

## Особенности получения слаболегированных слоев алюминия-галлия арсенида для фотоприемных устройств

© С.С. Стрельченко, Н.И. Шумакин,

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, г. Калуга, 248000, Россия

*Слаболегированные слои алюминия-галлия арсенида позволяют создавать эпитаксиальные структуры для высокоэффективных фотоприемников, фотопреобразователей солнечной энергии, измерительных преобразователей температуры, ионизирующих излучений. В статье рассмотрена возможность получения слаболегированного слоя алюминия-галлия арсенида методом жидкофазной эпитаксии путем легирования раствора-расплава редкоземельными элементами и их аналогами, позволяющими уменьшить концентрацию носителей заряда. Описаны преимущества применения для легирования растворов-расплавов иттербия вместо скандия. Рассмотрены возможные механизмы легирования.*

**Ключевые слова:** гетероструктура, комплексное легирование, скандий, иттербий

В настоящее время наиболее привлекательным материалом для создания высокоэффективных селективных фотодиодов, работающих в диапазоне длин волн 700...880 нм, являются гетероструктуры системы Al-Ga-As. В фотодиодах в качестве поглощающей (узкозонной) части используется прямозонный слаболегированный полупроводник, в слое объемного пространственного заряда которого генерируются электронно-дырочные пары. Для достижения максимальной эффективности ширина области пространственного заряда должна превышать ширину той области, в которой происходит первичное поглощение излучения. Для указанного диапазона длин волн оно наблюдается на толщине 1...3 мкм. Селективный фотодиод во многих приложениях работает при нулевом смещении, а соответствующая ширина области пространственного заряда достигается при уровнях легирования  $10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$  [1].

Сложность получения чистых слоев в структурах алюминия-галлия арсенида (AlGaAs) методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) обусловлена наличием в компонентах шихты таких фоновых примесей, как кремний, углерод, кислород, сера [2, 3]. В связи с этим и возникают трудности в получении эпитаксиальных слоев с уровнем легирования  $10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Исследование электрофизических параметров слоев арсенида галлия (GaAs), легированных одновременно изовалентными и редкоземельными элементами (РЗЭ) т. е. подверженных комплексному ле-

гированию, и полученных методом ЖФЭ в интервале температур 900...700 °С [4], показало, что эта методика позволяет существенно снизить фоновую концентрацию примесей в эпитаксиальных слоях. При этом уменьшение концентрации сопровождается существенным увеличением подвижности основных носителей заряда, что приводит к повышению проводимости и ускорению отклика.

Механизм действия РЗЭ в структурах GaAs заключается в связывании фоновых примесей в растворах-расплавах и предотвращении их попадания в эпитаксиальный слой. Такой характер взаимодействия подтверждался в работах [3, 5] с применением измерений фотолюминесценции и эффекта Холла.

Результаты, приведенные в работе [4], показали, что комплексное легирование галлиевых растворов-расплавов иттербием и алюминием при кристаллизации слоев GaAs в интервале температур 650...700 °С позволяет достигать значений концентрации электронов в слоях, равной  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  (300 К), и их подвижности, оставляющей  $50 \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  (77 К).

Цель работы — исследование возможности получения слаболегированных слоев AlGaAs путем легирования РЗЭ и их аналогами, предназначенных для применения в фотоприемных устройствах, в частности в селективных фотодиодах.

Для решения поставленных задач были проведены экспериментальные исследования по выращиванию слоев AlGaAs из расплава галлия, легированного аналогом РЗЭ — скандием или иттербием. Эпитаксиальные слои выращивались методом ЖФЭ на установке с горизонтальным реактором в кассете поршневого типа. В качестве подложки был выбран GaAs *n*-типа марки АГЧТ с кристаллографической ориентацией (100). Для формирования шихты использовали галлий чистотой 99,9999 % (мас.), алюминий — 99,99999 % (мас.), иттербий — 99,99 % (мас.), скандий — 99,1 % (мас.).

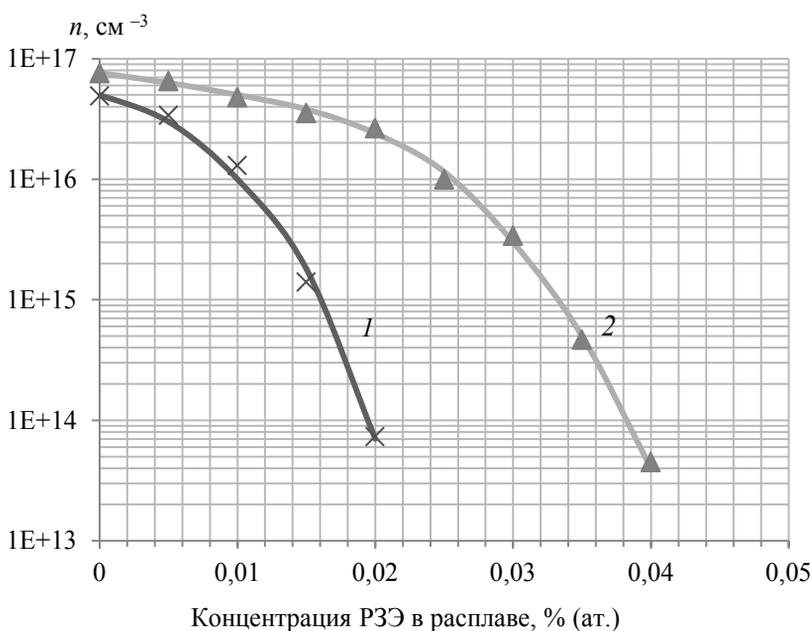
В процессе работы особое внимание было уделено чистоте исходных веществ и оснастки, чем в основном и определяется концентрация неконтролируемых примесей. В эпитаксиальных процессах применяются материалы особой чистоты, прошедшие цикл предэпитаксиальной обработки. Кассеты, изготовленные из графита марки МПГ-7, отжигали в вакууме при температуре 960 °С и давлении в рабочей камере  $10^{-5}$  мм рт. ст. в течение 6...7 ч, а также подвергали отжигу в атмосфере водорода на установках «Аргал-2М». Процесс роста эпитаксиальных слоев происходил в атмосфере высокочистого водорода (точка росы –80 °С). Растворы-расплавы предварительно не отжигали. Температура и время гомогенизации расплавов составляли 700 °С и 1,5 ч соответственно.

Наращивание слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,12$ ), имеющего ширину запрещенной зоны 1,574 эВ, что соответствует краю поглощения излу-

чения  $\lambda = 780$  нм, проводилось в интервале температур 750...700 °С. Скорость кристаллизации составляла 0,5 °С/мин. Толщина эпитаксиальных слоев находилась в диапазоне 5...10 мкм. Концентрацию носителей заряда определяли методом измерения вольт-фарадных характеристик.

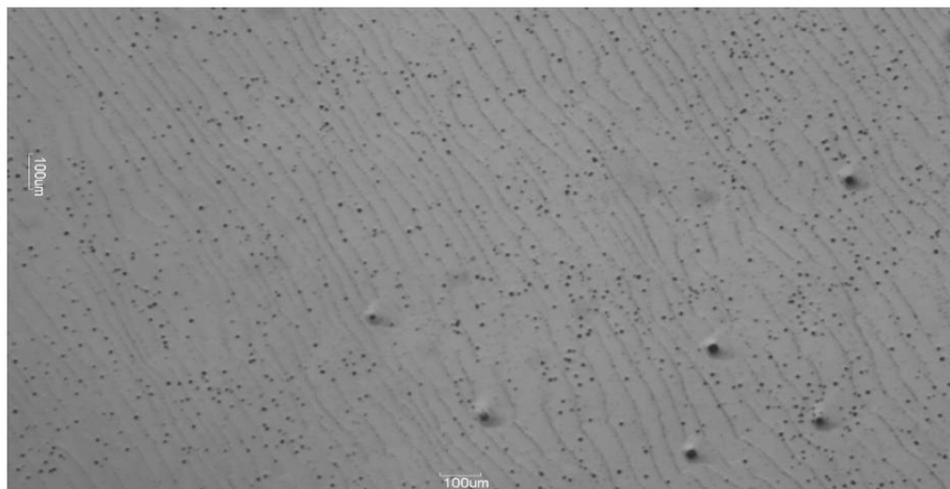
В ходе работы были получены две серии образцов. Для получения первой растворы-расплавы галлия легировали скандием, исходная концентрация которого составляла 0...0,02 % (ат.), а для второй — иттербием с исходной концентрацией 0...0,04 % (ат.). Дополнительно растворы-расплавы легировали оловом с концентрацией 0,06 % (ат.).

Полученные результаты эксперимента (рис. 1) позволяют установить, что требуемая концентрация  $n$  заряда носителей  $10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$  может быть достигнута применением примеси как скандия, так и иттербия. При этом концентрация носителей заряда около  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  достигается при концентрации скандия примерно 0,016 % (ат.), а иттербия — 0,033 % (ат.).

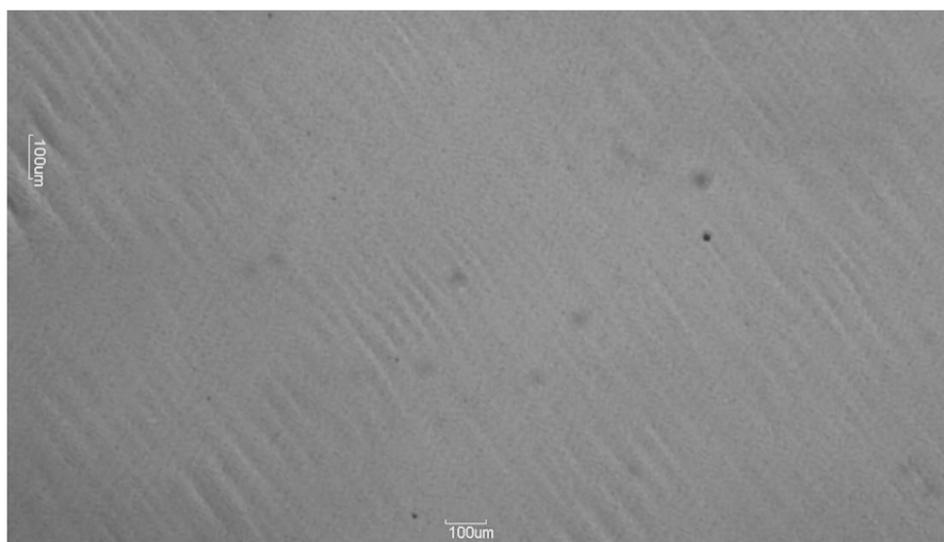


**Рис. 1.** Концентрация  $n$  носителей заряда в эпитаксиальных слоях AlGaAs, полученных из галлиевых расплавов, легированных скандием (1) и иттербием (2)

Следует отметить, что при концентрации скандия около 0,01 % (ат.) на поверхности пластин наблюдается образование большого количества дефектов (рис. 2), а применение иттербия с концентрацией вплоть до 0,04 % (ат.) позволяет получать бездефектную поверхность, пригодную для создания фотоприемников большой площади (рис. 3).



**Рис. 2.** Поверхность гетероструктуры, легированной скандием с концентрацией 0,01 % (ат.)



**Рис. 3.** Поверхность гетероструктуры, легированной иттербием с концентрации 0,04 % (ат.)

**Выводы.** Проведенные эксперименты по выращиванию слоев  $\text{Al}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{As}$ , которые в дальнейшем можно будет применять при производстве селективных фотодиодов, показали эффективность использования легирования РЗЭ для получения требуемых концентраций носителей заряда. Была определена, в частности, эффективность применения РЗЭ для создания слаболегированных слоев  $\text{AlGaAs}$ . Также были продемонстрированы преимущества легирования слоев иттербием.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зи С.М. *Физика полупроводниковых приборов*. В 2 кн. Кн. 1. Пер. с англ. 2-е изд. перераб. и доп. Москва, Мир, 1984.
- [2] Grym J., Prochazkova O. Role of rare-earth elements in the technology of III–V semiconductors prepared by liquid phase epitaxy. *Semiconductor Technologies*, InTech, 2010, pp. 297–320.
- [3] Беспалов В.А., Елкин А.Г., Журкин Б.Г. и др. Механизм влияния редкоземельных элементов на свойства слоев GaAs, выращенных жидкофазной эпитаксией. *Краткие сообщения по физике*, 1987, № 9, с. 32–34.
- [4] Курковский С.И., Сыворотка Н.Я. Свойства эпитаксиальных слоев GaAs, легированных редкоземельными элементами. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2007, № 2, с. 47–51.
- [5] Мастеров В.Ф., Захаренков Л.Ф. Редкоземельные элементы в  $A^3B^5$ . *Физика и техника полупроводников*, 1990, т. 24, с. 610–629.

Статья поступила в редакцию 31.01.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Стрельченко С.С., Шумакин Н.И. Особенности получения слаболегированных слоев алюминия-галлия арсенида для фотоприемных устройств. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1628>

**Стрельченко Станислав Сергеевич** родился в 1940 г., окончил Харьковский государственный университет в 1963 г. Д-р техн. наук, действительный член Академии инженерных наук и Академии космонавтики, профессор кафедры «Материаловедение» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области роста эпитаксиальных структур  $A^3B^5$ . Область научных интересов: эпитаксиальные пленки и структуры  $A^3B^5$  и приборы на их основе.  
e-mail: stas40@kaluga.ru

**Шумакин Никита Игоревич** родился в 1994 г., окончил Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2016 г. Магистрант кафедры «Материаловедение» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — эпитаксиальные структуры. e-mail: nikita019kvo@gmail.com

## Specifics of obtaining lightly-doped aluminium gallium arsenide layers for photodetectors

© S.S. Strelchenko, N.I. Shumakin

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga subsidiary, Kaluga, 248000, Russia

*As follows from physical models of optoelectronic devices, lightly-doped aluminium gallium arsenide layers make it possible to create epitaxial structures for highly efficient photodetectors, solar energy phototransducers, temperature sensors, ionizing radiation sensors. The article studies the possibility of obtaining a lightly-doped aluminium gallium arsenide layer via a new efficient liquid-phase epitaxy method by means of doping the solution melt with rare earth elements or with analogues that allow the carrier concentration to go down. We describe the advantages of using ytterbium over scandium for doping solution melts. We consider possible mechanisms behind this phenomenon.*

**Keywords:** heterostructure, complex doping, scandium, ytterbium

### REFERENCES

- [1] Sze S.M. *Physics of Semiconductor Devices*. New York, Wiley, 1969, 814 p. [In Russ.: Sze S.M. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov*. In 2 vols. Vol. 1. Moscow, Mir Publ., 1984].
- [2] Grym J., Prochazkova O. Role of rare-earth elements in the technology of III–V semiconductors prepared by liquid phase epitaxy. *Semiconductor Technologies*. InTech, 2010, pp. 297–320.
- [3] Bespalov V.A., Elkin A.G., Zhurkin B.G. et al. *Kratkie soobshcheniya po fizike — Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 1987, no. 9, pp. 32–34.
- [4] Kurkovskiy S.I., Syvorotka N. Ya. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature — Technology and design in electronic equipment*, 2007, no. 2, pp. 47–51.
- [5] Masterov V.F., Zakharenkov L.F. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Semiconductors*, 1990, no. 24, pp. 610–629.

**Strelchenko S.S.** (b. 1940) graduated from the Kharkov State University in 1963. Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Materials Science, Kaluga branch, Bauman Moscow State Technical University. Full member of the Russian Academy of Engineering and Russian Academy of Cosmonautics. Author of over 250 scientific publications in the field of III–V epitaxial structure growth. Specialises in epitaxial films, III–V structures and devices based on them. e-mail: stas40@kaluga.ru

**Shumakin N.I.** (b. 1994) graduated from the Kaluga branch of Bauman Moscow State Technical University in 2016. Graduate student, Department of Materials Science, Kaluga branch, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in epitaxial structures. e-mail: nikita019kvo@gmail.com