

07 Каскадные солнечные элементы на основе наногетероструктур GaP/Si/Ge

© Л.С. Лунин, М.Л. Лунина, А.С. Пащенко, Д.Л. Алфимова, Д.А. Арустамян, А.Е. Казакова

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: lunin_ls@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 декабря 2018 г.
В окончательной редакции 11 декабря 2018 г.
Принято к публикации 13 декабря 2018 г.

Методом импульсного лазерного напыления получены наногетероструктуры GaP/Si/Ge. Проведено моделирование энергетической диаграммы каскадных солнечных элементов GaP/Si/Ge. Выращенные на подложках Si нанослои GaP и Ge исследованы методом рамановской спектроскопии и рентгеновской дифракции. Изучены спектральные зависимости внешнего квантового выхода фотоответа наногетероструктур на основе GaP/Si/Ge для каскадных солнечных элементов.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47489.17635

Широкое использование солнечных элементов (СЭ) в энергетике сдерживается их высокой себестоимостью [1]. Существует два основных направления развития солнечной энергетики: 1) увеличение эффективности и спектральной чувствительности солнечных элементов; 2) уменьшение себестоимости СЭ.

В настоящее время хорошо известны успехи в создании эффективных СЭ на основе гетероструктур соединений A^3B^5 . Возможности дальнейшего повышения эффективности фотоэлектрического преобразования солнечной энергии связаны с разработкой каскадных элементов, созданных на основе гетероструктур A^3B^5 с концентраторами излучения [2,3]. Одной из приоритетных задач современной фотовольтаики является снижение себестоимости каскадных СЭ с использованием кремния в качестве материала подложки и первого $p-n$ -перехода многопереходного СЭ [4], а также поиск новых более дешевых технологий.

Целью настоящей работы является получение и исследование каскадных солнечных элементов на основе наногетероструктур GaP/Si/Ge.

Для моделирования каскадных солнечных элементов использовалась программа AFORS-HET, позволяющая учитывать тип материалов, их электрические и оптические свойства, а также их толщину и степень легирования. Каскадные солнечные элементы состоят из верхнего перехода GaP, подложки Si, играющей роль среднего перехода, и нижнего перехода Ge, соединенных туннельными переходами (рис. 1, а). Верхний широкозонный слой фосфида галлия поглощает в основном коротковолновую часть спектра солнца, тогда как часть излучения с большей длиной волны поглощается более эффективно в кремниевом и германиевом переходах.

На рис. 1, б показана расчетная энергетическая диаграмма каскадных солнечных элементов GaP/Si/Ge при напряжении смещения 0 В. Окно AlInP с большей шириной запрещенной зоны позволяет пропускать солнечное излучение без потерь, а также играет роль по-

тенциального барьера для неосновных носителей заряда. Каскады соединены с помощью сильно легированного тонкого туннельного перехода с концентрацией доноров и акцепторов до $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Этот переход приводит к рекомбинации между электронами и дырками соседних каскадов и движению тока через структуру. Важным фактором является обеспечение баланса между скоростью рекомбинации и потоком поступающих носителей заряда, в противном случае возникает область объемного пространственного заряда, которая оказывает негативное влияние на электрическое поле каскада с более высокой скоростью генерации.

Наногетероструктуры GaP/Si/Ge были выращены на подложках p -Si (001) методом импульсного лазерного напыления. Данная технология выращивания наногетероструктур представлена нами в работах [5,6]. При напылении нанослоев GaP на подложку кремния p -типа проводимости в подложке формируется $p-n$ -переход между подложкой Si p -типа и приповерхностным слоем Si n -типа проводимости, который возникает в результате диффузии атомов фосфора в подложку. Глубина залегания $p-n$ -перехода составляет $\sim 120 \text{ nm}$. Следовательно, в процессе импульсного лазерного напыления подложка кремния становится активной, т.е. образуется средний каскад солнечного элемента n -Si/ p -Si (рис. 1, а). Формирование нижнего германиевого каскада осуществлялось на предварительно выращенном слое SiGe по методике [5].

Полученные на подложках Si нанослои GaP и Ge были исследованы методом рамановской спектроскопии и рентгеновской дифракции. На рис. 2, а (вставка) приведены спектры комбинационного рассеяния света одного из образцов GaP на подложках кремния ориентации (001). В спектре присутствуют две полосы с частотами 364 cm^{-1} (TO) и 404 cm^{-1} (LO), которые соответствуют собственным частотам колебаний чистого GaP. Наличие в спектре нанослоев GaP продольных колебаний (LO)

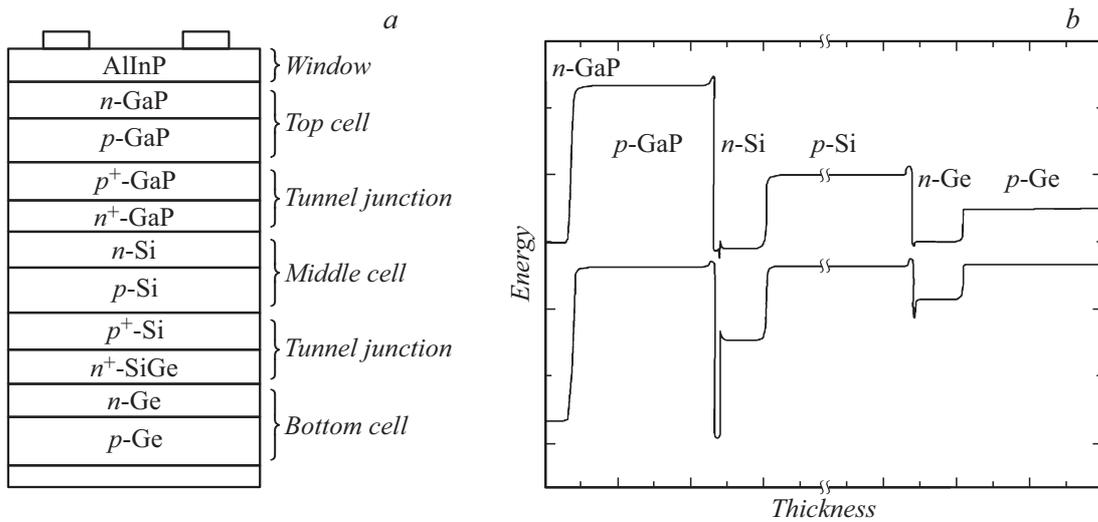


Рис. 1. Схема конструкции разрабатываемого солнечного элемента (а) и его энергетическая зонная диаграмма (b).

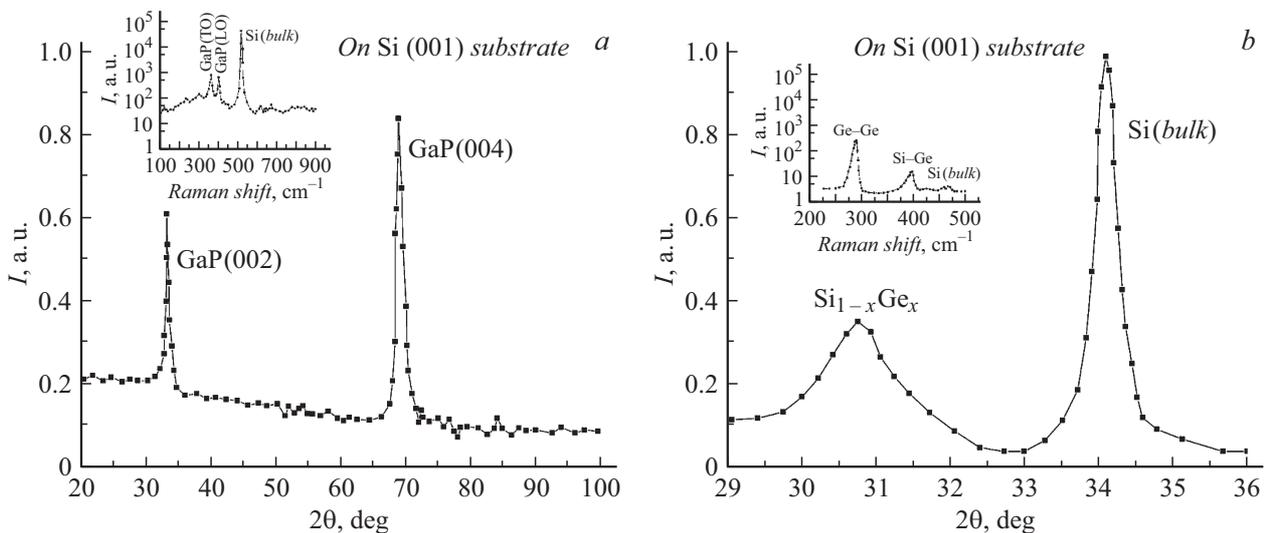


Рис. 2. Кривые дифракционного отражения GaP (а) и SiGe (b). На вставках — рамановские спектры GaP (а) и SiGe (b).

свидетельствует о довольно низком содержании примесей в них.

Присутствие четких дифракционных пиков (рис. 2, а) указывает на наличие кристаллической структуры нанослоев GaP с учетом значений дифракционных кривых на уровне половинной амплитуды.

Анализ морфологии выращенных нанослоев, проведенный методом атомно-силовой микроскопии, показал, что вследствие рассогласования параметров решетки материалов Ge и Si ($\sim 4\%$) на поверхности полученных слоев наблюдался развитый рельеф. Шероховатость поверхности (σ) зависит от эффективной толщины слоя и концентрации в пленках и изменяется в пределах 10–20 nm. При изменении эффективной толщины от 5 до 25 nm реализуется механизм упругой релаксации. С увеличением концентрации германия в эпитаксиальных слоях увеличивается рассогласование параметров

решеток подложки Si и слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Эпитаксиальный слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ постепенно упруго релаксирует. Степень релаксации пленок $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ оценивалась с помощью рамановской спектроскопии (рис. 2, b, вставка). Пик на частоте $\sim 280 \text{ cm}^{-1}$ соответствует связи Ge–Ge. Он присутствовал на спектрах всех образцов, что указывает на наличие слоя германия. Пик на частоте $\sim 395 \text{ cm}^{-1}$ свидетельствует о наличии связи Si–Ge. Связи Si–Si отвечает пик с частотой $\sim 470 \text{ cm}^{-1}$. Он проявляется для случаев, когда минимальные толщины пленок германия и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ меньше, чем глубина проникновения лазерного луча.

Анализируя морфологию поверхности и рамановский спектр наногетероструктур Si/ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ /Ge, можно определить глубину проникновения лазерного луча с длиной волны $\lambda = 514.5 \text{ nm}$. Если в рамановском спектре выращенных нанослоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и Ge не появляется пик,

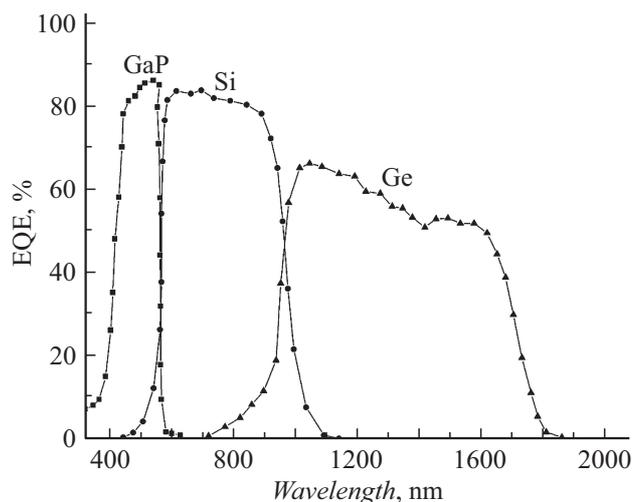


Рис. 3. Спектральная зависимость внешнего квантового выхода фотоответа трехкаскадного СЭ GaP/Si/Ge.

соответствующий связи Si—Si, то минимальная толщина слоя является глубиной проникновения лазерного луча ($\lambda = 514.5 \text{ nm}$). В данном случае она достигает 40 nm.

На рис. 2, *b* показана типичная кривая дифракционного отражения (КДО) для наноструктур Si/Si_{1-x}Ge_x. Исследования показали, что интенсивность пиков Ge (и ширина КДО на половине высоты) возрастает с увеличением его концентрации и смещается в сторону увеличения угла 2θ . Присутствие четких дифракционных пиков указывает на наличие кристаллической структуры нанопленок Si_{1-x}Ge_x и Ge с учетом значения ширины КДО на уровне половинной амплитуды ($\text{FWHM}_{\text{SiGe}} = 44''$ и $\text{FWHM}_{\text{Ge}} = 26''$).

На основе гетероструктуры GaP/Si/Ge был создан трехкаскадный солнечный элемент, и измерена его спектральная характеристика (рис. 3). Использование узкозонного германия позволило расширить диапазон спектральной чувствительности вплоть до 1800 nm, при этом внешний квантовый выход фотоответа нижнего каскада составил около 60%. Максимальный внешний квантовый выход фотоответа верхнего каскада GaP в спектральном диапазоне 350–550 nm достигает 85%.

Таким образом, методом лазерного импульсного напыления выращены трехкаскадные солнечные элементы на основе GaP/Si/Ge, работающие в диапазоне длин волн от 300 до 1800 nm. Методами рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии показано, что выращенные слои GaP, Si_{1-x}Ge_x, Ge обладают кристаллической структурой.

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2019 г., номер госрегистрации проекта 01201354240, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-01206 А.

Список литературы

- [1] Jain N., Hudait 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., Romyantsev V.D. III-V heterostructures in photovoltaics // *Concentrator photovoltaics* / Eds A. Luque López, V.M. Andreev. Springer Ser. in Optical Sciences. 2007. V. 130. P. 25–50. DOI: 10.1007/978-3-540-68798-6_2
- [5] 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
- [6] Лунин Л.С., Лунина М.Л., Казакова А.Е., Пащенко А.С., Алфимова Д.Л., Арустамян Д.А. // *Письма в ЖТФ.* 2018. Т. 44. В. 24. С. 75–80. DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47489.17635