

## Сравнительный анализ характеристик термофотовольтаических преобразователей на основе структур $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$ , облучаемых со стороны $p$ - и $n$ -типа проводимости

© Б.А. Матвеев,<sup>1</sup> В.И. Ратушный,<sup>2</sup> А.Ю. Рыбальченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Волгодонский инженерно-технический институт —  
филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ,  
347360 Волгодонск, Россия  
e-mail: ioffeled@mail.ru

Поступило в Редакцию 9 октября 2018 г.

В окончательной редакции 27 января 2019 г.

Принято к публикации 19 февраля 2019 г.

Проведено моделирование основных характеристик термофотовольтаических преобразователей, выполненных на основе гетероструктур  $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$  в конструкциях с контактом ограниченной площади к облучаемому слою  $p\text{-InAsSbP}$  и флип-чип с вводом излучения через свободную от контактов поверхность подложки  $n^+\text{-InAs}$ . Показано влияние особенностей конструкции на температуру активной области и на эффективность преобразователя.

**Ключевые слова:** термофотовольтаический преобразователь, гетероструктуры  $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ , флип-чип, тепловой режим.

DOI: 10.21883/JTF.2019.08.47897.355-18

### Введение

Электрогенераторы, в которых термофотовольтаический преобразователь (ТФВП) облучается положительным [1] или отрицательным [2] потоком фотонов, представляют собой один из перспективных видов источников питания. Такие генераторы в отличие от электромеханических систем не содержат движущихся частей, что обеспечивает низкий уровень шума при работе и простоту обслуживания. В отличие от солнечных батарей генераторы с ТФВП могут работать круглосуточно за счет поглощения энергии горения топлива и/или поверхности Земли [2]. Наиболее часто совместно с ТФВП используется эмиттер, близкий по свойствам к абсолютно черному телу (АЧТ), нагретому до температуры от 600 до 2000°C. Плотность выходной мощности для ТФВП на основе диодной структуры с шириной запрещенной зоны  $E_g = 0.3\text{--}0.4\text{ eV}$  и температурой эмиттера 600°C, согласно расчетам, проведенным в [1], может достигать 0.44 W/cm<sup>2</sup> при КПД  $\eta = 41.5\%$ .

Конструкция ТФВП с неглубоким залеганием  $p\text{--}n$ -перехода от поверхности и имеющая разветвленный контакт (анод) к эпитаксиальному слою на облучаемой стороне гетероструктуры (ГС) и сплошной непрозрачный контакт к подложке (англ. — „front-side illuminated“ (FSI)) широко распространена ввиду большой ширины спектра фоточувствительности и простоты технологических процессов ее изготовления [3,4]. Вместе с тем одним из недостатков такой конструкции является удаленность области поглощения от теплоотвода и

соответственно высокое тепловое сопротивление между активной областью и теплоотводом, на который обычно монтируется ТФВП. Согласно [5], для такого диода, имеющего размеры  $450 \times 450\ \mu\text{m}$  и изготовленного на основе ГС  $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}/n^+\text{-InAs}/\text{теплоотвод}$ , тепловое сопротивление между активной областью (АО) и теплоотводом составляет  $R_{\Theta \text{ Act-Sink}} = 75\ \text{K/W}$ . Высокое значение  $R_{\Theta \text{ Act-Sink}}$  негативно сказывается на эффективности преобразования, поскольку ограничивает возможность для снижения температуры ТФВП в процессе эксплуатации.

Для уменьшения теплового сопротивления ТФВП можно использовать конструкцию флип-чип (или „backside illuminated“ (BSI)), в которой оба омических контакта расположены на эпитаксиальной стороне, а излучение эмиттера вводится через свободную от контактов поверхность прозрачной подложки  $n$ -типа проводимости. В таком ТФВП активная область ( $p\text{--}n$ -переход) может быть расположена максимально близко к теплоотводу, и, согласно [5], для нее  $R_{\Theta \text{ Act-Sink}} = 52\ \text{K/W}$ , что существенно меньше, чем для ТФВП типа FSI. С другой стороны, спектральная характеристика фоточувствительности ТФВП типа BSI имеет резкий спад в области коротких волн, что несколько снижает эффективность использования излучения эмиттера. Насколько нам известно, в литературе отсутствуют примеры анализа совокупного влияния вышеупомянутых факторов на эффективность ТФВП типа BSI на основе  $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ , равно как и нет примеров использования таких ГС для получения электроэнергии.

В настоящей работе приводится сравнительный анализ рабочих характеристик двух типов ТФВП (BSI и FSI) с поглощающей областью из  $n$ -InAs и широкозонным слоем  $p$ -InAsSbP, работающих совместно с эмиттером, нагретым до  $T_e = 600\text{--}1000^\circ\text{C}$ , с учетом различий в их конструкции, включая различия в эффективности отвода тепла от АО и отличия их спектральных характеристик.

## Образцы и методика исследований

Для изготовления ТФВП предполагалось использовать ГС, выращенные на сильнолегированных подложках  $n^+$ -InAs толщиной  $350\ \mu\text{m}$ , аналогичные описанным в [6,7]. На основе таких структур серийно производятся фотодиоды (ФД) типа PD33FS и PD34BS в конструкции FSI и флип-чип соответственно [8]. Статистически усредненные вольтамперные характеристики (ВАХ) и спектры токовой чувствительности  $S_I(\lambda)$  указанных ФД использовались в качестве исходных данных для ТФВП. Предполагалось, что ТФВП работает совместно с АЧТ, имеющим температуру  $T_e = 600^\circ\text{C}$ .

Плотность фототока ТФВП определялась из выражения

$$J_{ph} = \int_0^{\infty} S_I(\lambda) r_{\lambda,T} d\lambda,$$

где  $r_{\lambda,T}$  — спектральная плотность энергетической светимости в формуле Планка.

Нагрузочные ВАХ определялись как

$$J = J_{ph} - J_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right],$$

где  $J_0$  — плотность обратного тока, определяемая из прямой ветви ВАХ.

Из нагрузочных ВАХ определялась выходная мощность на единицу площади ТФВП

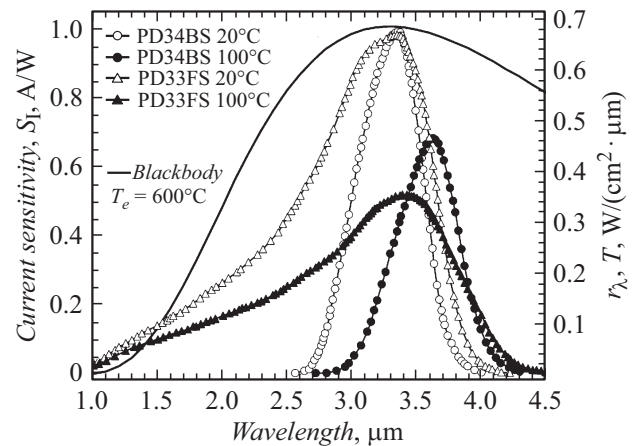
$$P/A = U \cdot J(U),$$

а максимальная мощность ТФВП  $(P/A)_{\max}$  определялась из условия  $d(P/A)/dU = 0$ .

Для оценки КПД предполагалось, что излучение падает на поверхность ТФВП по нормали; коэффициент отражения при этом можно принять  $\rho \approx 0.35$  [9]. Предполагалось также, что прошедшее в ТФВП излучение полностью поглощается в полупроводнике, соответствующая поглощенная интенсивность излучения ( $I_1$ ) определялась по формуле

$$I_1 = (1 - \rho) \int_0^{\lambda_{0,5}} r_{\lambda,T} d\lambda,$$

где длина волны  $\lambda_{0,5}$  соответствует половине максимальной токовой чувствительности на длинноволновом спаде рабочего спектра.



**Рис. 1.** Типичные спектры токовой чувствительности ФД типа PD33FS и PD34BS при температурах 20 и  $100^\circ\text{C}$ ; спектр излучения АЧТ с температурой  $T_e = 600^\circ\text{C}$ .

Предполагалось также, что излучение в области спектра  $\lambda > \lambda_{0,5}$  без поглощения проходит полупроводниковую структуру, затем отражается от контакта на тыльной стороне с коэффициентом отражения  $\rho_1 = 0.6$  [10]. С учетом этого интенсивность излучения, поглощаемого в тыльном контакте ( $I_2$ ), оценивалась по формуле

$$I_2 = (1 - \rho)(1 - \rho_1) \int_{\lambda_{0,5}}^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda.$$

С учетом значений выходной мощности и интенсивности поглощаемого излучения определялся КПД ТФВП

$$\eta = \frac{(P/A)_{\max}}{I_1 + I_2}.$$

На рис. 1 представлены типичные спектры токовой чувствительности ФД типа PD33FS и PD34BS при температурах 20 и  $100^\circ\text{C}$ , а также спектр излучения АЧТ с температурой  $T_e = 600^\circ\text{C}$ . Как видно из рис. 1, максимумы спектров чувствительности ФД при  $20^\circ\text{C}$  соответствуют максимуму спектра излучения АЧТ. При повышении температуры ФД до  $100^\circ\text{C}$  их спектры чувствительности сдвигаются в область более длинных волн, причем для ФД типа флип-чип (BSI) наблюдается более сильный сдвиг, чем для ФД типа FSI. Из рис. 1 также видно, что значения  $S_I$  в максимуме для ФД обоих типов при  $20^\circ\text{C}$  одинаковы, а при  $100^\circ\text{C}$  токовая чувствительность ФД типа флип-чип (BSI) значительно выше, чем для ФД типа FSI. При этом рабочий спектр ФД типа FSI значительно расширен в область коротких волн.

## Моделирование теплового режима работы ТФВП

Будем считать, что все излучение эмиттера попадает на фотоприемную поверхность ТФВП, т.е. эффективная

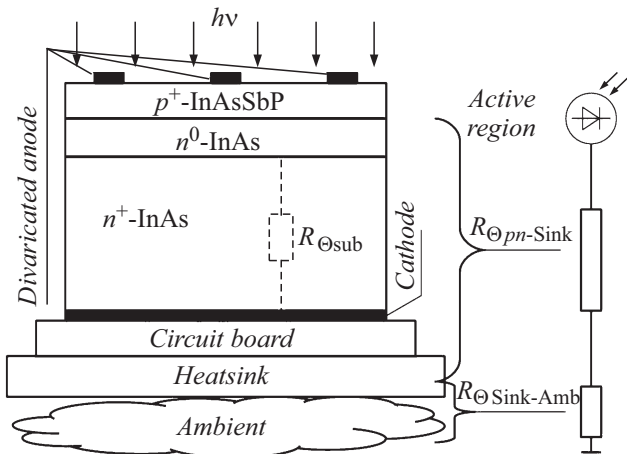


Рис. 2. Схема и эквивалентная тепловая цепь для ТФВП в конструкции с разветвленным анодом к эпитаксиальному слою p-типа на облучаемой поверхности.

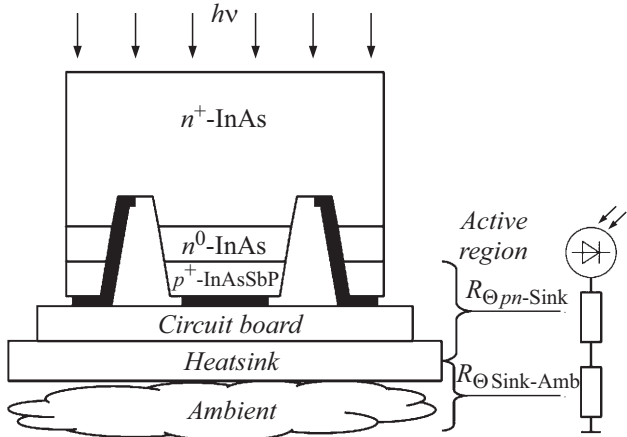


Рис. 3. Схема и эквивалентная тепловая цепь для ТФВП в конструкции флип-чип.

площадь ТФВП ( $A$ ) равна площади излучающей поверхности эмиттера.

На рис. 2 показана схема и эквивалентная тепловая цепь для ТФВП в конструкции FSI. Как видно из рис. 2, тепловое сопротивление между активной областью и теплоотводом ( $R_{\Theta pn-Sink}$ ) складывается из тепловых сопротивлений подложки ( $R_{\Theta sub}$ ) и монтажной платы между чипом и теплоотводом. Согласно оценкам [5], для диода размерами  $450 \times 450 \mu m$  величина  $R_{\Theta pn-Sink} = 75 \text{ K/W}$ , а произведение  $R_{\Theta pn-Sink} \cdot A$  составляет  $0.152 \text{ (K/W)} \cdot \text{cm}^2$ .

На рис. 3 показана схема и эквивалентная тепловая цепь для ТФВП в конструкции флип-чип (BSI), в которой оба контакта сформированы на эпитаксиальной стороне, а излучение от эмиттера вводится через подложку. Для такой конструкции величина  $R_{\Theta pn-Sink}$ , определяемая, главным образом, влиянием монтажной платы, составляет  $52 \text{ K/W}$  для диода с круглой мезой

Результаты расчетов предполагаемого перегрева ТФВП относительно теплоотвода при разных температурах эмиттера

$T_e, ^\circ\text{C}$	$I, \text{W/cm}^2$	$\Delta T_{pn-Sink}$ (FSI), К	$\Delta T_{pn-Sink}$ (флип-чип), К
600	3.3	0.5	0.1
700	5.1	0.8	0.2
800	7.5	1.1	0.3
900	10.7	1.6	0.4
950	12.7	1.9	0.5
1000	14.9	2.3	0.5

диаметром  $300 \mu m$  [5]. Для ТФВП такого типа в предположении, что площадь  $p-n$ -перехода равна  $A$ , величина  $R_{\Theta pn-Sink} \cdot A$  составляет  $0.036 \text{ (K/W)} \cdot \text{cm}^2$ .

Для простоты будем считать, что вся энергия излучения эмиттера идет на нагрев ТФВП. В таблице представлены результаты расчета „перегрева“ АО, т.е. разности температур  $\Delta T$  между АО ТФВП и теплоотводом при разных температурах эмиттера. При расчетах предполагалось, что температура окружающей среды равна  $300 \text{ K}$  и тепловое сопротивление между теплоотводом и окружающей средой пренебрежимо мало ( $R_{\Theta pn-Sink-Amb} = 0$ ). Как видно из таблицы, величина перегрева  $\Delta T$  для ТФВП в конструкции флип-чип примерно в 4 раза ниже, чем для ТФВП в конструкции FSI. В то же время величина  $\Delta T$  не превышает  $2.3 \text{ K}$  при температурах эмиттера от  $600$  до  $1000^\circ\text{C}$ .

На рис. 4, а представлены результаты расчета напряжения холостого хода ( $U_{oc}$ ) и плотности фототока короткого замыкания ( $J_{sc}$ ) для ТФВП обоих типов в зависимости от температуры чипа. Температура эмиттера принималась равной  $T_e = 600^\circ\text{C}$ . Как видно из рис. 4, а, величина  $U_{oc}$  для ТФВП типа FSI на  $3-5 \text{ mV}$  ниже, чем для ТФВП типа флип-чип, в диапазоне температур чипов от  $20$  до  $100^\circ\text{C}$ . Ожидаемая величина  $U_{oc}$  для ТФВП типа FSI составляет  $73 \text{ mV}$  при  $20^\circ\text{C}$  и снижается до  $5.6 \text{ mV}$  при разогреве ТФВП до  $100^\circ\text{C}$ ; для ТФВП типа флип-чип значения  $U_{oc}$  при  $20$  и  $100^\circ\text{C}$  составляют  $76$  и  $10 \text{ mV}$  соответственно.

Из рис. 4, а, также видно, что во всем исследованном диапазоне температур чипов плотность фототока  $J_{sc}$  для ТФВП типа FSI примерно в  $2-4$  раза выше, чем для ТФВП типа флип-чип (BSI). Это связано с более широким спектром фоточувствительности ТФВП типа FSI, что обеспечивает более высокую, чем у ТФВП типа флип-чип (BSI), интегральную чувствительность по отношению к излучению АЧТ.

На рис. 4, б представлены зависимости ожидаемой максимальной мощности на единицу площади ( $P_{max}/A$ ) для ТФВП обоих типов в зависимости от их температуры. Как видно из рис. 4, б, для ТФВП типа FSI при  $20^\circ\text{C}$  величина  $P_{max}/A$  составляет  $\sim 24 \text{ mW/cm}^2$ , а при разогреве ТФВП до  $100^\circ\text{C}$  снижается до  $1 \text{ mW/cm}^2$ . Для ТФВП типа флип-чип значение  $P_{max}/A$  составля-

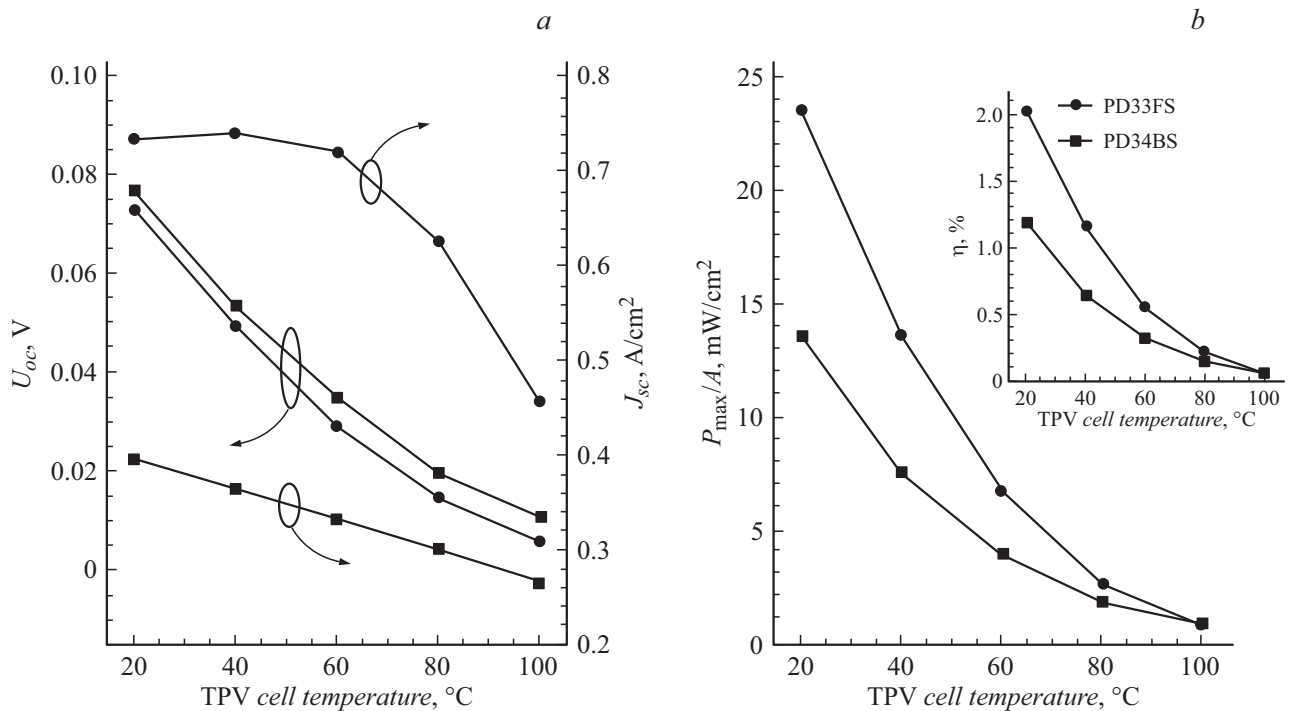


Рис. 4. Расчетные зависимости выходных параметров ТФВП от температуры чипа.

ет  $\sim 14 \text{ mW/cm}^2$  при  $20^\circ\text{C}$  и снижается до  $1 \text{ mW/cm}^2$  при разогреве ТФВП до  $100^\circ\text{C}$ . Отметим также, что для ТФВП типа FSI за счет более широкого спектра фоточувствительности ожидаемые значения  $P_{max}/A$  при температурах ТФВП  $20\text{--}60^\circ\text{C}$  примерно в 2 раза выше, чем для ТФВП типа флип-чип (BSI).

На вставке на рис. 4, *b*, представлены результаты оценки КПД для ТФВП разных конструкций. Для ТФВП типа FSI ожидаемое значение КПД составляет 1.7% при температуре ТФВП  $20^\circ\text{C}$  и снижается до  $\eta \approx 0.05\%$  при разогреве ТФВП до  $100^\circ\text{C}$  за счет повышения плотности темнового тока. Для ТФВП типа флип-чип (BSI) КПД составил  $\eta \approx 1.05\%$  при  $20^\circ\text{C}$  и  $\eta \approx 0.05\%$  при  $100^\circ\text{C}$ .

Полученные результаты показывают, что, в целом, КПД для ТФВП типа флип-чип существенно ниже, чем для FSI, из-за поглощения излучения в подложке/более узкого спектра фоточувствительности. Поэтому для дальнейшего совершенствования ТФВП типа флип-чип необходимо удаление/утонение подложки и расширение рабочего спектра ТФВП в область коротких волн.

## Заключение

Таким образом, показаны возможности ТФВП на основе гетероструктур  $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$ , выполненных в двух разных конструкциях и работающих совместно с моделью АЧТ с температурой  $600\text{--}1000^\circ\text{C}$ . Ожидаемая разность температур между активной областью ТФВП и теплоотводом не превышала 2.3 и 0.5 К для ТФВП в конструкции FSI и флип-чип соответственно.

Проведен расчет ожидаемых значений основных параметров ТФВП при температуре активной области ТФВП от  $20$  до  $100^\circ\text{C}$ . При этом значения напряжения холостого хода для ТФВП типа FSI и флип-чип различались не более чем на  $3\text{--}5 \text{ mV}$ . Плотность фототока для ТФВП типа флип-чип (BSI) была в  $2\text{--}4$  раза меньше, чем для ТФВП типа FSI, за счет поглощения излучения в подложке.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Datas A.* // Sol. Energ. Mat. Sol. C. 2015. Vol. 134. N 1. P. 275–290.
- [2] *Santhanam P., Fan S.* // Phys. Rev. B. 2016. Vol. 93. P. 161410(R).
- [3] *Mauk M.G., Andreev V.M.* // Semicond. Sci. Tech. 2003. Vol. 18. N 5. P. S191–S201.
- [4] *Krier A., Yin M., Marshall A.R.J., Krier S.E.* // J. Electron. Mater. 2016. Vol. 45. N 6. P. 2826–2830. DOI: 10.1007/s11664-016-4373-0
- [5] *Malyutenko V.K., Malyutenko O.Yu., Zinovchuk A.V.* // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 201114.
- [6] *Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Рыбальченко А.Ю., Стусь Н.М.* // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 4. С. 554–559. [*Zotova N.V., Karandashev S.A., Matveev B.A., Remennyu M.A., Rybal'chenko A.Yu., Stus' N.M.* // Semiconductors. 2011. Vol. 45. N 4. P. 543–549.]

- [7] *Matveev B.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Remennyi M.A., Stus' N.M., Talalakin G.N.* // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4650. P. 173.
- [8] Каталог ООО „Иоффе.ЛЕД“ [Электронный ресурс]  
URL: <http://www.ioffeled.com>
- [9] База данных NSM Archive [Электронный ресурс]  
URL: [www.matprop.ru](http://www.matprop.ru)
- [10] *Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Черняков А.Е.* // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 3. С. 412–417. [*Zakhgeim A.L., Zotova N.V., I'inskaya N.D., Karandashev S.A., Matveev B.A., Remennyi M.A., Stus' N.M., Chernyakov A.E.* // Semiconductors. 2009. Vol. 43. N 3. P. 394–399.]