

07

## Высокоэффективные AlGaAs/GaAs фотоэлектрические преобразователи с торцевым вводом лазерного излучения

© В.П. Хвостиков, П.В. Покровский, О.А. Хвостикова,  
А.Н. Паньчак, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,  
Россия

E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

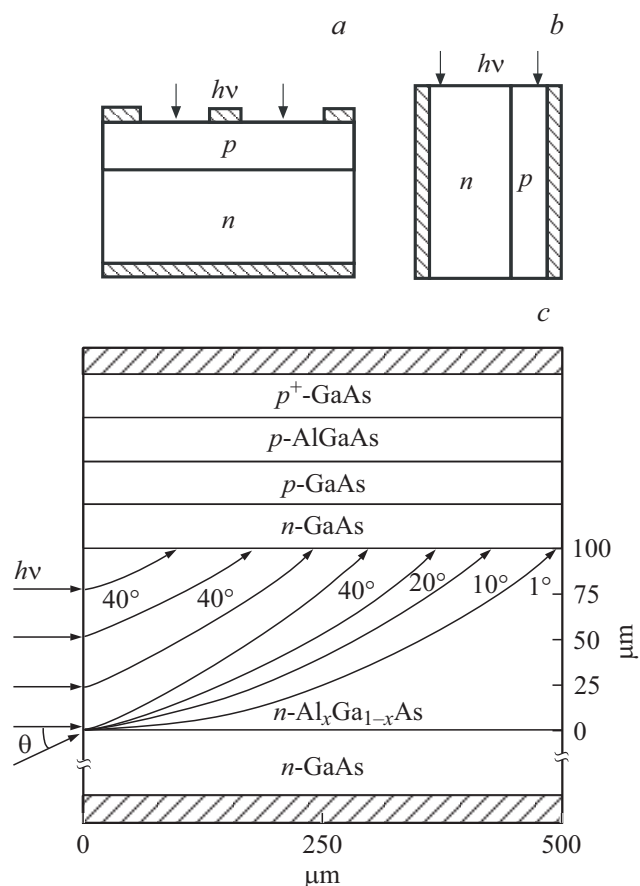
Поступило в Редакцию 23 мая 2018 г.

Разработаны и созданы методом жидкофазной эпитаксии высокоэффективные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) в системе AlGaAs–GaAs с вводом лазерного излучения ( $\lambda = 850$  nm) с торцевой поверхности параллельно плоскости  $p$ – $n$ -перехода приборной структуры. Для увеличения эффективности „захвата“ света  $p$ – $n$ -переходом сформирован волноводный слой  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с плавным изменением содержания алюминия от  $x = 0.55$  до 0.15, обеспечивающий создание градиента показателя преломления в этом слое и отклонение лучей света к  $p$ – $n$ -переходу. При засветке ФЭП (без антиотражающего покрытия) лазерным излучением мощностью 0.1–0.2 W получен КПД 41.5%. Просветление торцевой поверхности ФЭП обеспечивает повышение КПД разработанного ФЭП до 55%.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46569.17400

Мощные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) концентрированного солнечного излучения [1] и мощного лазерного излучения [2] все больше применяются в солнечной энергетике и системах беспроводной передачи энергии по лазерному лучу. В последние годы ведутся активные разработки высокоэффективных ФЭП мощного лазерного излучения [3–6], работающих в фотовольтаическом режиме без приложения внешнего смещения.

На рис. 1 показаны ФЭП двух конструкций: с традиционным вводом излучения перпендикулярно плоскости  $p$ – $n$ -перехода ( $a$ ) и с торцевым вводом излучения параллельно плоскости  $p$ – $n$ -перехода ( $b$ ). В первом случае на фронтальной поверхности мощных фотопреобразователей



**Рис. 1.** Схематическое изображение различных конструкций фотопреобразователей: *a* — с традиционным вводом излучения, *b* — с торцевым вводом излучения, *c* — конструкция разработанного фотопреобразователя с расчетными траекториями лучей света в волноводном слое  $n\text{-AlGaAs}$  толщиной  $100\ \mu\text{m}$  при различных углах  $\theta$  ввода лазерного излучения.

необходимо создание системы полосковых омических контактов, что неизбежно приводит к дополнительным оптическим потерям вследствие затенения фотоактивной поверхности контактной сеткой. Во втором

варианте излучение вводится в фотопреобразователь с торца через поверхность, полученную скалыванием (аналогично созданию плоскопараллельных торцов полупроводникового лазера), либо через вытравленную с помощью фотолитографии боковую поверхность чипа ФЭП. Ввод излучения параллельно плоскости  $p$ - $n$ -перехода позволяет уменьшить на 5–10% оптические потери на затенение полосковыми контактами, а также снизить приблизительно на порядок омические контактные потери за счет формирования сплошных металлических контактов на фронтальной и тыльной поверхностях фотоэлемента. Конструкция ФЭП с торцевым вводом излучения, т.е. с вертикальным  $p$ - $n$ -переходом (рис. 1, *b*), широко используется при изготовлении кремниевых фотопреобразователей [7]. Для ФЭП на основе материалов группы  $A^{III}B^V$  сделана теоретическая оценка таких фотопреобразователей для случая гетероструктуры AlGaAs/GaAs на подложке  $p$ -типа проводимости [8].

Задачей настоящей работы является разработка и создание методом жидкофазной эпитаксии высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей в системе AlGaAs–GaAs с вертикальным  $p$ - $n$ -переходом, т.е. с вводом лазерного излучения ( $\lambda = 850$  nm) с торцевой поверхности приборной структуры ФЭП, выращенной на подложке  $n$ -типа проводимости.

На рис. 1, *c* представлена структура разработанного нами ФЭП. Важной особенностью структуры является создание широкозонного волноводного слоя с плавным изменением коэффициента преломления твердого раствора  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  за счет плавного изменения содержания Al в слое  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , что приводит к отклонению лучей света, введенных в этот слой, к  $p$ - $n$ -переходу. На рис. 1, *c* приведены рассчитанные траектории лазерных лучей в волноводном слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной  $100\ \mu\text{m}$ , в котором показатель преломления изменяется от  $n = 3.2$  в слое со значением  $x = 0.55$  на границе с подложкой до  $n = 3.5$  в слое с  $x = 0.15$  на границе со слоем  $n\text{-GaAs}$ . Градиент концентрации AlAs в таком слое составляет величину 0.4 mol.% на  $1\ \mu\text{m}$ . Все лучи, вошедшие в волноводную область, отклоняются в область  $p$ - $n$ -перехода прежде, чем они достигнут противоположного торца структуры при длине структуры не менее  $500\ \mu\text{m}$ . При толщине волноводного слоя  $50\ \mu\text{m}$  и значении градиента концентрации AlAs, равном 0.4 mol.%, длина ФЭП, на которой происходит полное отклонение лучей к  $p$ - $n$ -переходу, составляет  $360\ \mu\text{m}$ .

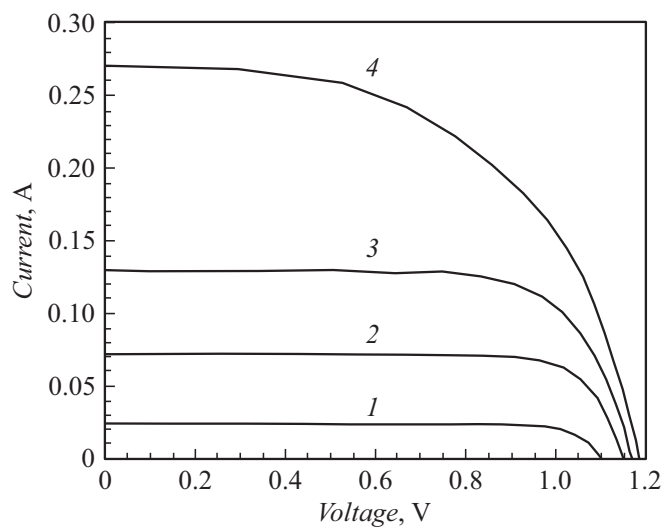
Кроме свойств волноводного слоя на траекторию лучей оказывает также влияние угол  $\theta$  их ввода в волноводный слой. Увеличение угла  $\theta$  от 1 до  $40^\circ$  приводит к снижению максимального значения горизонтальной составляющей хода лучей в волноводе от 500 до  $300 \mu\text{m}$  при толщине слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , равной  $100 \mu\text{m}$ , и от 360 до  $190 \mu\text{m}$  при толщине слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , равной  $50 \mu\text{m}$  (рис. 1, с).

Возможность создания сплошных омических контактов к верхней и нижней поверхностям структуры разработанных ФЭП позволяет исключить ряд дополнительных технологических операций, свести к минимуму постростовую обработку структуры для получения ФЭП и улучшить теплоотвод мощных ФЭП. Наряду с этим приблизительно на порядок снижаются омические контактные потери в фотопреобразователе, так как в случае сплошных контактов на порядок увеличивается площадь токосъема по сравнению с площадью токосъемной сетки в ФЭП с традиционным вводом излучения перпендикулярно плоскости  $p$ – $n$ -перехода.

Для уменьшения оптических потерь на поверхность освещаемого торца ФЭП наносится антиотражающее покрытие  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  с минимумом отражения (менее 1%) в спектральном интервале 800–870 nm.

Для создания конструкции фотопреобразователя, показанной на рис. 1, с, на подложке  $n$ -GaAs последовательно выращивались слои: первый слой с градиентом состава  $n$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.55$ – $0.15$ ), затем слой  $n$ -GaAs, слой  $p$ -GaAs, слой  $p$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.2$ – $0.1$ ) и контактный слой  $p^+$ -GaAs. Используемый метод жидкофазной эпитаксии позволяет выращивать совершенные эпитаксиальные слои толщиной от нескольких нанометров до сотен микрометров в одном технологическом процессе за относительно короткое время кристаллизации (от секунд до нескольких часов). Слои характеризуются высоким качеством за счет того, что рост происходит в условиях термодинамического равновесия. Кристаллизация градиентного слоя  $n$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной  $50 \mu\text{m}$  (с изменением содержания алюминия в волноводном слое от  $x = 0.55$  на границе с подложкой до  $x = 0.15$  на гетерогранице со слоем  $n$ -GaAs) осуществлялась при охлаждении в диапазоне температур от  $850$  до  $600^\circ\text{C}$ .

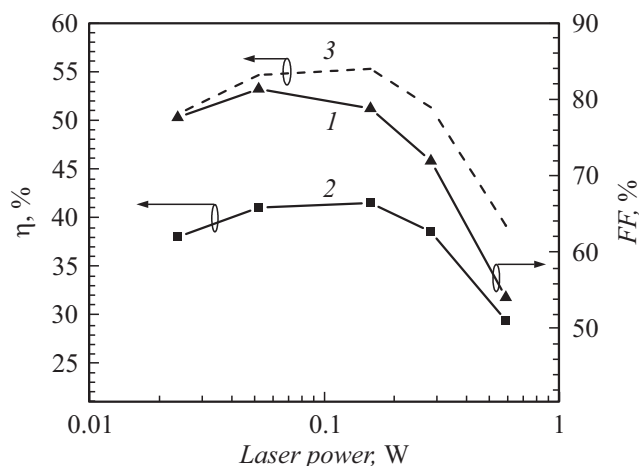
В качестве донорной легирующей примеси выбор был остановлен на олове, имеющем меньшее значение парциального давления пара по сравнению с теллуром.



**Рис. 2.** Семейство световых вольт-амперных характеристик фотоэлектрического преобразователя (без просветляющего покрытия) при засветке лазерным излучением с торцевой поверхности с длиной волны 850 nm и мощностью 0.05 (1), 0.15 (2), 0.28 (3), 0.6 W (4).

В качестве акцепторной примеси был выбран германий, поскольку он в отличие от магния и цинка характеризуется меньшим значением парциального давления пара при температурах проведения эпитаксии. С целью снижения контактного сопротивления ФЭП в конце эпитаксии выращивался контактный слой  $p^+$ -GaAs при температурах роста 600–520°C. При содержании германия в расплаве галлия 5 at.% уровень легирования контактного слоя GaAs составил  $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , что обеспечило формирование низкоомного контакта.

На рис. 2 представлены световые вольт-амперные характеристики созданного фотоэлектрического преобразователя с торцевым вводом излучения, в котором толщина волноводного эпитаксиального слоя составила 50  $\mu\text{m}$ . Ввод импульсного лазерного излучения с длиной волны 850 nm различной мощности от 0.05 до 0.6 W осуществлялся из оптического волокна диаметром 50  $\mu\text{m}$ .



**Рис. 3.** Зависимость фактора заполнения ( $FF$ ) вольт-амперных характеристик фотоэлектрического преобразователя (1) и КПД ( $\eta$ ) без антиотражающего покрытия (2) и с антиотражающим покрытием (3) от мощности излучения при торцевом вводе лазерного излучения ( $\lambda = 850 \text{ nm}$ ).

Зависимости эффективности ФЭП и фактора заполнения нагрузочных характеристик от мощности лазерного излучения представлены на рис. 3. Максимальное значение КПД фотоэлектрического преобразования лазерного излучения составило 41.5% в ФЭП без просветляющего покрытия и 55% в ФЭП с просветляющим покрытием на торцевой поверхности.

Таким образом, в работе проведено моделирование хода лучей в структуре с торцевым вводом лазерного излучения при линейном изменении содержания алюминия в волноводном слое. Определено, что при вводе излучения под углом  $1^\circ$  к плоскости роста структуры с толщиной волноводного слоя, равной  $100 \mu\text{m}$ , минимальная длина ФЭП должна составлять не менее  $500 \mu\text{m}$ . Увеличение угла ввода излучения до  $40^\circ$  приводит к уменьшению „эффективной“ длины ФЭП до  $300 \mu\text{m}$  и увеличению плотности мощности облучения на  $p-n$ -переходе. Методом жидкофазной эпитаксии выращены приборные гетероструктуры AlGaAs/GaAs, на основе которых изготовлены фотоэлектрические преобразователи со сплошным тыльным и фронталь-

ным контактами с торцевым вводом лазерного излучения. В ФЭП с толщиной градиентного волноводного слоя, равной  $50\ \mu\text{m}$ , с просветленной торцевой поверхностью при засветке лазерным излучением ( $\lambda = 850\ \text{nm}$ ) мощностью  $0.1\text{--}0.2\ \text{W}$  обеспечено достижение КПД 55%, что сравнимо с максимальными значениями КПД, полученными в ФЭП с традиционным вводом излучения перпендикулярно плоскости  $p\text{--}n$ -перехода.

Один из путей дальнейшего повышения КПД разработанных AlGaAs-фотопреобразователей состоит в возможности согласования ширины запрещенной зоны ФЭП с длиной волны падающего лазерного излучения путем изменения содержания алюминия в фотоактивных слоях в области  $p\text{--}n$ -перехода.

## Список литературы

- [1] *Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rumyantsev V.D.* // Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. John Wiley & Sons, 1997. 308 p.
- [2] *Andreev V., Khvostikov V., Kalinovsky V., Lantratov V., Grilikhes V., Rumyantsev V., Shvarts M., Fokanov V., Pavlov A.* // Proc. of WCPEC-3. Osaka, 2003. V. 1. P. 3P-B5-33.
- [3] *Zhao Y., Sun Y., He Y., Yu S., Dong J.* // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 38044.
- [4] *Андреев В.М.* // Современная электроника. 2014. № 6. С. 20–25.
- [5] *Хвостиков В.П., Сорокина С.В., Потапович Н.С., Хвостикова О.А., Тимошина Н.Х.* // ФТП. 2017. Т. 51. В. 5. С. 676–679.
- [6] *Oliva E., Dimroth F., Bett A.W.* // Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 2008. V. 16. N 4. P. 289–292.
- [7] *Pozner R., Segev G., Sarfaty R., Kribus A., Rosenwaks Y.* // Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 2012. V. 20. N 2. P. 197–208.
- [8] *Kashyap B., Datta A.* // IEEE Trans. Electron Dev. 2017. V. 64. N 6. P. 2564–2571.