

## Высокоэффективные фотоэлементы на основе GaSb

© В.П. Хвостиков<sup>¶</sup>, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, Н.Х. Тимошина, Н.С. Потапович, Б.Я. Бер, Д.Ю. Казанцев, В.М. Андреев

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

(Получена 16 июля 2012 г. Принята к печати 25 июля 2012 г.)

С помощью метода диффузии цинка из газовой фазы разработаны и изготовлены высокоэффективные фотоэлементы на основе антимонида галлия для использования в солнечных батареях и системах с расщеплением солнечного спектра при высоких кратностях концентрирования солнечного излучения, для термофотоэлектрических генераторов с высокой температурой эмиттера, а также для преобразования лазерной энергии. Исследовано влияние толщины диффузионного  $p^+$ -слоя на основные характеристики фотоэлемента. Определены оптимальный профиль легирования и глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода, обеспечивающие высокую эффективность фотоэлектрического преобразования при плотностях фототока вплоть до  $100 \text{ А/см}^2$ .

### 1. Введение

Фотоэлектрические преобразователи на основе антимонида галлия нашли широкое применение в каскадных солнечных элементах, например, GaAs/GaSb [1–6] или GaInP/GaSb [6] и в термофотоэлектрических (ТФЭ) генераторах. Перспективным является также их использование в системах с расщеплением солнечного излучения (СРСИ) [7–10], в которых световой поток разделен оптическими фильтрами на спектральные диапазоны для последующего преобразования пространственно разделенными фотоэлементами. Например, в работе [9] для системы с расщеплением светового потока использовались два оптических фильтра и три однопереходных солнечных элемента на основе AlGaAs, GaAs и GaSb. В термофотоэлектрических генераторах фотоэлементы находятся в непосредственной близости ( $\sim 1$ – $3 \text{ см}$ ) от раскаленного до высоких температур (вплоть до  $2000 \text{ К}$ ) излучателя из керамики или тугоплавких металлов. Его разогрев осуществляется либо за счет концентрирования солнечного излучения зеркалами или линзами Френеля [11–13], либо газовыми горелками [14,15]. GaSb является также перспективным материалом для создания фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения [16]. Для всех перечисленных применений требуется разработка фотоэлементов, эффективно работающих при плотностях фототока вплоть до  $100 \text{ А/см}^2$ . Для создания таких мощных фотоэлектрических преобразователей необходимо обеспечивать собирание фототока со всей облучаемой поверхности прибора при минимальных омических потерях [17]. Степень пригодности фотоэлементов для работы при высоких плотностях светового потока может варьироваться также за счет изменения рисунка контактной сетки, ширины контактных полос и расстояния между ними.

Выбранный в данной работе способ создания структуры фотопреобразователя методом диффузионного легирования цинком из газовой фазы, при его относительной

экономичности и простоте, характеризуется высокими значениями поверхностной концентрации акцепторов ( $p > 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) [18–21], что приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда в высоколегированном слое и, следовательно, к снижению квантового выхода фотоответа в GaSb-фотоэлементах. В статье приводятся результаты постдиффузионного прецизионного травления поверхности структуры фотоэлектрических преобразователей, изготовленных диффузией Zn из газовой фазы в подложку GaSb, для уменьшения толщины сильнолегированного слоя. При этом изменялись глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода и профиль распределения концентрации цинка, исследовалось влияние параметров структуры на характеристики фотоэлемента — напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ), коэффициент заполнения нагрузочной характеристики ( $FF$ ), плотность фототока ( $J_{sc}$ ) и эффективность преобразования излучения.

Фотоэлементы разрабатывались с целью использования в термофотоэлектрических и солнечных фотоэлектрических системах, в том числе, в модулях с расщеплением солнечного спектра, при высоких плотностях падающего излучения.

### 2. Экспериментальные результаты

#### 2.1. Изготовление фотоэлектрических преобразователей на основе GaSb

При изготовлении приборной структуры фотоэлектрических преобразователей на основе GaSb наиболее часто используются два технологических приема — одностадийная [1,3,4,18,19] или двухстадийная диффузия цинка из газовой фазы [2,6,10]. Первый подход отличается сравнительной экономичностью и относительной простотой. Достоинством второго приема является возможность заглужения  $p$ - $n$ -перехода под контактами, что позволяет изготавливать фотоэлементы, эффективно и надежно работающие при малой толщине фронтального

<sup>¶</sup> E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

слоя  $p$ -GaSb в области фотопреобразователя, свободной от металлизации.

В настоящей работе для формирования сложного рельефа  $p$ - $n$ -перехода использовалась двухстадийная диффузия Zn через диэлектрическую маску [2,6,10]. Полученные фотоэлектрические структуры характеризовались большей толщиной  $p$ -слоя ( $d_{p-n} > 1$  мкм) на участках под контактами по сравнению с глубиной залегания фоточувствительного  $p$ - $n$ -перехода.

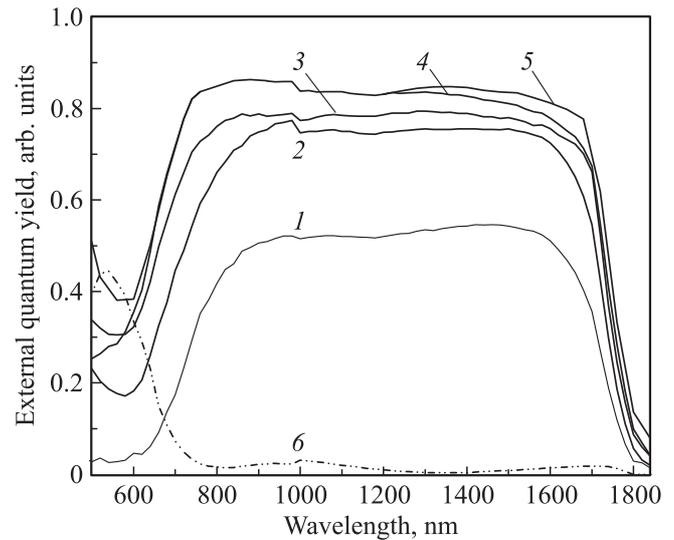
С целью исследования возможности улучшения параметров фотоэлектрических преобразователей на основе GaSb [3] глубина диффузии на фоточувствительной поверхности прецизионно изменялась анодным окислением  $p$ -слоя с последующим селективным травлением окисла в соляной кислоте. После проведения первого диффузионного процесса высоколегированная фоточувствительная область элемента стравливалась на глубину до 560 нм с шагом 80 нм. Усредненная константа анодного окисления  $\sim 2$  нм/В была определена в работе [18]. Последующие этапы изготовления GaSb-элементов (диффузия в подконтактные области и постростовые операции) оставались одинаковыми для всех фотоэлектрических преобразователей с различной глубиной залегания фоточувствительного  $p$ - $n$ -перехода. Исследование параметров фотоэлементов проводилось на импульсном имитаторе солнечного излучения при различных кратностях концентрирования (вплоть до  $K \approx 1000$ ) или в термофотоэлектрических преобразователях при различных температурах вольфрамового излучателя.

## 2.2. Зависимость спектров фотоответа от параметров структур фотоэлектрических преобразователей на основе GaSb

Для достижения максимальной эффективности преобразования солнечного излучения основным оптимизируемым параметром фотоэлемента является глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода  $d_{p-n}$ . Глубина диффузии, а, следовательно, и положение  $p$ - $n$ -перехода, существенно влияют на значение фототока (рис. 1), радиационную стойкость и сопротивление растекания. Потери на сопротивлении растекания вместе с потерями на последовательном сопротивлении приводят к уменьшению фактора заполнения нагрузочной характеристики.

Поверхностная концентрация акцепторной примеси фотоэлектрической структуры также оказывает существенное влияние на параметры прибора. Для достижения высокого квантового выхода фотоответа требуется понижать уровень легирования фотоактивного слоя. В то же время, для уменьшения контактного и слоевого сопротивления предпочтительнее иметь высоколегированный эмиттер.

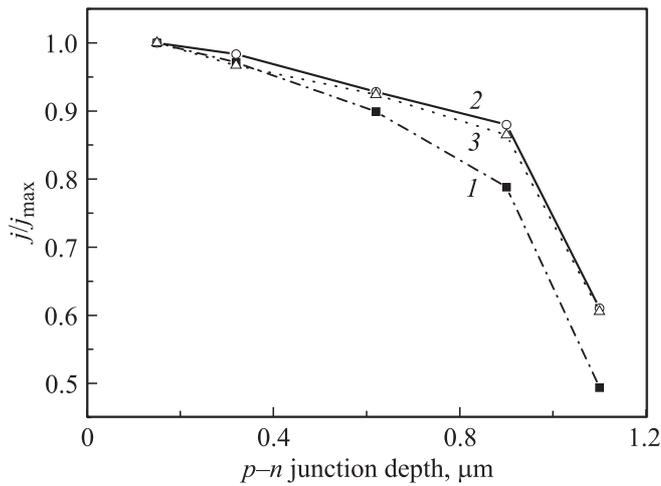
Требования радиационной стабильности космических солнечных элементов накладывают жесткие ограничения на величину  $d_{p-n}$ . Радиационное воздействие при-



**Рис. 1.** Спектральные характеристики внешнего квантового выхода фотоэлементов на основе GaSb с различными глубинами залегания  $p$ - $n$ -перехода, мкм: 1 — 1.1, 2 — 0.9, 3 — 0.62, 4 — 0.32, 5 — 0.14, 6 — спектр отражения от просветленной поверхности GaSb при использовании двухслойного антиотражающего покрытия ZnS + MgF<sub>2</sub>.

водит к образованию дефектов в полупроводнике, что сопровождается уменьшением времени жизни и диффузионной длины неравновесных носителей заряда. В работе [3] показано, что для GaSb-элементов, работающих в тандеме с GaAs-фотопреобразователями, максимальная эффективность может быть достигнута при толщине эмиттера порядка 0.3 мкм и значении поверхностной концентрации дырок  $5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> (кратность концентрирования солнечного излучения  $K > 200$ ). Однако на практике такое уменьшение толщины диффузионного слоя может привести к возрастанию токов утечки, например, после операции вжигания металлических контактов.

Увеличение толщины  $p$ -эмиттера позволяет сделать технологический цикл более надежным, например, с точки зрения выхода годных элементов. При увеличении глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода уменьшается слоевое сопротивление структуры и улучшается фактор заполнения нагрузочной характеристики  $FF$ . Однако значительное повышение толщины слоя  $p$ -GaSb приводит к ухудшению эффективности сбора неосновных носителей заряда, генерированных вблизи поверхности. Этот факт подтверждается полученными в настоящей работе экспериментальными спектрами фоточувствительности элементов с различной толщиной  $p$ -области, представленными на рис. 1. Из рассмотрения этих зависимостей следует, что с увеличением глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода наблюдается снижение внешнего квантового выхода фотоответа во всем спектральном диапазоне фоточувствительности, особенно в коротковолновой ее части. Вместе с тем, увеличение толщины  $p$ -эмиттера



**Рис. 2.** Зависимости нормированной плотности фототока короткого замыкания для структур с различной глубиной залегания  $p-n$ -перехода:  $j/j_{\max}$  для 1 —  $\Delta\lambda_1 = 500-1840$  нм; 2 —  $\Delta\lambda_2 = 900-1840$  нм; 3 —  $\Delta\lambda_3 = 1180-1840$  нм.

до 0.6 мкм приводит к незначительному снижению фототока. На рис. 2 показано изменение нормированной плотности фототока для трех спектральных диапазонов — полного ( $\Delta\lambda_1 = 500-1840$  нм, кривая 1) и „усеченных“ ( $\Delta\lambda_2 = 900-1840$  нм и  $\Delta\lambda_3 = 1180-1840$  нм). Интервал значений длин волн  $\Delta\lambda_2$  (кривая 2) соответствует использованию GaSb-элементов в каскаде в паре с фотоэлементом на основе GaAs [4,5] или в системах с расщеплением солнечного излучения в комбинации с двумя однопереходными фотопреобразователями на основе  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $x = 0.3-0.35$ ) и GaAs [9]. Диапазон  $\Delta\lambda_3$  (кривая 3) соответствует применению GaSb-элементов в усовершенствованной СРСИ с тремя дихроическими фильтрами [10], в которую введен четвертый фотопреобразователь (например, на основе соединения InGaAsP/InP или AlGaAsSb/GaSb с  $E_g \approx 1.0-1.1$  эВ).

Таким образом, в зависимости от назначения и условий эксплуатации фотоэлектрических преобразователей на основе GaSb оптимальная толщина  $p$ -эмиттера структуры может значительно варьироваться. Цель дальнейших исследований заключалась в создании универсального подхода к постдиффузионной технологии структур GaSb-фотоэлементов, который позволил бы достигать максимальной эффективности преобразования для требуемой глубины залегания  $p-n$ -перехода.

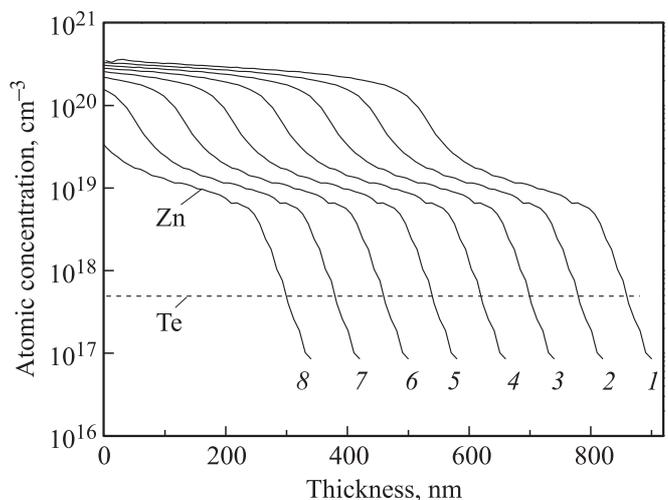
### 2.3. Зависимость характеристик GaSb-фотопреобразователей от параметров диффузионных структур

Профиль распределения цинка в GaSb определялся методом динамической вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) с использованием первичных ионов  $^{133}Cs^+$  и регистрацией вторичных молекулярных ионов  $^{133}Cs^{64}Zn^+$ . Количественный анализ проводился с

использованием коэффициентов относительной чувствительности, определенных на имплантированных стандартах GaSb : Zn.

На рис. 3 показан исходный ВИМС-профиль распределения цинка в GaSb при диффузии из газовой фазы, а также аналогичные профили после травления эмиттера структуры. В большинстве экспериментов начальная глубина  $p-n$ -перехода составляла 850 нм. Одним из достоинств метода прецизионного травления является возможность удаления дефектного высоколегированного поверхностного слоя, что должно приводить к снижению скорости поверхностной рекомбинации. Форма кривой распределения цинка в приборной структуре также оказывает существенное влияние на параметры фотоэлемента. Изменение профиля легирования приводит к перестройке встроенного электрического поля, обусловленного как градиентом легирования, так и градиентом запрещенной зоны в связи с уменьшением  $E_g$  в высоколегированном слое.

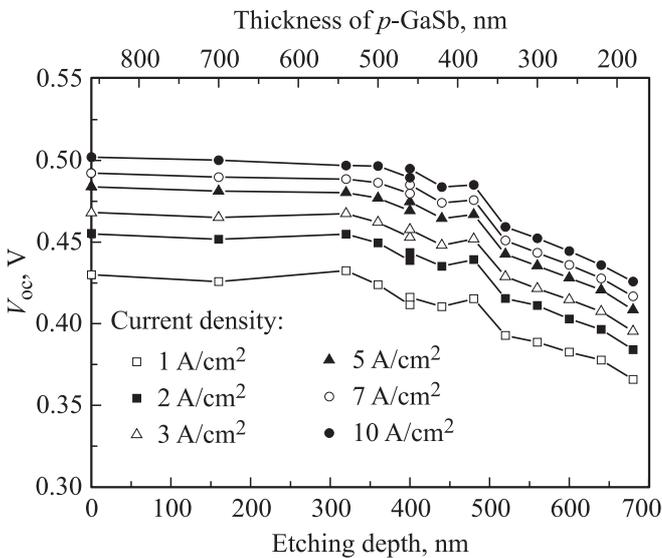
Проведенные эксперименты показали, что при пошаговом (80 нм) уменьшении толщины  $p^+$ -слоя происходит изменение основных характеристик фотоэлектрического преобразователя (рис. 4-6), приводящее в результате к изменению его эффективности. Как видно из рис. 7, *a, b, c*), на котором представлены результирующие зависимости КПД преобразования излучения от кратности концентрирования для полного (рис. 7, *a*,  $\Delta\lambda_1 = 500-1820$  нм) и „усеченных“ (*b, c*) солнечных спектров, наибольшему КПД фотопреобразователя соответствует удаление  $\sim 320$  нм эмиттера структуры. Из профилей распределения цинка (рис. 3) следует, что при травлении эмиттера на толщину менее 320 нм удаляется приповерхностный высоколегированный слой, но градиент концентрации примеси остается достаточно большим. При дальнейшем уменьшении толщины  $d_{p-n}$



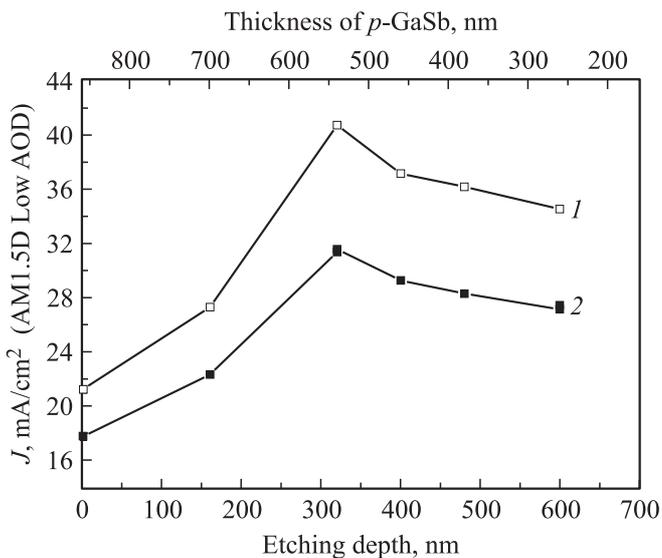
**Рис. 3.** Распределение атомов цинка в GaSb с исходной толщиной фронтального  $p$ -слоя, равной 850 нм. Толщина удаленного диффузионного слоя, нм: 1 — 0, 2 — 80, 3 — 160, 4 — 240, 5 — 320, 6 — 400, 7 — 480, 8 — 560.

градиент концентрации падает и, следовательно, уменьшается встроенное поле, способствующее разделению носителей заряда. По-видимому, по этой причине и происходит снижение значений КПД фотоэлектрического преобразователя при дальнейшем уменьшении толщины слоя *p*-GaSb.

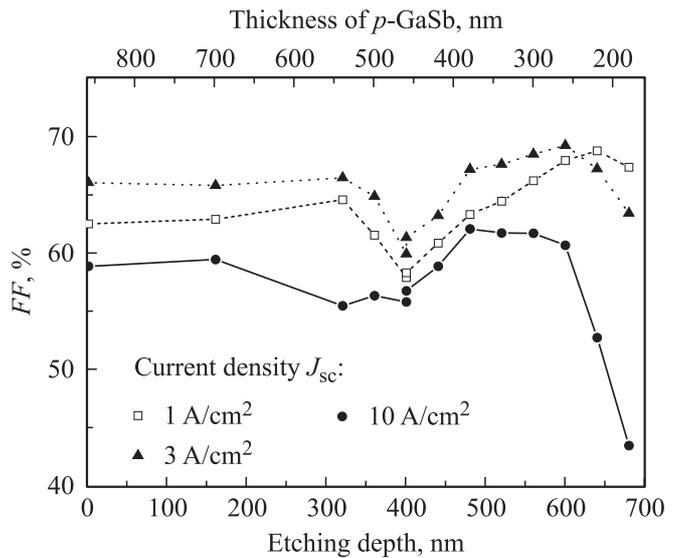
В работе [19] была сделана оценка влияния скорости поверхностной рекомбинации на величину  $I_{sc}V_{oc}/(I_{sc}V_{oc})_{max}$  (где  $I_{sc}$  — ток короткого замыкания,  $V_{oc}$  — напряжение холостого хода фотопреобразователя) для диффузионных профилей пяти видов, полученных различными способами. Наблюдавшееся в данной работе



**Рис. 4.** Зависимости напряжения холостого хода GaSb-фотоэлемента от толщины диффузионного эмиттера (верхняя шкала) и глубины травления структуры (нижняя шкала) при разных плотностях генерируемого фототока.



**Рис. 5.** Зависимости плотности фототока от глубины травления и толщины эмиттера. 1 — для внутреннего квантового выхода фототока, 2 — для внешнего квантового выхода.



**Рис. 6.** Зависимости фактора заполнения вольт-амперной характеристики от глубины травления и толщины диффузионного эмиттера при разных плотностях генерируемого фототока.

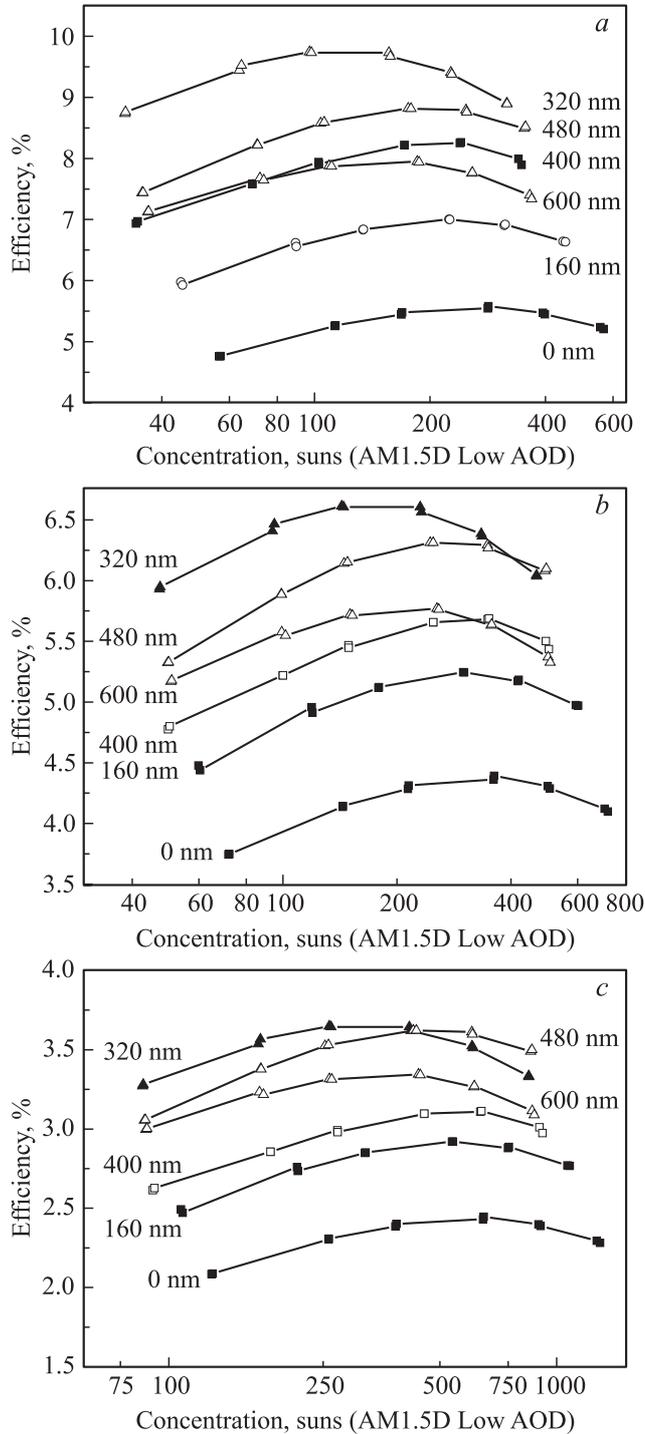
увеличение значений  $FF$  (рис. 6) при травлении эмиттера на 500–600 нм может быть связано с полным удалением высоколегированного слоя (рис. 3, профиль 8) и в связи с этим с снижением скорости поверхностной рекомбинации до значений не более  $5 \cdot 10^4$  см/с, в соответствии с оценками [19].

Представленные выше результаты относятся к фотоэлектрическим преобразователям, изготовленным на подложках GaSb ориентации (100). Слитки полупроводника были выращены методом Чохральского в „Гиредмет“ (Москва). Резка и полировка пластин проводились в ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Аналогичные исследования были проведены на „eri-ready“-подложках из „Гиредмет“ (Москва) для проверки влияния качества обработки поверхности на эффект улучшения выходных характеристик фотоэлемента за счет постдиффузионного травления структуры. Эксперименты показали, что максимальный КПД фотопреобразователя (рис. 8) также был получен при толщине эмиттера 530 нм, получаемой в результате травления эмиттера структуры на глубину 320 нм (при исходной глубине *p*-*n*-перехода  $\sim$  850 нм).

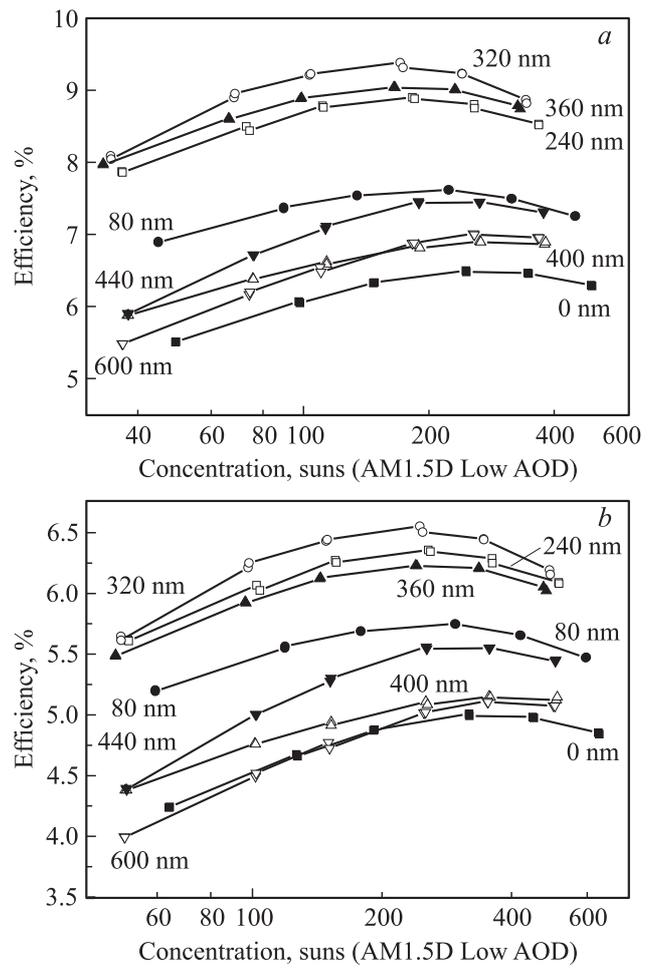
Эффект повышения эффективности за счет травления приповерхностного слоя структуры наблюдался также и для фотоэлементов, полученных из GaSb „eri-ready“ подложек, изготовленных Wafer Technology Ltd (Великобритания). Таким образом, можно сделать вывод о том, что повышение КПД фотопреобразователей за счет травления *p*-эмиттера не зависит от производителя подложек и технологических особенностей их изготовления, а определяется постдиффузионным изменением глубины залегания *p*-*n*-перехода и профиля распределения цинка в структуре.

Фотопреобразователи на основе GaSb с меньшей глубиной ( $\sim$  500 нм) исходного диффузионного *p*-*n*

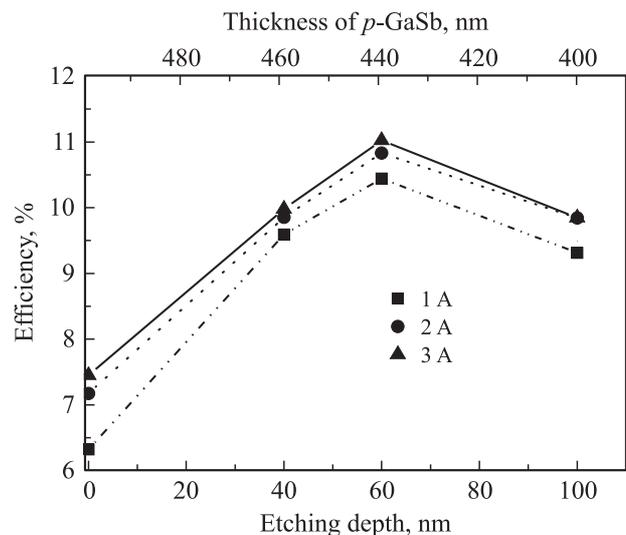
перехода исследовались на GaSb-подложках, изготовленных в Commissariat à l'Énergie Atomique, LETI/DOPT (Франция) и отполированных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.



**Рис. 7.** Зависимости КПД от кратности концентрирования солнечного излучения при различной глубине травления эмиттера для GaSb-элементов при облучении полосами спектра солнечного излучения (AM1.5D): *a* —  $\Delta\lambda_1 = 500\text{--}1820$  нм, *b* —  $\Delta\lambda_2 = 900\text{--}1820$  нм, *c* —  $\Delta\lambda_3 = 1180\text{--}1820$  нм. Слиток GaSb — „Гиредмет“ (Москва); резка и полировка пластин — ФТИ им. А.Ф.Иоффе.



**Рис. 8.** Зависимости КПД GaSb-элементов от кратности концентрирования солнечного излучения при различной глубине травления эмиттера при облучении полосами спектра солнечного излучения (AM1.5D): *a* —  $\Delta\lambda_1 = 500\text{--}1820$  нм, *b* —  $\Delta\lambda_2 = 900\text{--}1820$  нм. „Epi-ready“ подложки GaSb от „Гиредмет“.



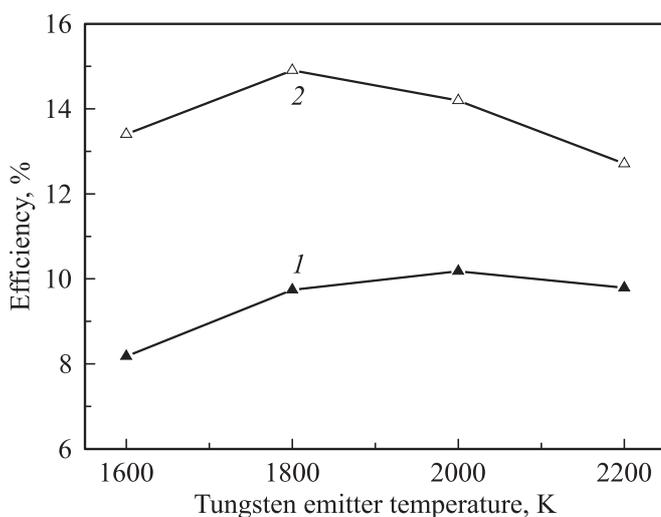
**Рис. 9.** Зависимости КПД солнечных элементов на основе GaSb (AM1.5D,  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ) от глубины травления эмиттера при различных плотностях генерируемого фототока. Подложки GaSb из LETI/DOPT (Франция) и ФТИ им. А.Ф.Иоффе.

Было определено, что оптимальная глубина постдиффузионного травления структур с указанной первоначальной глубиной залегания  $p-n$ -перехода составляет 60 нм (рис. 9).

#### 2.4. Тестирование фотоэлектрических преобразователей при различных температурах вольфрамового эмиттера в термофотоэлектрических системах

В ТФЭ системах тепловое излучение преобразуется в электрическую энергию при помощи фотоэлектрических преобразователей с малой шириной запрещенной зоны, оптимизированных для преобразования инфракрасного излучения. Источником теплового излучения в этом случае является эмиттер, разогретый концентрированным солнечным излучением или газовой горелкой. С уменьшением температуры эмиттера снижается удельная электрическая мощность, снимаемая с единицы площади фотопреобразователя. Наибольший практический интерес представляют ТФЭ системы, разогреваемые до максимально высоких (1800–2500 К) температур.

Фотоэлементы на основе GaSb, предназначенные для использования в термофотоэлектрических генераторах [13,15], тестировались под излучением вольфрамового излучателя в диапазоне температур 1600–2200 К. На рис. 10 представлены полученные зависимости КПД для GaSb-элементов без травления  $p$ -области (с начальной глубиной  $p-n$ -перехода 850 нм) и с оптимальным травлением диффузионного слоя на глубину 320 нм. Как следует из рисунка, КПД фотоэлектрического преобразователя возрастает от 9.5% (кривая 1) до 15% (кривая 2) при температуре вольфрамового излучателя 1800 К.



**Рис. 10.** Зависимости КПД ТФЭ-элементов на основе GaSb от температуры вольфрамового излучателя: 1 — GaSb-структура без утончения  $p-n$ -перехода, 2 — при глубине травления диффузионного слоя 320 нм.

### 3. Заключение

Таким образом, в данной работе установлено, что оптимизация толщины и профиля легирования эмиттера, сформированного диффузией цинка из газовой фазы с последующим прецизионным травлением структуры, приводит к существенному улучшению характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе GaSb, которые могут быть эффективно использованы для преобразования солнечного и теплового излучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (грант № 16.516.11.6053 и Соглашение № 8075), Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-08-00630-а), а также при частичной поддержке Северо-Западного ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (госконтракт № 16.552.11.7002 Министерства образования и науки России).

### Список литературы

- [1] L.M. Fraas, G.R. Girard, J.E. Avery, B.A. Arau, V.S. Sundaram, A.G. Thompson, J.M. Gee. *J. Appl. Phys.*, **66** (8), 3866 (1989).
- [2] L.M. Fraas, V.S. Sundaram, J.E. Avery, P.E. Gruenbaum, E. Malocsay. US patent 5.217.539 (June 8, 1993).
- [3] A.W. Bett, S. Keser, O. Stollwerck, O.V. Sulima, W. Wetzling. *Proc. 25 IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Washington, USA, 1996) p. 133.
- [4] V.M. Andreev, L.B. Karlina, A.B. Kazantsev, V.P. Khvostikov, V.D. Rumyantsev, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts. *Proc. 1st World Conf. of Photovolt. Energy Conversion* (Hawaii, USA, 1994) p. 1721.
- [5] V.M. Andreev, L.B. Karlina, V.P. Khvostikov, V.D. Rumyantsev, M.Z. Shvarts, S.V. Sorokina. *Proc. 4th Eur. Space Power Conf.* (Poitiers, France, 1995) v. 2, p. 363.
- [6] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. *ФТП*, **43** (5), 695 (2009).
- [7] L. Fraas, J. Avery, H. Huang, L. Minkin, E. Shifman. *Proc. IEEE 4th World Conf. on Photovolt. Energy Conversion* (Hawaii, 2006).
- [8] A. Barnett, D. Kirkpatrick, C. Honsberg, D. Moore, M. Wanlass, K. Emery, R. Schwartz, D. Carlson, S. Bowden, D. Aiken, A. Gray, S. Kurtz, L. Kazmerski, M. Steiner, J. Gray, T. Davenport, R. Buelow, L. Takacs, N. Shatz, J. Bortz, O. Jani, K. Goossen, F. Kiamilev, A. Doolittle, I. Ferguson, B. Unger, G. Schmidt, E. Christensen, D. Salzman. *Progr. Photovolt: Res. Appl.*, **17** (1), 75 (2009).
- [9] В.П. Хвостиков, А.С. Власов, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Андреев. *ФТП*, **45** (6), 810 (2011).
- [10] В.М. Андреев, Н.С. Потапович, С.В. Сорокина, В.П. Хвостиков. Патент РФ № 2413334 от 27 февраля 2011.
- [11] A. Luque. *Proc. 7th World Conf. on Thermophotovoltaic Generation of Electricity* (Madrid, Spain, 2006) p. 3.
- [12] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, A.S. Vlasov. In: *Concentrator Photovoltaics*, ed. by A. Luque, V. Andreev (Springer Series in Optical Sciences, 2007) v. 130, p. 175.

- [13] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, А.В. Малевская, А.С. Власов, М.З. Шварц, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев. *ФТП*, **44** (2), 270 (2010).
- [14] L. Fraas, J. Samaras, W. Mulligan, J. Avery, M. Groeneveld, H.-X. Huang, S. Hui, S.-Z. Ye, E. West, M. Seal. *Proc. 2nd World Photovolt. Specialists Conf.* (Vienna, Austria, 1998).
- [15] А.С. Власов, В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, В.С. Калиновский, Е.П. Ракова, В.М. Андреев, А.В. Бобыль, Г.Ф. Терещенко. *ФТП*, **44** (9) 1284 (2010).
- [16] В.П. Хвостиков, М.Г. Растегаева, О.А. Хвостикова, С.В. Сорокина, А.В. Малевская, М.З. Шварц, А.Н. Андреев, Д.В. Давыдов, В.М. Андреев. *ФТП*, **40** (10), 1275 (2006).
- [17] Ф.Ю. Солдатенков, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, Ю.М. Задиранов, М.Г. Растегаева, А.А. Усикова. *ФТП*, **45** (9), 1266 (2011).
- [18] S.V. Sorokina, V.P. Khvostikov, M.Z. Shvarts. *Proc. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition* (Nice, France, 1995) p. 61.
- [19] G. Rajagopalan, N.S. Reddy, H. Ehsani, I.B. Bhat, P.S. Dutta, R.J. Gutmann, G. Nichols, O. Sulima. *J. Electron. Mater.*, **32** (11), 1317 (2003).
- [20] O.V. Sulima, A.W. Bett. *Solar Energy Mater. and Solar Cells*, **66** (1–4), 533 (2001).
- [21] O.V. Sulima, A.W. Bett. *Technical Digest of International PVSEC-11* (Sapporo, Hokkaido, Japan, 1999) p. 441.

Редактор Т.А. Полянская

## High efficient photocells based on GaSb

V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova,  
N.Kh. Timoshina, N.S. Potapovich, B.Ya. Ber,  
D.Yu. Kazantsev, V.M. Andreev

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

**Abstract** High-current solar cells based on gallium antimonide have been designed and manufactured by zinc diffusion from the gas phase for use in solar modules and solar systems with spectral splitting at high concentration ratio, for thermophotovoltaic generators with a high temperature emitter, as well as for laser energy conversion. The influence of the thickness of  $p^+$ -diffusion layer on the main characteristics of the photocell has been investigated. The optimal doping profile and the depth of the p-n-junction for high photovoltaic conversion efficiency have been determined at the photocurrent densities up to  $100 \text{ A/cm}^2$ .