

УДК 538.935  
DOI: 10.7868/S25000640250304

## ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ВАРИЗОННЫХ СЛОЯХ AlGaInAsP(InAs) В ПРОЦЕССЕ ЗОННОЙ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

© 2025 г. М.Л. Лунина<sup>1</sup>, Л.С. Лунин<sup>1,2</sup>, А.В. Донская<sup>2</sup>

**Аннотация.** Методом жидкофазной градиентной эпитаксии получены слои  $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}_z\text{P}_{1-z}$ , легированные теллуром с толщинами 500–1000 мкм при температурах синтеза 800–900 °С. Путем травли поверхности варизонных слоев при слабом магнитном поле с напряженностью  $H = 2,4 \cdot 10^5$  А/м определены коэффициенты Холла. Методом Рунге – Кутты рассчитана и построена зависимость распределения содержания основных носителей заряда по толщине слоев.

При движении нелегированной жидкой зоны Al – Ga – As – P – In в прямом направлении источником служит InAs : Te, а при движении легированного теллуром раствора-расплава в обратном направлении источником является варизонный кристалл AlGaInAsP. По этой причине, а также из-за большого значения коэффициента диффузии теллура после прохода зоны в обратном направлении выравнивание содержания примеси Te в слое отсутствует.

Вследствие высокого коэффициента диффузии алюминия и фосфора обсуждены особенности перераспределения данных компонентов в варизонных слоях AlGaInPAs, выращенных на подложках InAs. Высокая концентрация атомов Al и P в слоях, прилегающих к гетерогранице, диффузия Te из InAs в слой в процессе роста гетероструктуры способствуют более высокой глубине очистки слоя AlGaInPAs от примесей теллура в сравнении со слоями подложечного материала. Понижение концентрации основных носителей заряда в слое вблизи подложки, вероятно, обусловлено структурными дефектами на границе слой – подложка.

**Ключевые слова:** перекристаллизация, движение раствора-расплава, тонкие пленки, AlGaInAsP, твердые растворы, варизонная структура, легирование, теллур.

### REDISTRIBUTION OF IMPURITIES IN GRADED-GAP LAYERS OF AlGaInAsP(InAs) IN THE PROCESS OF ZONE RECRYSTALLIZATION

M.L. Lunina<sup>1</sup>, L.S. Lunin<sup>1,2</sup>, A.V. Donskaya<sup>2</sup>

**Abstract.** The liquid-phase gradient epitaxy method was used to obtain  $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}_z\text{P}_{1-z}$  layers doped with tellurium with thicknesses of 500–1000 μm at synthesis temperatures of 800–900 °C. The Hall coefficients were determined by etching the surface of graded-gap layers at a weak magnetic field with a strength of  $H = 2.4 \cdot 10^5$  A/m. The dependence of the distribution of the content of the majority charge carriers over the thickness of the layers was calculated and plotted using the Runge-Kutta method.

When the undoped liquid zone of Al – Ga – As – P – In moves in the forward direction, its source is InAs : Te, and when the solution-melt doped with tellurium moves in the opposite direction, the source is the graded-gap crystal of AlGaInAsP. For this reason, as well as because of the high value of the tellurium diffusion coefficient, after passing the zone in the opposite direction, there is no equalization of the Te impurity content

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: MarinaSchaz@rambler.ru

<sup>2</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation), Российская Федерация, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, e-mail: lunin\_ls@mail.ru

in the layer. Due to the high diffusion coefficient of aluminum and phosphorus, the features of the redistribution of these components in the graded-gap layers of AlGaInPAs grown on InAs substrates are discussed. The high concentration of Al and P atoms in the layers adjacent to the heterointerface, the diffusion of Te from InAs into the layer during the growth of the heterostructure contribute to a higher cleaning depth of the AlGaInPAs layer from tellurium impurities in comparison with the layers of the substrate material. A decrease in the concentration of the majority charge carriers in the layer near the substrate is probably due to structural defects at the layer-substrate boundary.

**Keywords:** recrystallization, solution-melt movement, thin films, AlGaInAsP, solid solutions, graded-gap structure, doping, tellurium.

1. Jung B.O., Lee W., Kim J., Choi M., Shin H.-Y., Joo M., Jung S., Choi Y.-H., Kim M.J. 2021. Enhancement in external quantum efficiency of AlGaInP red  $\mu$ -LED using chemical solution treatment process. *Scientific Reports*. 11(1): 4535. doi: 10.1038/s41598-021-83933-3
2. Xu Y., Liu R., Ma L., Li D., Yang Y., Dai G., Wan Q. 2016. Fabrication of GaInPSb quaternary alloy nanowires and its room temperature electrical properties. *Applied Physics A*. 123(1): 6. doi: 10.1007/s00339-016-0590-x
3. Нгуен Т.Д., Ким Д.О., Ли С.Д. 2022. Выращивание соединенных InGaAsSb/GaSb для инфракрасных оптоэлектронных приборов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 24(2): 250–255. doi: 10.17308/kcmf.2022.24/9265
4. Shoji Y., Oshima R., Makita K., Ubukata A., Sugaya T. 2023. 1.5 eV GaInAsP solar cells grown via hydride vapor-phase epitaxy for low-cost GaInP/GaInAsP/Si triple-junction structures. *Advanced Energy and Sustainability Research*. 4(5): 2200198–2200205. doi: 10.1002/aesr.202370010
5. Лунин Л.С., Лунина М.Л., Алфимова Д.Л., Пашченко А.С., Яковенко Н.А., Пашченко О.С. 2021. Варизонные гетероструктуры  $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}_z\text{As}_{1-z}/\text{GaAs}$  для фотоэлектрических преобразователей. *Письма в журнал технической физики*. 47(20): 27–30. doi: 10.21883/PJTF.2021.20.51610.18907
1. Jung B.O., Lee W., Kim J., Choi M., Shin H.-Y., Joo M., Jung S., Choi Y.-H., Kim M.J. 2021. Enhancement in external quantum efficiency of AlGaInP red  $\mu$ -LED using chemical solution treatment process. *Scientific Reports*. 11(1): 4535. doi: 10.1038/s41598-021-83933-3
2. Xu Y., Liu R., Ma L., Li D., Yang Y., Dai G., Wan Q. 2016. Fabrication of GaInPSb quaternary alloy nanowires and its room temperature electrical properties. *Applied Physics A*. 123(1): 6. doi: 10.1007/s00339-016-0590-x
3. Nguyen T.D., Kim J.O., Lee S.J. 2022. Growth of InGaAsSb/GaSb compound for infrared optoelectronic devices. *Condensed Matter and Interphases*. 24(2): 250–255. doi: 10.17308/kcmf.2022.24/9265
4. Shoji Y., Oshima R., Makita K., Ubukata A., Sugaya T. 2023. 1.5 eV GaInAsP solar cells grown via hydride vapor-phase epitaxy for low-cost GaInP/GaInAsP/Si triple-junction structures. *Advanced Energy and Sustainability Research*. 4(5): 2200198–2200205. doi: 10.1002/aesr.202370010
5. Lunin L.S., Lunina M.L., Alfimova D.L., Pashchenko A.S., Yakovenko N.A., Pashchenko O.S. 2021.  $[\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}_z\text{As}_{1-z}/\text{GaAs}$  variband heterostructures for photovoltaic converters]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 47(20): 27–30. (In Russian). doi: 10.21883/PJTF.2021.20.51610.18907

Поступила 12.05.2025

Принята 03.06.2025