

07

## Наногетероструктуры AlInGaPAs/GaAs/Si для фотоэлектрических преобразователей, полученные методом импульсного лазерного напыления

© Л.С. Лунин<sup>1,2</sup>, М.Л. Лунина<sup>1</sup>, А.Е. Казакова<sup>2</sup>, А.С. Пащенко<sup>1</sup>,  
Д.Л. Алфимова<sup>1</sup>, Д.А. Арустамян<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Новочеркасск, Россия  
E-mail: lunin\_ls@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 сентября 2018 г.

Методом импульсного лазерного напыления получены наногетероструктуры AlInGaPAs/GaAs/Si для каскадных фотоэлектрических преобразователей, работающих в интервале длин волн 300–1300 nm. Исследованы структурные и люминесцентные свойства нанопленок AlInGaPAs на GaAs и GaAs на Si. Изучены спектральные характеристики фотоэлементов трехкаскадного фотоэлектрического преобразователя AlInGaPAs/GaAs/Si.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.24.47033.17537

Создание высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), состоящих из соединений  $A^3B^5$ , выращенных на дешевых кремниевых подложках, является одной из приоритетных задач современной фотовольтаики [1,2]. Наибольшая эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую достигается при использовании каскадных солнечных элементов [3,4].

Достижение предельных параметров в фотоэлектрических преобразователях возможно при получении гетероструктур с нанослоями твердого раствора, используемого в качестве активной области с высокой фоточувствительностью [5].

Основными проблемами при получении гетероструктур соединений  $A^3B^5$  на подложках кремния являются рассогласование постоянной решетки, а также коэффициентов термического расширения (КТР).

Различие в этих параметрах порождает возникновение прорастающих дислокаций в эпитаксиальных слоях  $A^3B^5$  и как следствие снижение эффективности солнечных элементов на их основе.

Влияние решеточного рассогласования можно снизить, выращивая слои, близкие по параметру решетки к кремнию, влияние же разницы КТР слоя и подложки снизить более проблематично. Однако уменьшить количество прорастающих дислокаций можно за счет низких температур выращивания слоев.

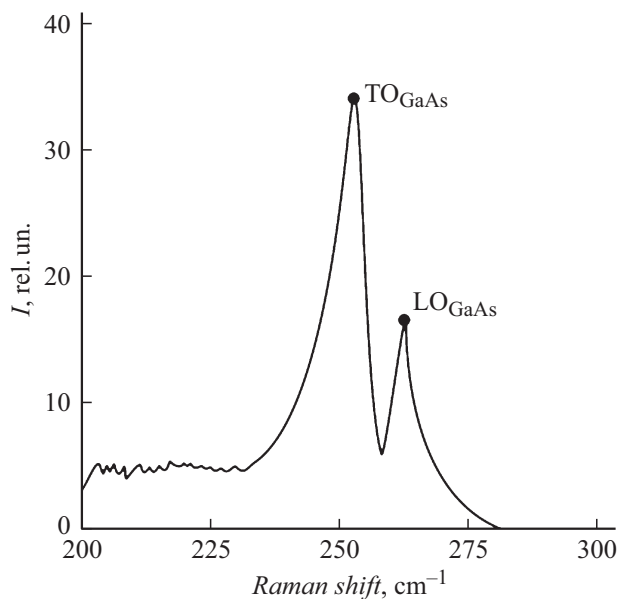
Наиболее перспективным в этом отношении методом, обеспечивающим низкокзатратный рост нанопленок  $A^3B^5$ , является метод импульсного лазерного напыления (ИЛН) [6]. Важным достоинством метода ИЛН кроме уже упомянутого низкотемпературного роста нанопленок является точный контроль толщины эпитаксиальной пленки.

Цель настоящей работы состоит в получении наногетероструктур  $AlInGaPAs/GaAs/Si$  для ФЭП методом ИЛН и исследовании их спектральных характеристик.

Наногетероструктуры  $AlInGaPAs/GaAs/Si$  выращивались с применением технологического комплекса импульсного лазерного напыления, созданного на базе вакуумной камеры установки „Varicoat-430A“ и  $AYG:Nd^{3+}$ -лазера. Процесс напыления осуществлялся путем распыления мишеней GaAs и синтезированного поликристалла  $AlInGaPAs$  [7] лазерным излучением второй гармоники  $AYG:Nd^{3+}$ -лазера в вакуумной камере. Энергия лазерного импульса составляла 110 мДж при длительности импульса в 15 ns, частота повторения импульсов была равна 50 Hz. Расстояние от поверхности мишени до подложки составляло 50 mm. Процесс синтеза проводился согласно схеме последовательных операций с применением процедуры термоциклирования, описанной нами ранее в работе [6].

Для предотвращения появления микрокапель на поверхности синтезируемых нанопленок использовался метод механической сепарации осажденных частиц. В качестве сепаратора применялась комбинация двух сеток, вибрирующих с частотой 100 Hz. Диаметр ячейки сетки составляет 1 mm.

В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния ориентации (100) *p*-типа с площадью 1.5 см<sup>2</sup>. Очистка поверхности кремниевых подложек от органических загрязнений проводилась в смеси изопропанола и ацетона в ультразвуковой ванне с последующим травлением 5% раствором плавиковой кислоты для



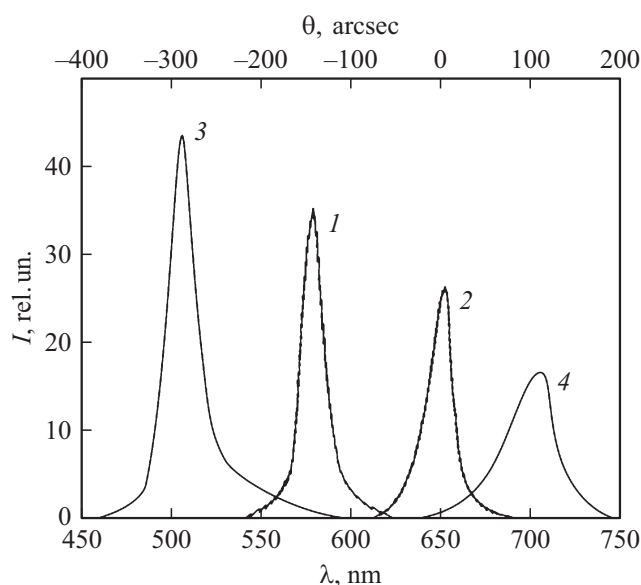
**Рис. 1.** Спектры комбинационного рассеяния света нанопленки арсенида галлия на кремнии.

удаления естественного оксидного слоя и пассивации поверхности атомами водорода.

В процессе ИЛН первого каскада в подложках  $p$ -Si происходит формирование неглубокого ( $\sim 150$ – $200$  nm)  $p$ – $n$ -перехода, обусловленного диффузией атомов мышьяка в поверхностный слой подложки, что делает подложку не только несущей, но и активной, т.е. образуется нижний солнечный элемент  $n$ -Si/ $p$ -Si.

При лазерном напылении используются два типа мишеней  $p$ -GaAs и  $n$ -GaAs, что позволяет создавать второй каскад толщиной  $\sim 300$ – $400$  nm. Аналогичным образом получался третий каскад в твердом растворе AlInGaPAs.

Полученные на подложках кремния нанослой GaAs были исследованы методом рамановской спектроскопии и рентгеновской дифракции. На рис. 1 представлен спектр комбинационного рассеяния света одного из образцов GaAs на подложке кремния, ориентированной в плоскости

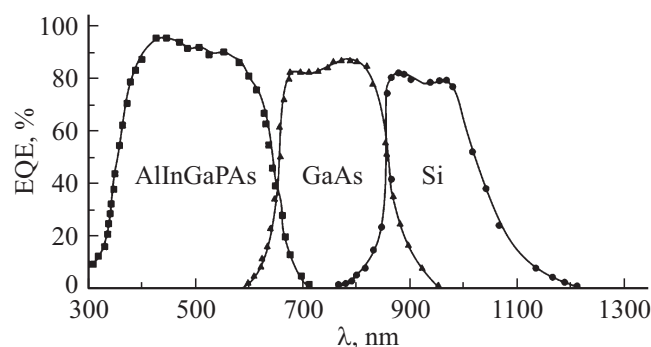


**Рис. 2.** Кривые дифракционного отражения (1, 2) и спектры ФЛ (3, 4) пленок AlInGaPAs (1, 3) и GaAs (2, 4).

(100). В спектре присутствуют две полосы с частотами  $260 \text{ cm}^{-1}$  (TO) и  $268 \text{ cm}^{-1}$  (LO), которые соответствуют собственным частотам колебаний чистого арсенида галлия. Наличие в спектре образцов продольных колебаний (LO) свидетельствует о довольно низком содержании примесей в слое GaAs. По смещению пиков фоновых мод можно судить о том, что величина механических напряжений пленки невелика.

Присутствие четких дифракционных пиков (рис. 2, кривые 1, 2) указывает на наличие кристаллической структуры нанопленок AlInGaPAs и GaAs с учетом значения ширины дифракционных кривых на уровне половинной амплитуды ( $\text{FWHM}_{\text{GaAs}} = 32''$ ,  $\text{FWHM}_{\text{AlInGaPAs}} = 18''$ ).

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) (рис. 2, кривые 3, 4), измеренные при 300 К, подтвердили качество получаемых нанопленок AlInGaPAs и GaAs. Для пятикомпонентных нанопленок AlInGaPAs интенсивность пика ФЛ выше и ширина полосы излучения на половине



**Рис. 3.** Спектры внешней квантовой чувствительности фотоэлементов трехкаскадного наногетероструктурного ФЭП.

максимума меньше, чем для нанопленок GaAs. Это связано с тем, что гетероструктура AlInGaPAs/GaAs полностью согласована по параметрам постоянной решетки и КТП в отличие от GaAs/Si.

На основе наногетероструктур AlInGaPAs/GaAs/Si был реализован трехкаскадный ФЭП, имеющий высокие значения внешнего квантового выхода (рис. 3). За счет использования твердого раствора AlInGaPAs в качестве широкозонного окна удалось достичь внешнего квантового выхода 90% в спектральном диапазоне 340–550 nm.

Таким образом, рассмотренный в работе метод импульсного лазерного напыления позволяет получать наногетероструктуры AlInGaPAs/GaAs/Si для трехкаскадных ФЭП, причем при напылении пленки GaAs на подложку кремния *p*-типа проводимости и дальнейшем термоциклировании в подложке создается *p–n*-переход между подложкой *p*-Si и слоем *n*-Si, возникающий в результате диффузии атомов мышьяка. Данный *p–n*-переход может быть использован в качестве узкозонного (нижнего) элемента в каскаде со средним элементом GaAs в высокоэффективных каскадных солнечных элементах. Следует отметить, что при ИЛН кремний является не только пассивной подложкой, но и активной частью каскадных элементов. Использование пятикомпонентного твердого раствора AlInGaPAs, изопараметрического с GaAs, широкозонного окна и активной области в качестве верхнего солнечного элемента трехкаскадного ФЭП позволяет значительно расширить коротковолновую часть солнечного спектра.

Работа выполнена в рамках государственного задания (грант № 16.4757.2017/8.9), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-01206 А.

## Список литературы

- [1] *Jain N., Hudaib M.K.* // Energy Harvesting Syst. 2014. V. 1. N 3-4. P. 121–145. DOI: 10.1515/ehs-2014-0012
- [2] *Krier A., Yin M., Marshall A.R.J., Krier S.E.* // J. Electron. Mater. 2016. V. 45. N 6. P. 2826–2830. DOI: 10.1007/s11664-016-4373-0
- [3] *Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д.* // ФТП. 2004. Т. 38. В. 8. С. 937–948.
- [4] *Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D.* // Springer Ser. in Optical Sciences. 2007. V. 130. P. 25–50. DOI: 10.1007/978-3-540-68798-6\_2
- [5] *Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунина М.Л.* // Вестн. Южного научного центра РАН. 2011. Т. 7. № 4. С. 25–30.
- [6] *Лунин Л.С., Лунина М.Л., Девицкий О.В., Сысоев И.А.* // ФТП. 2017. Т. 53. В. 3. С. 403–408. DOI: 10.21883/FTP.2017.03.44216.8299
- [7] *Алфимова Д.Л., Лунина М.Л., Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунин Л.С., Казакова А.Е.* // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. В. 12. С. 1245–1256. DOI: 10.7868/S0002337X17120016