный периодический журнал. – 2005. – № 285. – С. 84–94.

[10] Журавлев, К.С. Исследование комплексообразования в эпитаксиальном сильно легированном р-GaAs :Ge методом фотолюминесценции / К.С. Журавлев [и др.] // ФТП. – 1990. – Т. 24. – Вып. 9. – С. 1645–1649.

[11] Zainabidinov, S. Structural characteristics of n-GaAs – p- $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ heterostructures / S. Zainabidinov, M. Kalanov, A. Boboev // Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 13–14 июня 2017 г. – С. 107–110.

[12] Бобоев, А.Й. Электрические и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ / А.Й. Бобоев [и др.] // УФЖ. – 2015. – Вып. 17. – № 4. – С. 218–224.

[13] Aleshkin, Ya. Direct band Ge and Ge/InGaAs quantum wells in GaAs/ Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov // J. Appl. Phys. – 2011. – Vol. 109. – No. 123. – P. 107.

[14] Полушина, И.К. Электрические и люминесцентные свойства монокристаллов $\text{GaAs}-\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{IV}}\text{C}^{\text{V}}_2$ / И.К. Полушина, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь // ФТП. – 1999. – Т. 33. – Вып. 6. – С. 697–700.

[15] Блецкан, Д.И. Влияние отклонения от стехиометрии и легирования на спектры фотопроводимости слоистых кристаллов GeSe / Д.И. Блецкан, Й.Й. Мадяр, В.Н. Кабаций // ФТП. – 2006. – Т. 40. – Вып. 2. – С. 142–147.

[16] Саидов, А.С. Выращивание пленок твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ и исследование их структурных и некоторых фотоэлектрических свойств /

А.С. Саидов [и др.] // ФТП. – 2011. – Т. 53. – Вып. 10. – С. 1910–1919.

[17] Супрун, С.П. Эпитаксия ZnSe на GaAs при использовании в качестве источника соединения ZnSe / С.П. Супрун, В.Н. Шерстякова // ФТП. – 2009. – Т. 43. – Вып. 11. – С. 1570–1575.

[18] Ткаченко, И.В. Механизм дефектообразования та люминесценции у бездомишковых и легированных теллуром кристаллах селениду цинку / И.В. Ткаченко // Дис. канд. физ.-мат. наук, 2005. – 136 с.

[19] Зайнабидинов, С.З. Высокорастворимые рентгенодифракционное исследования пленок твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ / С.З. Зайнабидинов // ДАНРУз. – 2015. – No. 3. – С. 18–21.

[20] Случанская, И.А. Основы материаловедения и технологии полупроводников / И.А. Случанская. – М.: Мир, 2002. – С. 380.

[21] Саидов, М.С. Твердые растворы многокомпонентных полупроводниковых соединений с нанодофектами и примесные вольтаические эффекты в фотоэлементах / М.С. Саидов // Гелиотехника. – 2006. – No. 4. – С. 48–54.

References

[1] Blokhin S.A., Sakharov A.V., Nadtochy A.M., Pauysov A.S., Maximov M.V., Ledentsov N.N., Kovsh A.R., Mikhlin S.S., Lantratov V.M., Mintairov S.A., Kaluzhniy N.A., Shvarts M.Z. AlGaAs/GaAs Photovoltaic Cells with an Array of InGaAs QDs (Fotoelektricheskie preobrazovateli AlGaAs/GaAs s massivom kvantovyh toчек InGaAs). *Physics and Technics of Semiconductors (PhTS) (Fizika i tehnika poluprovodnikov)*, 2009;43(4):537–542 (in Russ.).

[2] Mukashev B.N., Betekbaev A.A., Kalygulov D.A., Pavlov A.A., Skakov D.M. Investigation of processes of silicon production and technology development manufacturing of solar cells (Issledovaniya protsessov polucheniya kremniya i razrabotka tehnologii izgotovleniya solnechnyh elementov). *Physics and Technics of Semiconductors (PhTS) (Fizika i tehnika poluprovodnikov)*, 2015;49(10):1421–1428 (in Russ.).

[3] Saidov A.S., Zainabidinov S.Z., Kalanov M.U., Boboev A.Y., Kutlimurotov B.R. Peculiarities of Photosensitivity of n(GaAs)–p(GaAs) $_{1-x-y}$ (ZnSe) $_x$ (Ge $_2$) $_y$ Structures with Quantum Dots. *Applied Solar Energy*, 2015;51(3):206–208.

[4] Aroutiounian V., Petrosyan S., Khachatryan A., Touryan K. Quantum dot solar cells. *Journal of Applied Physics*, 2001;(89):268–2271.

[5] Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Shchukin V.A., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Bimberg D. Quantum dot heterostructures: fabrication, properties, lasers (Geterostruktury s kvantovymi tochkami: poluchenie, svoistva, lazery). *Physics and Technics of Semiconductors (PhTS) (Fizika i tehnika poluprovodnikov)*, 1998;32(4):385–410 (in Russ.).

[6] Saidov A.S., Boboev A.Y. Growth of solid solutions of replacement $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ and



(GaAs)_{0.76}(ZnSe)_{0.15}(Ge₂)_{0.09}. *The International Symposium "New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Perspectives"* November 10–11, 2016; pp. 178–180.

[7] Zainabidinov S.Z., Saidov A.S., Leiderman A.Yu., Kalanov M.U., Usmonovand Sh.N., Boboev A.Yu. Growth, Structure, and Properties of GaAs-Based (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y Epitaxial Films. *Semiconductors*, 2016;50(1):59–65.

[8] Saidov A.S., Saidov M.S., Koshchanov E.A. *Liquid-Phase Epitaxy of Compensated Layers of Gallium Arsenide and Solid Solutions on Its Base (Zhidkostnaya epitaksiya kompensirovannykh sloev arsenidagalliya i tverdyh rastvorov na ego osnove)*. Fan, Tashkent, 1986; p. 127 (in Russ.).

[9] Khludkov S.S. Diffusion of impurities in gallium arsenide, diffusion structures and devices (Diffuziya primesei v arsenidagalliya, diffuzionnye struktury i pribory). *Bulletin of Tomsk State University (Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2005;(285):84–94 (in Russ.).

[10] Zhuravlev K.S., Chikichev S.I., Shtaske R., Yakusheva N.A. Investigation of complexation in epitaxial heavily doped p-GaAs:Ge by photoluminescence method (Issledovanie kompleksobrazovaniya v epitaksial'nom sil'no legirovannom p-GaAs:Ge metodom fotolyuminesstentsii). *Physics and Technics of Semiconductors (PhTS)(Fizika i tehnika poluprovodnikov)*, 1990;24(9):1645–1649 (in Russ.).

[11] Zainabidinov S., Kalanov M., Boboev A. Structural characteristics of n-GaAs – p-(GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y heterostructures. *International Conference "Fundamental and Applied Problems of Physics" (Mezhdunarodnaya konferentsiya "Fundamental'nye i prikladnye voprosy fiziki")*, June 13–14, 2017; pp. 107–110 (in Russ.).

[12] Boboev A.Yu., Zainabidinov S.Z., Saidov A.S., Kalanov M.U. Electrical and Photoelectric Properties of Epitaxial films (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y (Elektricheskie i fotoelektricheskie svoystva epitaksial'nyh plenok (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y). *Uzbek Journal of Physics (UJPh)*, 2015;17(4):218–224 (in Russ.).

[13] Aleshkin Ya., Dubinov A.A. Direct band Ge and Ge/InGaAs quantum wells in GaAs. *Journal of Applied Physics (J. Appl. Phys.)*, 2011;109(12):107.

[14] Polushina I.K., Rud' V.Yu., Rud' Yu.V. Electrical and photoluminescence properties of GaAs–A^{II}B^{IV}C^V₂ single crystals (Elektricheskie i lyuminesstentnye svoystva monokristallov GaAs–A^{II}B^{IV}C^V₂). *Physics and Technics of Semiconductors (PhTS)(Fizika i*

tehnika poluprovodnikov), 1999;33(6):897–700 (in Russ.).

[15] Bletskan D.I., Madyar J.J., KabaciyV.N. Influence of the deviation from stoichiometry and the doping of GeSe layered crystals on their photoconductivity spectra (Vliyanie otkloneniya ot stehiometrii i legirovaniya na spektry fotoprovodimosti sloistyh kristallov GeSe). *Physics and Technics of Semiconductors (PhTS)(Fizika i tehnika poluprovodnikov)*, 2006;40(2):142–147 (in Russ.).

[16] Saidov A.S., Saidov M.S., Usmonov Sh.N., Leiderman A.Yu., Kalanov M.U., Gaimnazarov K.G., Kurmantaev A.N. Growth of (GaAs)_{1-x}(ZnSe)_x solid solution films and investigation of their structural and some photoelectric properties (Vyrashchivanie plenok tverdogo rastvora (GaAs)_{1-x}(ZnSe)_x i issledovanie ih strukturnykh i nekotorykh fotoelektricheskikh svoystv). *Physics of the Solid State (PhSS)(Fizika tverdogo tela)*, 2011;53(10):1910–1919 (in Russ.).

[17] Suprun S.P., Sherstyakova V.N., FedosenkoE.V. Epitaxy of ZnSe on GaAs from ZnSe compound source (Epitaksiya ZnSe na GaAs pri ispol'zovanii v kachestve istochnika soedineniya ZnSe). *Physics and Technics of Semiconductors (PhTS)(Fizika i tehnika poluprovodnikov)*, 2009;43(11):1526–1531 (in Russ.).

[18] Tkachenko I.V. Mechanism of the Defecting of Luminescence in homeless and Tellurium-doped Crystals of Zinc Selenium (*Mehanizm defektoutvorenniya lyuminesstentsii ta bezdomishkovih i legirovanih tellurom kristallah selenidu tsinku*). Dis. Ph.D., 2005:136 (in Ukr.).

[19] Zaynabidinov S.Z., Saidov A.S., Kalanov M.U., Boboev A.Y. High-resolution X-ray diffraction studies of (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y solid solution films (Vysokorazreshayushhie rentgenodifraktsionnye issledovaniya plenok tverdyh rastvorov (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y). *Reports of the AS RUz (RASRUz)(DAN RUz)*, 2015;(3):18–21 (in Russ.).

[20] Sluchansky I.A. Fundamentals of materials science and semiconductor technology (Osnovy materialovedeniya i tehnologii poluprovodnikov). Moscow: Mir Publ., 2002; p. 380 (in Russ.).

[21] Saidov M.S. Solid solutions of multicomponent semiconductor compounds with nano-defects and impurity voltaic effects in photovoltaic cells (Tverdye rastvory mnogokomponentnykh poluprovodnikovoyh soedinenii s nano-defektami i primesnye vol'taicheskie efekty v fotoelementah). *Geliotekhnika (Geliotekhnika)*, 2006;(4):48–54 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

