

07

## Тритиевые источники электропитания на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs

© В.П. Хвостиков, В.С. Калиновский, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 июня 2019 г.

В окончательной редакции 18 июля 2019 г.

Принято к публикации 27 августа 2019 г.

Приведены результаты разработки радиоизотопного источника электропитания на основе полупроводникового ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ) преобразователя энергии  $\beta$ -излучения и трития в качестве источника излучения. Проведено сравнение эффективности преобразователя при использовании в качестве источника радиоизотопного излучения насыщенного тритием титанового диска, тритиевой лампы зеленого люминесцентного свечения и газообразного трития. При использовании преобразователя на основе гетероструктуры  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$  в капсуле с тритием получен КПД  $\eta = 5.9\%$  при максимальной выходной удельной электрической мощности  $0.56 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . За счет длительного ресурса работы такие автономные и компактные источники электропитания могут использоваться в космической и подводной технике, в имплантатах-кардиостимуляторах, биологических датчиках, портативном мобильном оборудовании высокой надежности.

**Ключевые слова:** радиоизотопный источник питания, тритий,  $\beta$ -излучение, AlGaAs/GaAs.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.23.48716.17941n

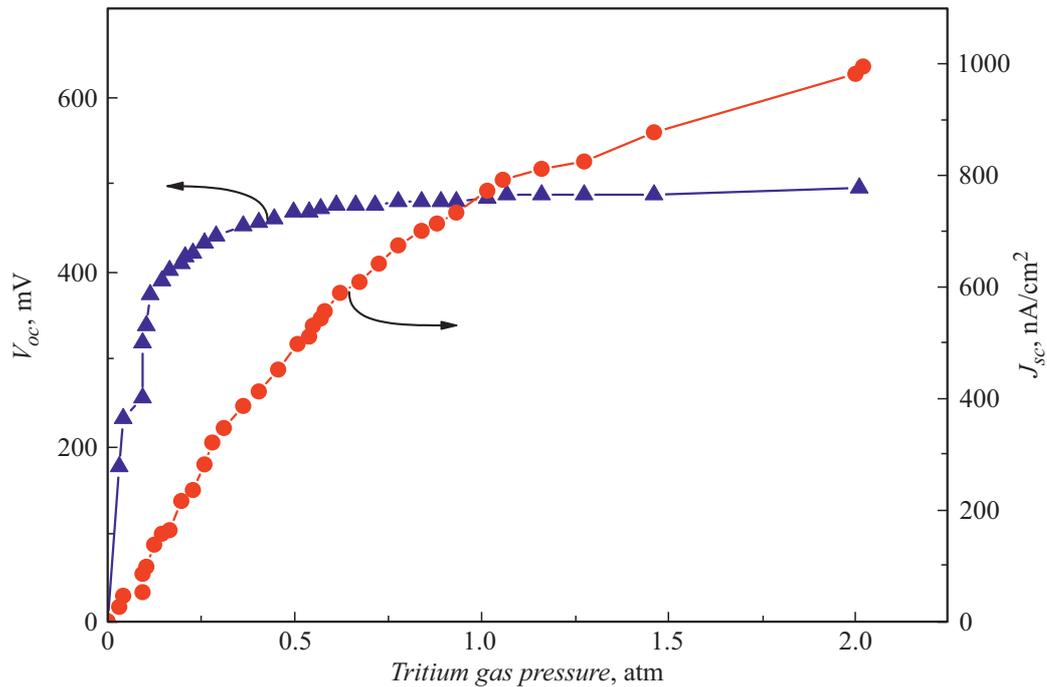
В отличие от традиционных фотоэлементов, облучаемых фотонами, в радиоизотопных источниках электропитания (РИЭП) используется энергия  $\beta$ -распада (прямое преобразование энергии  $\beta$ -частиц) [1–3] или радиолюминесцентное излучение (двухступенчатое преобразование активированного свечения люминофоров) [4,5]. Основными требованиями, предъявляемыми к РИЭП, являются большой срок эксплуатации (до 10–20 лет), высокая эффективность и выходная удельная мощность при малой энергии ионизирующего излучения для предупреждения деградации бета-вольтаического преобразователя (БВП), доступная стоимость, отсутствие загрязнения окружающей среды. За счет длительного ресурса работы РИЭП находят практическое применение при использовании в агрессивных средах, в удаленных или труднодоступных местах (в космической, морской и подводной технике, на Крайнем Севере, в имплантатах-кардиостимуляторах, протезных устройствах и биологических датчиках). Такие источники питания не нагреваются при эксплуатации, а после снижения активности изотопа не содержат токсичных веществ.

Характеристики РИЭП зависят от свойств изотопа, выбора конструкции и полупроводникового материала БВП. Ранее сообщалось об использовании  $^{90}\text{Sr}$ – $^{90}\text{Y}$  [6], однако в настоящее время большее распространение получают  $\beta$ -батареи на основе  $^{147}\text{Pm}$  [7],  $^{63}\text{Ni}$  или трития [3,7]. Сравнение активности, безопасности, доступности и стоимости изотопов показывает, что тритий — один из лучших кандидатов в качестве источника излучения. Он относится к нестабильным изотопам с достаточно большим (12.3 года) периодом полураспада, в процессе которого превращается в гелий и испускает

электроны с максимальной энергией 18.6 keV. Излучение низких энергий не приводит к заметной генерации дефектов в полупроводнике и деградации БВП. Максимальный пробег электронов на воздухе при распаде трития составляет 4.2 mm, поэтому при внешнем облучении тритий не представляет серьезной угрозы и не требует дополнительной биологической защиты (в отличие от  $^{90}\text{Sr}$  или  $^{147}\text{Pm}$ ). Тритий характеризуется относительно низкой стоимостью и доступностью в виде тритий-титановой фольги и радиолюминесцентных тритиевых ламп (герметично запаянных и заполненных газообразным тритием стеклянных капсул, внутренняя поверхность которых покрыта люминофором).

В бета-вольтаических РИЭП используются преимущественно преобразователи на основе кремния [8,9] и полупроводников  $\text{A}^3\text{B}^5$  [3,10], в которых существует возможность изменения ширины запрещенной зоны. Для БВП на основе кремния эффективность ( $\eta$ ) теоретически может достигать  $\sim 15\%$ , в AlGaAs/GaAs  $\sim 22\%$ , в GaP  $\sim 24\%$  [1].

В настоящей работе представлены результаты создания и исследования РИЭП на основе эпитаксиальных гетероструктур AlGaAs/GaAs с использованием тритиевых эмиттеров различного типа. БВП с ультратонкими фронтальными слоями были выращены методом эпитаксии из жидкой фазы при пониженной температуре кристаллизации (400–500°C). Приборная структура включала буферный слой  $n$ -GaAs,  $p$ - $n$ -переход в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  ( $x = 0.1$ – $0.35$ ), ультратонкий широкозонный  $p$ - $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$  и контактный слой  $p^+$ -GaAs, удаляемый в местах, свободных от фронтальной металлизации.



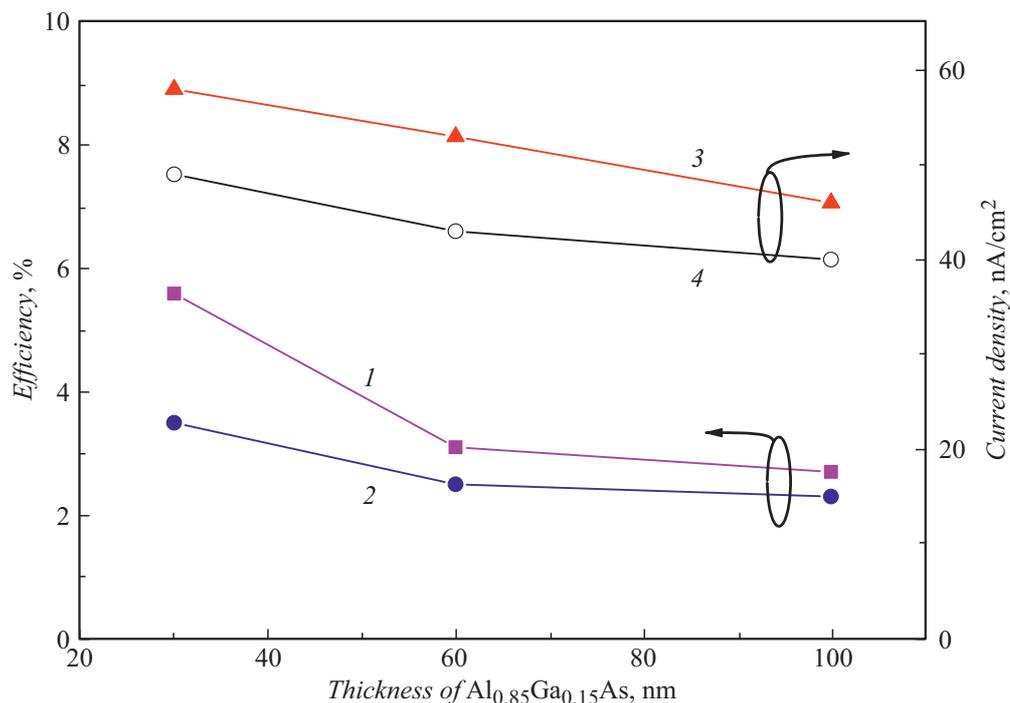
**Рис. 1.** Напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ) и ток короткого замыкания ( $J_{sc}$ ) БВП на основе гетероструктур  $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$  ( $S = 0.3 \text{ cm}^2$ ) в зависимости от давления газообразного трития.

**Таблица 1.** Параметры помещенных в капсулу, заполненную газообразным тритием, БВП с  $p$ - $n$ -переходом в  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$  и  $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$

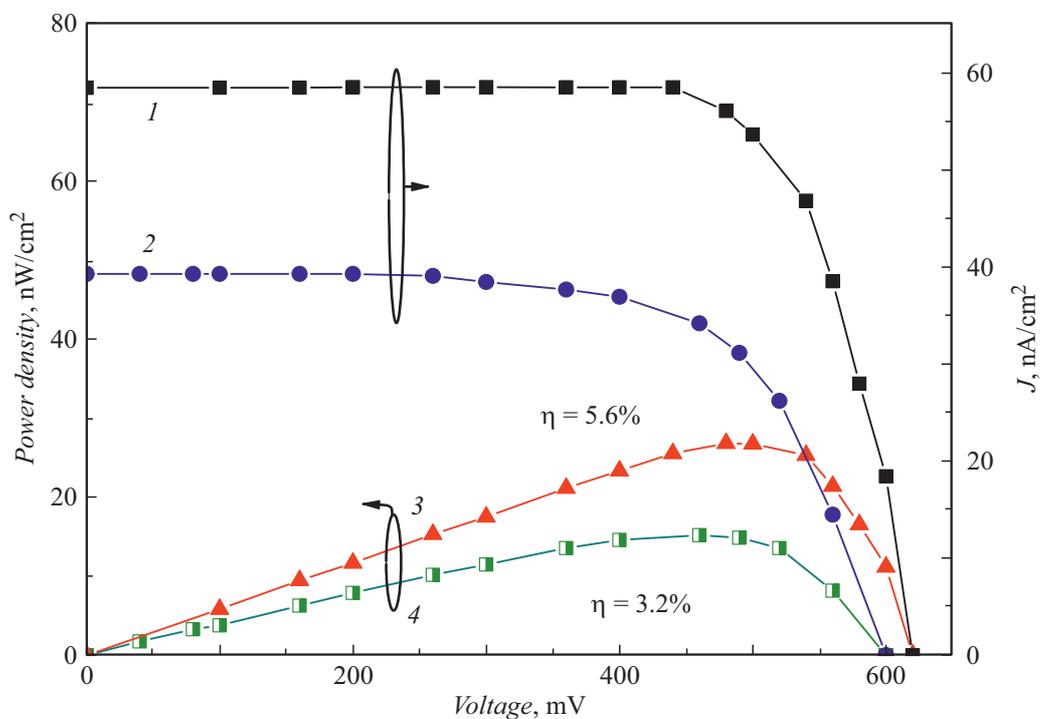
Параметр	Значение	
	Активная область $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$	Активная область $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$
Плотность фототока, $\mu A/cm^2$	1.0	0.76
Напряжение холостого хода $V_{oc}$ , V	0.65	0.9
Коэффициент заполнения ВАХ $FF$ , %	78	79
$\eta$ , %	5.4	5.9

**Таблица 2.** Параметры БВП при облучении различными тритиевыми источниками излучения

Источник $\beta$ -излучения	Плотность фототока, $nA/cm^2$	Напряжение холостого хода, V	Плотность выходной мощности, $nW/cm^2$
Тритий-титановый твердотельный эмиттер	58	0.62	27
Капсулированный газообразный тритий	760	0.91	560
Тритиевая лампа зеленого (550 nm) свечения	180	0.79	100



**Рис. 2.** Зависимость КПД (1, 2) и плотности генерированного тока (3, 4) от толщины широкозонного слоя  $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$  в БВП в случае титанового источника с мощностью  $0.48 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . 1, 3 — структуры с  $p$ - $n$ -переходом в  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  без защитного покрытия, 2, 4 — с защитной пленкой ZnS (50 nm).



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики (ВАХ) (1, 2) и зависимости мощность—напряжение (3, 4) в БВП на основе  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  без защитного покрытия (1, 3) и с пленкой ZnS (2, 4) в случае титанового источника с мощностью излучения  $0.48 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

Исследовались три типа источников  $\beta$ -излучения:

- тритий-титановый диск с диаметром 1–1.5 см;
- $\beta$ -люминесцентные лампы зеленого свечения;
- капсулированный газообразный тритий.

В последнем случае БВП с активной площадью  $S = 0.3\text{--}1.0\text{ cm}^2$  помещался внутрь объема, заполненного тритием (в капсулу) до давления 1–2 atm. Плотность генерированного фототока при этом достигала  $\sim 10^{-6}\text{ A/cm}^2$  (рис. 1).

В табл. 1 представлены выходные параметры помещенных в капсулу бета-вольтаических преобразователей с различающейся по содержанию алюминия активной областью. На лучших образцах с  $p$ - $n$ -переходом в  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  достигнуты значения КПД  $\eta = 5.9\%$  и выходная удельная мощность  $0.56\text{ }\mu\text{W/cm}^2$ .

Твердотельные тритий-титановые радиоактивные источники  $\beta$ -излучения генерируют значительно меньшую выходную электрическую мощность, чем при использовании газообразного трития (таблица 2). Характеристики БВП в случае тритий-титанового эмиттера показаны на рис. 2, 3. Как следует из представленных зависимостей, при плотности мощности  $\beta$ -излучения  $0.48\text{ }\mu\text{W/cm}^2$  с уменьшением толщины широкозонного слоя  $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$  от  $d \sim 100$  до 30 nm генерированный фототок возрастал в 1.5 раза. Нанесение на поверхность гетероструктуры защитной пленки ZnS (толщиной  $\sim 50\text{ nm}$ ) приводило к уменьшению плотности генерируемого тока на 15–20 nA/cm<sup>2</sup> за счет „бесполезного“ поглощения в слое ZnS (рис. 3, кривые 3, 4). В БВП с  $p$ - $n$ -переходом в  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  в случае тритий-титанового источника излучения получены плотность выходной электрической мощности 15–27 nW/cm<sup>2</sup> и КПД  $\eta = 5.6\%$  (рис. 3).

Двухэтапное преобразование свечения активированных тритием люминофоров (табл. 2) может обеспечить достаточно высокую оптическую эффективность благодаря точной подстройке ширины запрещенной зоны фотоэлемента  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}$  под длину волны источника, однако требует специальных мер по уменьшению потерь на накачку люминофора, а также минимизации самопоглощения в нем и рассеяния выходящего излучения, что в итоге снижает суммарный КПД.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что наиболее перспективным типом тритиевых РИЭП, обеспечивающим максимальную выходную электрическую мощность и высокий суммарный КПД, являются капсулированные с газообразным тритием гетероструктурные элементы  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}$  для прямого преобразования энергии  $\beta$ -частиц.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Olsen L.C. Review of betavoltaic energy conversion // Proc. 12th Space Photovoltaic Research and Technology Conf. Cleveland, 1992. P. 256–267.
- [2] Olsen L.C., Cabaay P., Elkind B.J. // Phys. Today. 2012. V. 65. N 12. P. 35–38.
- [3] Андреев В.М., Калиновский В.С., Ларионов В.Р., Стругова Е.О., Румянцев В.Д. // ФТП. 1994. Т. 28. В. 2. С. 338–342.
- [4] Kherani N.P., Shmayada W.T. // Z. Phys. Chem. 1994. V. 183. N 5. P. 453–463.
- [5] Хвостиков В.П., Калиновский В.С., Сорокина С.В., Шварц М.З., Потапович Н.С., Хвостикова О.А., Власов А.С., Андреев В.М. // ФТП. 2018. Т. 52. В. 13. С. 1647–1650. DOI: 10.21883/FTP.2018.13.46881.8942
- [6] Rappaport P. // Phys. Rev. 1954. V. 93. P. 246–247.
- [7] Yakubova G.N. Nuclear batteries with tritium and promethium-147 radioactive sources. PhD thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010. 162 p.
- [8] Deus S. Tritium-powered betavoltaic cells based on amorphous silicon // Conf. Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conf. IEEE, 2000. P. 1246–1249. DOI: 10.1109/PVSC.2000.916115
- [9] Kostas T., Kherani N.P., Gaspari F., Zukotynski S., Shmayda W.T. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. V. 16. P. 893–896. DOI: 10.1116/1.581031
- [10] Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. // Современная электроника. 2015. № 6. С. 10–17.