

**Фотоэлектрические характеристики гетероструктуры  $n\text{-GaAs} - p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}_y$** **И.М. Солиев**

Андижанский государственный педагогический институт, г. Андижан, Узбекистан

**Аннотация.**

В статье приведены экспериментальные данные по исследованию фотоэлектрических свойств гетероструктуры  $n\text{-GaAs} - p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}_y$  с различными нановключениями, выращенной методом жидкофазной эпитаксии. Фоточувствительность данной гетероструктуры проявляется в виде трёх основных пиков при энергиях фотонов 1,61; 1,97 и 2,63 эВ. Подробный анализ спектров показал, что центральный пик с наибольшей интенсивностью имеет сложное строение, что позволило выделить дополнительный четвёртый пик в диапазоне 2,1–2,3 эВ. Установлено, что обнаруженные пики связаны с энергетическими спектрами нанокристаллов германия, формирующихся на границах субкристаллитов плёнки, а также с квантовыми ямами  $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ , возникающими в приповерхностной области эпитаксиального слоя.

**Ключевые слова** Спектральная фоточувствительность, примесь, твёрдый раствор, атомное соединение, гетероструктуры, нанокристалл, квантовая яма.

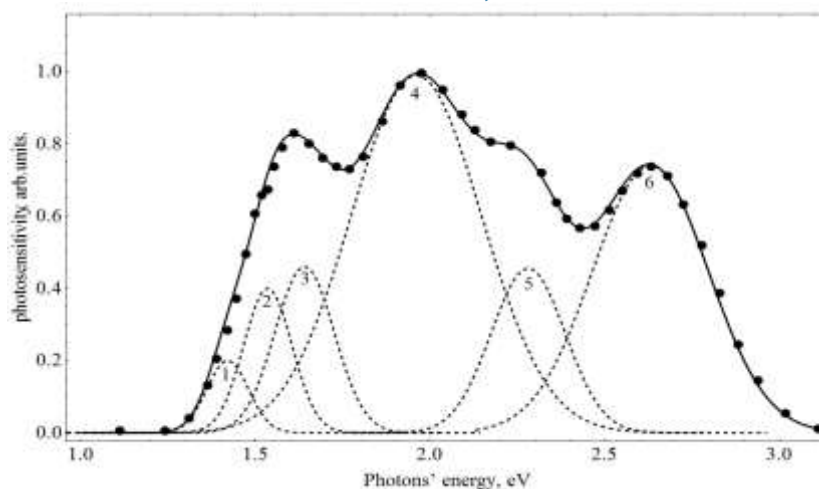
**Введение.** Развитие энергетики усилило интерес к экологически чистым технологиям получения энергии, в частности к фотоэлектрическим преобразователям для создания эффективных солнечных элементов [1]. Наиболее результативные из них изготавливаются из полупроводниковых твёрдых растворов на основе соединений АIII–BV и АII–BVI. Одной из ключевых проблем остаются потери энергии при поглощении суб- и надзонных фотонов и термализации носителей [2]. Для повышения эффективности и долговечности применяются многокомпонентные варизонные солнечные элементы, которые обладают преимуществами перед традиционными материалами, но имеют и недостатки [3,4]. Перспективным направлением является создание варизонных элементов на основе гетероструктур  $\text{GaAs/Ge/ZnSe}$  и  $\text{GaAs/Si/ZnSe}$ .

**Методика эксперимента**

Для выращивания эпитаксиальных плёнок  $(\text{ZnSe})_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}_y$  на подложках GaAs нами был использован метод жидкофазной эпитаксии из ограниченного объёма раствора-расплава. Исследованные плёнки выращивались в температурном интервале кристаллизации 750–650 °С при скорости охлаждения подложки 1 °С/мин. Полученные эпитаксиальные плёнки  $(\text{ZnSe})_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}_y$  обладали дырочным типом проводимости с подвижностью носителей заряда 357 см<sup>2</sup>/(В·с) и концентрацией  $p = 5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

Измерения спектральной зависимости фототока проводились с применением ксеноновой лампы ДКС и монохроматора с ксеноновой лампой ДКС в диапазоне длин волн 1,2–2,65 эВ (0,47–1,03 мкм). Полученные спектральные данные для гетероструктуры  $n\text{-GaAs} - p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}_y$  были обработаны и визуализированы с помощью программного обеспечения OriginPro2022.

**Экспериментальные результаты и их обсуждения**



**Рис.1.** Спектр fotocувствительности гетероструктуры  $n\text{-GaAs} - p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$  в гауссовом приближении. – экспериментальные точки; сплошная кривая соответствует суммарному спектру полученных из гауссовских пиков; пунктирные кривые – гауссовские компоненты расчетного спектра;

На рис. 1 (кривая 1) показан спектр первой гауссовой компоненты, начинающийся при 1,2 эВ и связанный с атомами Bi, замещающими As в решётке GaAs и формирующими донорные уровни. Максимум этой компоненты соответствует 1,39 эВ. Согласно [5, 6], при увеличении концентрации Bi ширина запрещённой зоны  $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$  уменьшается, а в валентной зоне появляются новые дефектные полосы. Валентные зоны формируются орбиталями As-4p и Bi-6p, зоны проводимости – гибридными орбиталями As и Ga (4s/4p), а вклад Bi-6s/6p становится заметным при  $\delta > 3,1\%$ .

Кроме того, показано [7], что атомы Ge в дефектных областях замещают молекулы ZnSe, образуя нанокристаллы с акцепторными уровнями. Вторая гауссовая компонента (рис. 1, кривая 2) имеет максимум при 1,53 эВ и обусловлена рекомбинацией электронов из зоны проводимости в акцепторные состояния  $p\text{-GaAs}$ , что согласуется с данными фотолюминесценции (1,35–1,65 эВ) [8].

Максимум третьей гауссовой компоненты спектра (рис. 1, кривая 3) наблюдается при энергии 1,64 эВ, что может быть обусловлено наличием валентных зон, связанных с изовалентными примесями соединений Ge–Se в слое GaAs. В работе [9] показано, что в спектре фотопроводимости слоистых кристаллов Ge–Se наблюдаются три чувствительных пика при энергиях 1,43; 1,63 и 2,25 эВ. В наших экспериментах также были зарегистрированы все эти три пика. Первый пик накладывается на вторую гауссовую компоненту в длинноволновой области спектра, а второй пик соответствует третьей гауссовой компоненте при энергии 1,64 эВ.

Следующие три гауссовые компоненты (рис. 1, кривые 4, 5 и 6) фотоотклика наблюдаются в диапазоне энергий фотонов от 1,48 до 3 эВ с максимумами при энергиях 1,92; 2,28 и 2,63 эВ соответственно. Известно, что спектр фотолюминесценции поверхности эпитаксиального слоя  $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$  характеризуется широкой полосой и охватывает практически весь видимый диапазон (400–760 нм). Авторы работы [10] показали, что глубокие энергетические уровни обусловлены соединениями Ga–Se ( $h\nu_{\text{max}} = 1,88$  эВ), Zn–As ( $h\nu_{\text{max}} = 2,15$  эВ) и Zn–Se ( $h\nu_{\text{max}} = 2,69$  эВ).

В наших экспериментах были выявлены пики фотоотклика при энергиях фотонов 1,92; 2,3 и 2,63 эВ. Незначительное отклонение энергии второго пика (2,3 эВ) может быть

связано с присутствием атомов GaSe и ZnAs. Разница в энергии третьего пика (2,63 эВ) обусловлена замещением атомами Bi в анионной подрешётке Zn–Se, которые имеют энергию ионизации примерно 56 мэВ. Это явление может быть вызвано особенностями процесса выращивания твёрдого раствора  $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$  с принудительным охлаждением из висмутосодержащего раствора-расплава, вследствие чего небольшое количество атомов Bi остаётся на поверхности плёнки [11].

#### Заключение

Следует отметить, что компоненты гетероструктуры формируются в виде твердого раствора с различным составом из двухкомпонентных молекул GaAs и Ge<sub>2</sub>, GaAs и ZnSe, Ge<sub>2</sub> и ZnSe. Различие ковалентных радиусов исследованных компонентов и параметров решетки не превышает 0.2%. Спектр фоточувствительности *n*-GaAs – *p*-(ZnSe)<sub>1-x-y</sub>(Ge<sub>2</sub>)<sub>x</sub>(GaAs<sub>1-δ</sub>Bi<sub>δ</sub>)<sub>y</sub> гетероструктуры, проанализирован с помощью программы Wolfram Mathematics 7 с использованием шести гауссовских линий с заданными пиками  $E_i$  для повышения адекватности аппроксимирующего спектра с экспериментальными данными. В результате было обнаружено, что анализируемый спектр может быть охарактеризован набором из шести гауссовых линий со значениями  $E_i$ , соответствующими оптимальному совпадению экспериментальных и общих аппроксимирующих гауссовых кривых. Все шесть фотопиков, соответствующие гауссовым кривым наблюдались в интервале энергий фотонов:

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Блохин С.А., Сахаров А.В., Надточий А.М. и др. Фотоэлектрические преобразователи AlGaAs/GaAs с массивом квантовых точек InGaAs. *Физика и техника полупроводников*. 2009, том 43, № 4, с. 537-542; DOI: 10.1134/S1063782609040204
- [2] Андреев В.М., Хвостиков В.П., Ларионов В.Р. и др. Высокоэффективные концентраторные (2500 солнц) AlGaAs/GaAs-солнечные элементы. *Физика и техника полупроводников* 1999, том 33, №. 9, с.1070-1072.
- [3] Kunrun Lu. Comparison and Evaluation of Different Types of Solar Cells. *Applied and Computational Engineering* 2023, Vol. 23, Iss.1, p. 263-270; DOI:10.54254/2755-2721/23/20230664
- [4] Anup B., Bishweshwar P., Gunendra P. O., Jiwan A., Mira P., Prem S.S. Novel Materials in Perovskite Solar Cells: Efficiency, Stability, and Future Perspectives. *Nanomaterials*, 2023, Vol. 13, Iss. 11, p. 1724; <https://doi.org/10.3390/nano13111724>
- [5] Lifei Yu, et.al. First Principles Study on Electronic Structure and Optical Properties of Ternary GaAs:Bi Alloy. *Materials* 2012, vol. 5, no 12, p. 2486-2497; <https://doi.org/10.3390/ma5122486>.
- [6] Li, D.C., Yang, M., Zhao, S.Z., Cai, Y.Q., Feng, Y.P. First principles study of Bismuth alloying effects in GaAs saturable absorber. *Opt. Express* 2012, Vol. 20, p. 11574–11580;
- [7] Володин В.А. и др. Фотолюминесценция структур с нанокристаллами германия, сформированных в матрице арсенида галлия методом имплантации ионов германия. *Физика и техника полупроводников*, 2008, том 42, №6, с. 645–649.
- [8] Супрун, С.П., Шерстякова, В.Н., Федосенко, Е.В. Эпитаксиальный рост ZnSe на GaAs с использованием соединения ZnSe в качестве источника. *Физика и техника полупроводников*, 2009, том 43, с. 1526–1531 <https://doi.org/10.1134/S1063782609110220>

[9] Zainabidinov S.Z., Boboev A.Y., Karimov I.N., Mansurov Kh.Zh., Abdurahimov D.P. Structure and electrophysical properties of a solid solution  $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ . *Scientific bulletin Physical and Mathematical Research*, Vol. 4, No 1, p. 15-21, 2022.

[10] Vurgaftman, I., Meyer, J.R., & Ram-Mohan, L.R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, **89**(11), 5815–5875 (2001). <https://doi.org/10.1063/1.1368156>

[11] Oe, K., & Okamoto, H. New semiconductor alloy  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$  grown by metalorganic vapor phase epitaxy. *Japanese Journal of Applied Physics*, **37**(Part 2, No. 1A/B), L128–L130 (1998). <https://doi.org/10.1143/JJAP.37.L128>

