

## Получение и исследование $p-n$ -структур с кристаллическими включениями в области пространственного заряда

© В.С. Калиновский, Р.В. Лёвин, Б.В. Пушный\*<sup>†</sup>, М.Н. Мизеров\*, В.Д. Румянцев, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 апреля 2013 г. Принята к печати 23 мая 2013 г.)

Предложена новая модель соединительных элементов для монолитных многопереходных солнечных фотопреобразователей на основе соединений  $A^{III}B^V$ , где вместо туннельных  $p^{++}-n^{++}$ -переходов используются  $p-n$ -переходы с кристаллическими включениями инородного полупроводникового материала в области пространственного заряда. Исследования показали, что введение кристаллических включений в область пространственного заряда  $p-n$ -перехода в структуре на основе GaSb позволяет обеспечить прохождение тока  $\sim 50 \text{ А/см}^2$  при значениях омического сопротивления на уровне  $\sim 0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ . Полученные характеристики соединительных элементов с кристаллическими включениями демонстрируют возможность их использования в многопереходных солнечных элементах при преобразовании концентрированного оптического излучения.

### 1. Введение

В последнее время наиболее высокие значения эффективности при преобразовании концентрированного солнечного излучения достигнуты в трехпереходных солнечных фотопреобразователях (ФП) на основе материалов  $A^{III}B^V$ . В таких ФП три фотоактивных  $p-n$ -перехода, образованных слоями с умеренным легированием, соединяются последовательно двумя туннельными  $p^{++}-n^{++}$ -переходами, образованными слоями с предельно высокими уровнями легирования [1,2]. При увеличении кратности концентрирования солнечного излучения генерируемый фототок может превысить пиковый ток туннельных переходов, что ведет к увеличению сопротивления всей структуры и падению эффективности фотопреобразования [3].

Возможным путем решения проблемы соединительных элементов является введение массива кристаллических включений в область пространственного заряда (ОПЗ) туннельных  $p^{++}-n^{++}$ -переходов либо просто создание слоя из массива кристаллов между соседними фотоактивными  $p-n$ -переходами в монолитных фотопреобразователях [1]. В первом случае возможно снизить предельно высокие уровни легирования  $p^{++}$ - и  $n^{++}$ -слоев в туннельных переходах и тем ослабить влияние размывания профиля легирования туннельных переходов, вызванное диффузией электрически активных примесей в процессе последующего роста структуры. Во втором случае можно полностью исключить туннельные переходы и обеспечить механизм омического токопрохождения по каналам проводимости в слое кристаллических включений в ОПЗ  $p-n$ -перехода. В работе [4] были предприняты первые исследования свойств туннельных и фотовольтаических  $p-n$ -переходов в GaSb, в ОПЗ которых были введены кристаллические Si-включения. Анализ темновых вольт-амперных характеристик показал существенное снижение омических потерь в таких структурах.

В настоящей работе представлены данные о технологических режимах выращивания соединительных переходов и результаты исследований фотоэлектрических параметров полученных структур. Кристаллические объекты из кремния формировались в области пространственного заряда как туннельных  $p^{++}-n^{++}$ , так и  $p-n$ -переходов (с меньшим уровнем легирования) на основе GaSb.

### 2. Технология выращивания структур

В качестве модельного  $p-n$ -перехода был выбран переход в GaSb. Фоточувствительные приборы на основе GaSb и его твердых растворов представляют определенный интерес не только для преобразования длинноволновой части солнечного излучения [5], но и при разработке ФП с использованием других материалов  $A^{II}B^VI$  и  $A^{III}B^V$  [6].

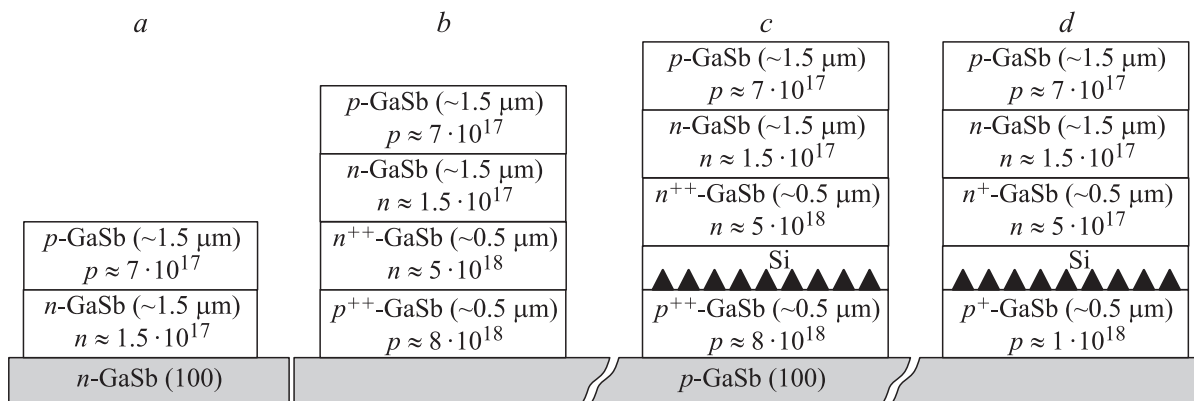
Материал для создания каналов проводимости в области объемного заряда должен удовлетворять следующим условиям:

- 1) слабое поглощение оптического излучения, преобразуемое нижележащими, более узкозонными каскадами;
- 2) материал кристаллов не должен образовывать на границе  $p-n$ -переходов сплошного слоя, а только отдельные кристаллы с размерами больше толщины области объемного заряда.

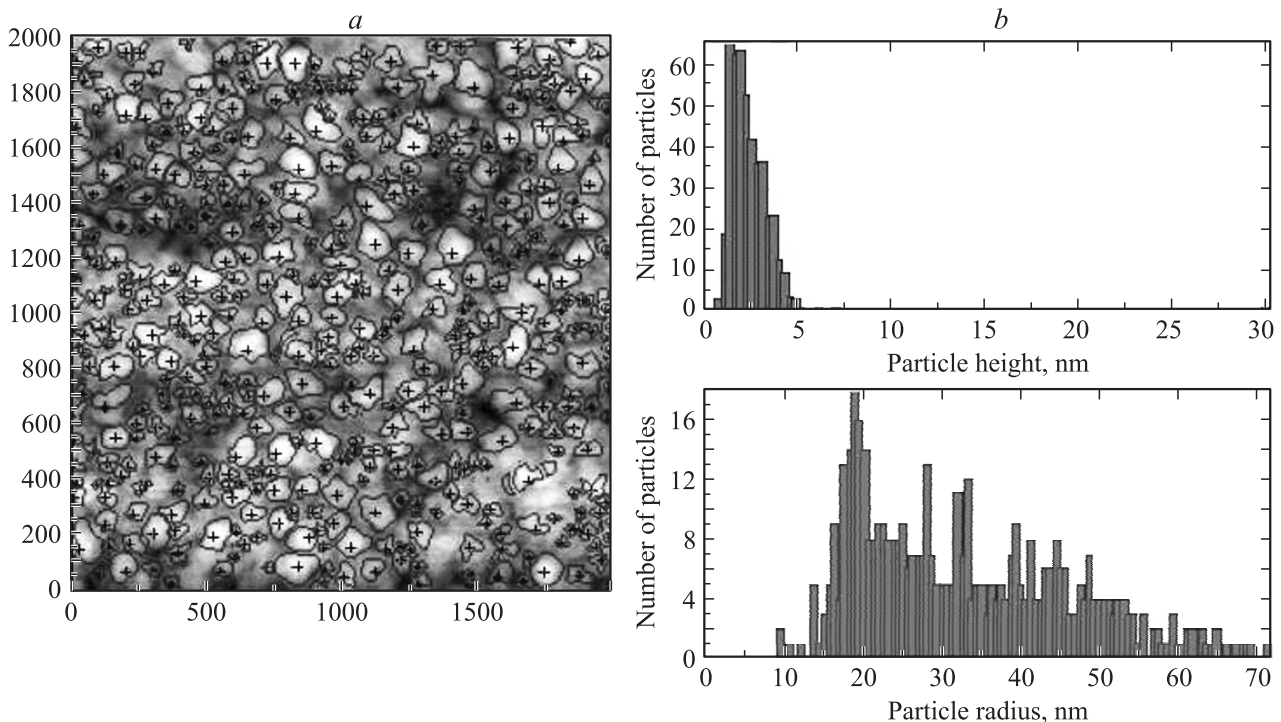
Для GaSb фотоактивных  $p-n$ -переходов этим условиям удовлетворяет кремний. Он имеет большую, чем антимоноид галлия, ширину запрещенной зоны и, следовательно, слабое поглощение света в области фоточувствительности антимоноида галлия.

Все структуры в GaSb были получены методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на установке AIX-200, работающей при пониженном давлении. В качестве источников Ga и Sb использовались триэтилгаллий (TEGa) и триметилсурьма (TMSb), а в

<sup>†</sup> E-mail: pushnyi@vpegroup.ioffe.ru



**Рис. 1.** Схематические изображения исследованных структур: *a* — *p-n*-переход, выращенный на *n-GaSb(Te)* подложке; *b* — *p-n*-переход с *n*-базой, соединенный туннельным *p<sup>++</sup>-n<sup>++</sup>*-переходом с *p-GaSb(Ge)* подложкой; *c* — *p-n*-переход, соединенный с подложкой *p-GaSb(Ge)* туннельным переходом с кристаллическими включениями кремния в ОПЗ; *d* — *p-n*-переход, соединенный с подложкой *p-GaSb(Ge)* слоем с массивом кристаллических включений кремния.



**Рис. 2.** Данные, полученные с помощью атомно-силового микроскопа: *a* — Si-кристаллы, формируемые на поверхности подложки *n-GaSb(Te)* (100), при  $T_p = 600^\circ\text{C}$  за  $t_p = 30$  мин, *b* — статистика линейных размеров по высоте и ширине Si-кристаллов.

качестве источников легирующих примесей — силан ( $\text{SiH}_4$ ) и диэтилтеллур (DETe). Температура роста составляла  $600^\circ\text{C}$ , давление в реакторе 100 мбар. В качестве подложек использовались пластины *n-GaSb(Te)* (100) с концентрацией электронов  $(1-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  либо пластины *p-GaSb(Ge)* (100) с концентрацией дырок  $(1.0-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

На рис. 1 представлены типы исследованных структур. Все структуры были выращены в одинаковых условиях.

Структура соединительных переходов включала эпитаксиальный слой *n-GaSb* с концентрацией доноров в

диапазоне  $(1-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  толщиной 0.8–1.0 мкм, а также слой *p-GaSb* с концентрацией акцепторов в диапазоне  $(1-6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  толщиной 0.8–1.0 мкм. Толщина слоя Si-включений в ОПЗ *p-n*-переходов соответствовала толщине ОПЗ. Контрольные образцы структур с односторонним фотоактивным *p-n*-переходом выращивались на подложке *n-GaSb* (100). Структура фотоактивного *p-n*-перехода состояла из эпитаксиальных слоев *n-GaSb* (концентрация доноров  $1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , толщина 1.5 мкм) и *p-GaSb* (концентрация акцепторов  $(7-9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , толщина 1.5 мкм).

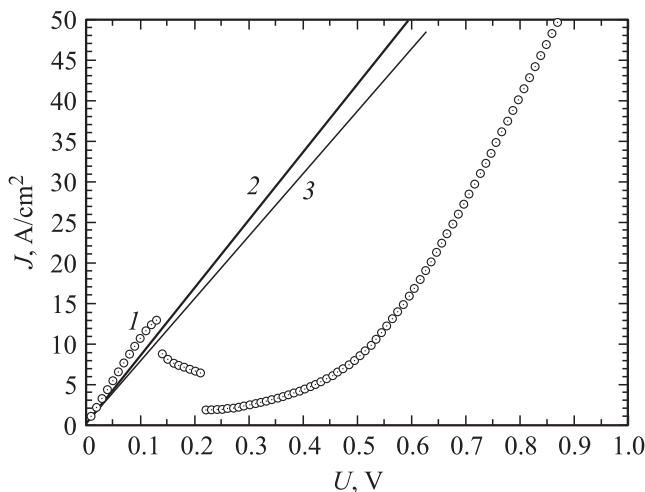
При создании рассматриваемых структур важным является сохранение качественных характеристик фотоактивных переходов, выращенных поверх слоев, содержащих кристаллические включения Si.

Для анализа размеров и формы Si-включений были выполнены технологические эксперименты по росту кристаллов Si на поверхности *n*-GaSb подложек. Изменяя время выдержки эпитаксиальной структуры под потоком силана, оказалось возможным изменять размер Si-включений, обеспечивая низкие омические потери в соединительных *p-n*-переходах. Оптимальными для исследований были выбраны следующие условия роста кристаллов: температура  $T_p = 600^\circ\text{C}$ , время роста  $t_p = 30$  мин.

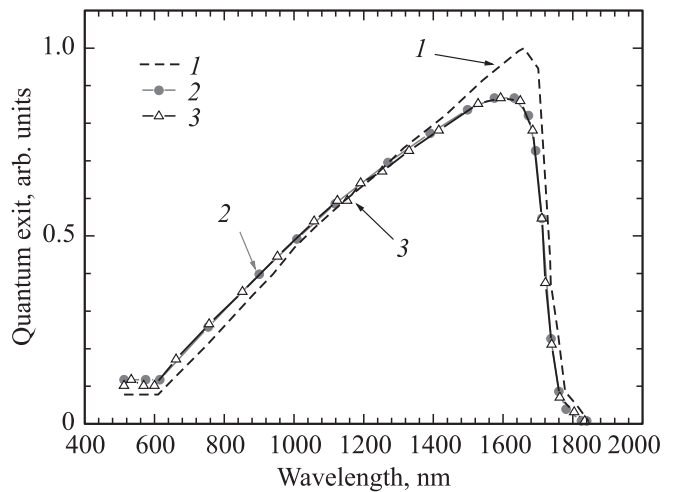
На рис. 2 приведена фотография и статистические данные для Si-кристаллов в ОПЗ, полученные с помощью атомно-силового микроскопа. Из приведенных данных видно, что при выбранных условиях роста формируются Si-кристаллы с размерами 1–5 нм по высоте и 10–70 нм по ширине.

### 3. Результаты исследований вольт-амперных характеристик

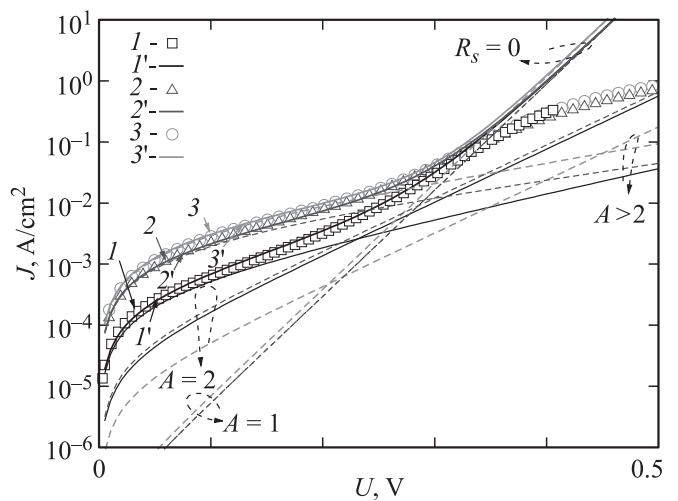
Измерения темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились при комнатной температуре в диапазоне плотностей тока  $10^{-8}$ – $10^2$  А/см<sup>2</sup>. Первоначально были измерены ВАХ структур GaSb, выращенных на *n*-подложке и моделирующих соединительные *p-n*-переходы различных типов:  $p^{++}-n^{++}$ -туннельный переход;  $p^{++}-n^{++}$ -переход с Si-кристаллами в ОПЗ; соединительный *p-n*-переход с Si-кристаллами в ОПЗ. Из графиков, представленных на рис. 3, видно, что в *p-n*-переходах с кристаллическими включениями отсутствует потенциальный барьер, их ВАХ подобна оми-



**Рис. 3.** Темновые вольт-амперные характеристики структур GaSb: 1 —  $p^{++}-n^{++}$ -туннельный переход; 2 —  $p^{++}-n^{++}$ -переход, в ОПЗ которого помещены Si-кристаллы; 3 — соединительный *p-n*-переход с Si-кристаллами в ОПЗ.



**Рис. 4.** Внешний квантовый выход GaSb фотоактивных *p-n*-переходов: 1 — *p-n*-переход выращивался на подложке *n*-GaSb (100); 2 — *p-n*-переход с базовым *n*-слоем, соединенным с подложкой *p*-GaSb (100) туннельным  $p^{++}-n^{++}$ -переходом; 3 — *p-n*-переход с базовым *n*-слоем, соединенным с подложкой *p*-GaSb (100) типа слоем с Si-кристаллическими включениями.



**Рис. 5.** Прямые ветви темновых ВАХ исследованных GaSb структур: 1 и 1' — экспериментальная ВАХ и ВАХ как результат расчетной подгонки при  $R_s = 0$  для фотоактивного GaSb *p-n*-перехода с *n*-базовым слоем, выращенным на подложке *n*-GaSb; 2 и 2' — то же в случае *n*-базового слоя, соединенного с подложкой через  $p^{++}-n^{++}$ -туннельный переход; 3 и 3' — то же в случае *n*-базового слоя, соединенного с подложкой через *p-n*-переход с Si-кристаллами в ОПЗ.

ческому сопротивлению с  $R_s < 15$  мОм·см<sup>2</sup> вплоть до плотностей тока  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup>. Обычный GaSb-туннельный переход в этих условиях имел пиковый ток  $\sim 13$  А/см<sup>2</sup>.

На рис. 4 приведены спектральные характеристики фоточувствительности структур с *p-n*-переходом. Видно, что спектральные характеристики исследованных структур отличаются друг от друга лишь в длинноволновой

области, где несколько большая чувствительность образцов, выращенных на  $n$ -подложке, объясняется тем, что собирание носителей идет не только из сравнительно тонкой  $n$ -базы, но и из подложки. Совпадение кривых в остальных участках спектра показывает, что дефекты, возникающие при росте фотоактивной  $p$ - $n$ -структуры на слое из Si-кристаллов (кривая 3), в значительной степени скомпенсированы, и их влияние на спектральные характеристики наращиваемого фотоактивного  $p$ - $n$ -перехода практически отсутствует.

На рис. 5 в полулогарифмическом масштабе показаны прямые ветви темновых ВАХ структур, аналогичных приведенным на рис. 4 (номера обозначения кривых на рис. 4 и 5 совпадают). Во всех исследованных структурах можно различить три механизма токопрохождения: туннельно-ловушечный (избыточный) с диодным коэффициентом  $A > 2$  и предэкспоненциальным множителем порядка  $J_{0r} = (2 \cdot 10^{-4} - 2.8 \cdot 10^{-3}) \text{ A/cm}^2$ ; рекомбинационный с  $A = 2$  и  $J_{0r} = (4 \cdot 10^{-5} - 4.5 \cdot 10^{-5}) \text{ A/cm}^2$ ; диффузионный с  $A = 1$  и  $J_{0d} = (3.6 \cdot 10^{-7} - 4.4 \cdot 10^{-7}) \text{ A/cm}^2$ . Практически полное совпадение кривых 2 и 3 и близкие значения предэкспоненциальных множителей  $J_{0r}$  и  $J_{0d}$  для „рекомбинационного“ и „диффузионного“ участков ВАХ исследованных структур указывают на то, что введение соединительного элемента с Si-кристаллическими включениями не приводит к существенному ухудшению качества материала в верхнем фотоактивном GaSb  $p$ - $n$ -переходе.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований продемонстрирован новый тип соединительных элементов, применимый для монокристаллических многопереходных солнечных элементов и фотопреобразователей мощного оптического излучения на основе соединений  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ . Данное технологическое решение защищено патентом РФ [7].

В эпитаксиальных структурах на основе GaSb, полученных методом MOCVD, вместо туннельных  $p^{++}-n^{++}$ -переходов использован соединительный элемент в виде  $p$ - $n$ -перехода с кристаллическими включениями в области пространственного заряда.

Показано, что введение Si-кристаллов в ОПЗ GaSb  $p$ - $n$ -переходов позволяет исключить негативное влияние пикового тока соединительных туннельных переходов до плотностей тока порядка  $50 \text{ A/cm}^2$  и обеспечить низкое омическое сопротивление встречно-включенных паразитных  $p$ - $n$ -переходов на уровне  $\sim 0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ .

Авторы выражают благодарность Г.В. Ильменкову за полезные обсуждения и Н.Х. Тимошиной за помощь в измерениях.

Работа выполнена при частичной поддержке Госконтрактов № 07.514.12.4032, №14.516.11.0011 Министерства образования и науки и проекта ОНТИ РАН 2012–2013 гг.

#### Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев. ФТП, **38** (8), 937 (2004).
- [2] H. Karam Nasser, A. Sherif Raed, R. King Richard. Springer Ser. Optical Sci., **40**, 199 (2008).
- [3] V.M. Andreev, E.A. Ionova, V.R. Larionov, V.D. Rumyantsev, M.Z. Shvarts, G. Glenn. Proc. IEEE 4th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion (May 7–12, 2006, Hawaii) p. 799–802.
- [4] V.M. Andreev, V.S. Kalinovsky, R.V. Levin, B.V. Pushniy, V.D. Rumyantsev. Proc. 24th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. (September 21–25, 2009, Hamburg, Germany) p. 740.
- [5] В.М. Андреев, В.В. Евстропов, В.С. Калиновский, В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков. ФТП, **43** (5), 671 (2009).
- [6] S.-N. Wu, D. Ding, S.R. Johnson, S.-Q. Yu, Y.-H. Zhang. Prog. Photovolt: Res. Appl., 328 (2010).
- [7] Патент № RU106443U1 от 10.07.2011.

Редактор Т.А. Полянская

#### Receipt and research $p$ - $n$ structures with crystalline inclusions into space charge region

V.S. Kalinovsky, R.V. Levin, B.V. Pushniy\*, M.N. Mizerov\*, V.D. Rumyantsev, V.M. Andreev

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\*Submicron Heterostructures for Microelectronics,  
Research & Engineering Center,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** In the work, a new model of connecting elements for multi-junction solar cells based on III–V compounds has been proposed, according to which, instead of tunneling  $p^{++}-n^{++}$ -junctions, connecting elements with crystalline inclusions of an foreign semiconductor material in the space charge region are used. The investigations carried out have shown that introduction of crystalline inclusions into space charge region of the  $p$ - $n$ -junctions allows flowing the high current densities  $\sim 50 \text{ A/cm}^2$  at ohmic losses corresponding to about  $0.01 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ . The measured characteristics of the connecting elements with crystalline inclusions in the space charge region demonstrate the prospects and the feasibility of their use in multi-junction solar cells for conversion of the concentrated light.