

## Двойное преобразование энергии в радиоизотопном источнике питания

*В.В. Светухин<sup>1</sup>, С.Г. Новиков<sup>1</sup>, А.В. Беринцев<sup>1</sup>,  
А.А. Черторийский<sup>1</sup>, А.С. Алексеев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский технологический институт  
им. С.П.Капицы Ульяновского государственного университета*

<sup>2</sup>*Ульяновский государственный университет*

## Double Step Energy Conversion in Radioisotope Power Source

*V.V. Svetukhin<sup>1</sup>, S.G. Novikov<sup>1</sup>, A.V. Berintsev<sup>1</sup>,  
A.A. Chertoriysky<sup>1</sup>, A.S. Alekseev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Technological Research Institute of S.P.Kapitsa, Ulyanovsk*

<sup>2</sup>*Ulyanovsk State University*

Исследованы радиоизотопные источники электрического питания с длительным сроком службы, в основе действия которых лежит принцип двойного преобразования энергии бета-излучения трития последовательно в световую и электрическую энергии. Проанализированы спектральные характеристики использованных радиолюминесцентных источников света, а также спектральные и электрические характеристики полупроводниковых фотопреобразователей. Разработаны макеты базовых ячеек для источников питания, на основе которых собрана батарея. Значения токов короткого замыкания и напряжения холостого хода батареи составляют  $I_{к.з}=1,2$  мкА и  $U_{х.х} = 2,5$  В соответственно, что позволяет ее использовать в качестве источника питания применяемых в быту электронных устройств с низким потреблением энергии.

*Ключевые слова:* радиоизотопный источник электрического питания; фотоэлектрический источник питания; радиолюминесцентный источник света; фотопреобразователь.

The radioisotope power sources based on the principle of the tritium beta-radiation power conversion sequentially into light and electric energy have been investigated. The spectral characteristics of used radio luminescent light sources, the spectral and electric characteristics of semiconductor photo converters have been analyzed. The experimental nuclear battery cells have been developed, based on which the battery with the short circuit current values  $U = 2.5V$  and  $I=1.2 \mu A$  at no-load voltage, respectively, has been assembled. The battery can be used as a power source for used household electronic devices with low power consumption.

*Keywords:* tritium nuclear battery; radioluminescent light source; indirect conversion nuclear battery; photovoltaic.

**Введение.** На сегодняшний день одной из актуальных научно-технических задач является разработка источников питания для применения в электрических и электромеханических системах с низким потреблением, рассчитанных на длительный срок эксплуатации в автономном режиме. Такие системы находят применение в медицине (кардио- и нейростимуляторы, биодатчики и аналитические системы на «чипе»), системы жизнеобеспечения, инсулиновые помпы), микро- и нанoeлектронике (МЭМС и НЭМС, автономные электронные системы с совмещенным питанием, микропроцессорные системы с низким энергопотреблением, энергонезависимая память), информационных технологиях (автономные системы шифрования, радиочастотные активные и пассивные метки), космической отрасли и др. Современные электрохимические батареи, аккумуляторы и ионисторы не применимы для таких устройств, так как не обеспечивают длительного срока службы и не могут работать в экстремальных климатических условиях [1].

Практически единственно возможным типом источников питания для рассмотренных применений является радиоизотопный источник, который в течение десятилетий преобразует энергию радиоактивного распада в электрическую. Различают радиоизотопные источники прямого и двойного преобразования. Принцип действия первых основан на бета-вольтаическом эффекте – генерации электронно-дырочных пар в различных полупроводниковых структурах под действием радиационного излучения [2, 3]. Срок службы таких источников питания ограничен низкой радиационной стойкостью полупроводниковых преобразователей. Также к недостаткам таких источников можно отнести низкий КПД (1–3 %) и сложность формирования развитых поверхностей полупроводниковых структур для увеличения площади  $p-n$ -переходов (поры, колодцы, пирамиды) [4]. Источники, базирующиеся на двойном преобразовании энергии радиоактивного альфа- или бета-распада посредством радиolumинесценции в световую энергию, а затем с помощью фотоэффекта в электрическую [5–7], – перспективная альтернатива бета-вольтаическим источникам питания. В этом случае фотопреобразователи и радиационные источники пространственно разнесены и полупроводниковые структуры не подвергаются непосредственно радиационному воздействию. В связи с этим допустимо использование радиоизотопов со значительными энергиями распада, при этом срок эксплуатации источника питания увеличивается. Кроме того, за счет высокой эффективности каждого из преобразований можно получить источник питания с КПД более 5 %.

Типичная конструкция радиоизотопной фотоэлектрической батареи выглядит как многослойная структура радиоактивный источник–радиolumинофор–фотопреобразователь. При этом в качестве радиоактивных источников можно использовать, например, твердотельные на основе пленок  $^{63}\text{Ni}$  и  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ , а также газообразные источники  $^3\text{H}$ , радиolumинофоры на основе  $\text{ZnS}$ ,  $\text{CdS}$ , фотопреобразователи из  $\text{Si}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{GaP}$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{InP}$  и др. [1].

Твердотельные источники имеют ряд недостатков, в частности самопоглощение энергии распада. Для снижения самопоглощения толщина твердых источников должна быть менее 1 мкм. Также при ограниченной площади поверхности преобразователей используются малые массы изотопов (единицы микрограмм), а следовательно, и малые объемные активности. Кроме того, максимальная поверхностная активность твердотельных источников ограничена.

Предпочтительными для источников электрического питания на основе двойного преобразования являются закрытые радиolumинесцентные источники света в виде стеклянных колб, наполненных газообразным тритием, внутренняя поверхность кото-

рых покрыта радиолюминофором. Энергия излучения радиоактивного трития порядка 5 кэВ. Она полностью поглощается слоем радиолюминофора внутри колбы, следовательно, исключается радиационное воздействие на окружающую среду и фотопреобразователь и в результате продлевается срок службы источника питания. На сегодняшний день технологии производства радиолюминесцентных источников света хорошо разработаны и преобразование энергии радиационного излучения в световую осуществляется с высокой эффективностью.

Цель настоящей работы – разработка источника электрического питания на основе двойного преобразования энергии с повышенным КПД за счет использования спектрально согласованных радиолюминесцентных источников света и фотопреобразователей, а также геометрически оптимизированной конструкции.

**Экспериментальные исследования.** В процессе разработки источников электрического питания на основе двойного преобразования энергии протестировано несколько различных моделей преобразователей и радиолюминесцентных источников света. Для проведения экспериментальных исследований спектров и яркости выбраны образцы радиолюминесцентных источников света зеленого цвета свечения круглого сечения диаметром 3 мм и длиной 25 мм.

Проведенный рентгенофлуоресцентный анализ образцов показал, что радиолюминофор, нанесенный на стенки стеклянной колбы, представляет собой ZnS, легированный медью.

В качестве фотопреобразователей использовались элементы из аморфного кремния размерами 35×14 мм. Образцы из моно- и поликристаллического кремния не рассматривались ввиду неудовлетворительных результатов на предварительном этапе исследований.

На рис.1 представлены усредненный спектр излучения радиолюминесцентных источников и спектральная характеристика чувствительности фотоэлектрических преобразователей. Как видно, спектры чувствительности фотопреобразователей хорошо согласуются со спектрами испускания света радиолюминесцентных источников света. Излучение образцов радиолюминесцентных источников находится в видимом диапазоне с преобладанием длин волн порядка 550 нм.

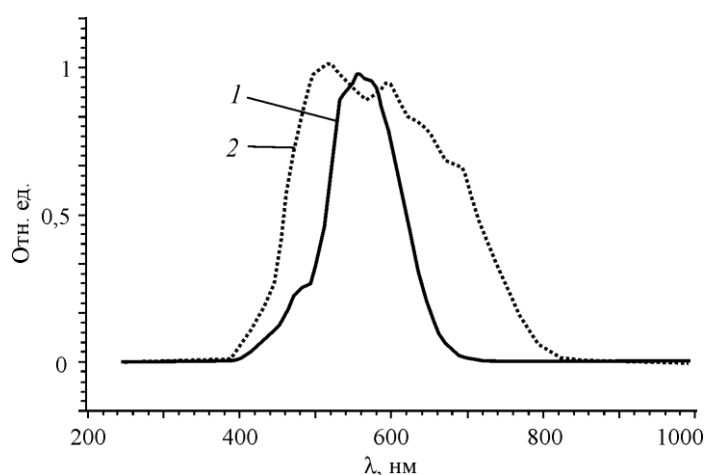


Рис.1. Относительная спектральная световая эффективность излучения радиолюминесцентных источников (кривая 1) и спектральная характеристика чувствительности фотоэлектрических преобразователей (кривая 2)

Для фотоэлектрических преобразователей проведены исследования зависимости коэффициента преобразования от нагрузочного сопротивления. Измерения коэффициента преобразования фотоэлектрических преобразователей проводились с помощью светодиода мощностью 1 Вт на длине волны 525 нм. Ширина спектра по уровню 0,5 составляла 38 нм. Освещенность регулировалась током через светодиод. Расстояние от светодиода до фотопреобразователя составляло 20 см, при этом считалось, что освещенность является равномерной в пределах площади фотопреобразователя. Далее коэффициент преобразования пересчитывался с учетом освещенности и площади фотопреобразователя. Характеристики образцов имеют максимум при сопротивлении порядка 100 кОм. При данном сопротивлении фотопреобразователями отдается максимальная мощность на нагрузку.

**Моделирование разрабатываемого источника питания в Geant4.** Моделирование разрабатываемого источника питания выполнялось с использованием численного метода Монте-Карло, реализованного в пакете моделирования взаимодействия радиационного излучения с веществом Geant4. Задача моделирования заключалась в том, чтобы с помощью численных методов определить оптимальное количество радиolumинесцентных источников в рамках заданной геометрии источника питания при известных размерах спектрально согласованных радиolumинесцентных источников и фотопреобразователей, их пространственном взаиморасположении, составе радиolumинофора, толщине стенки колбы радиolumинесцентного источника. В качестве объекта моделирования рассматривался источник питания на основе эффекта двойного преобразования энергии, состоящий из двух, трех или четырех радиolumинесцентных источников света с использованием радиolumинофора ZnS:Cu зеленого свечения, расположенных между двух фотопреобразователей из аморфного кремния. Боковые поверхности кюветы с фотопреобразователями зазеркалены. На рис.2,*а* представлено изображение модели данного образца.

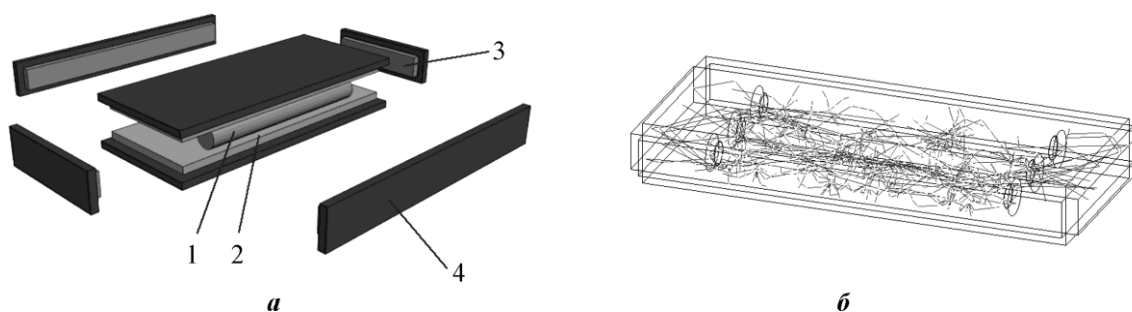


Рис.2. Модель фотоэлектрического источника питания на основе двойного преобразования энергии (*а*) и визуализация расчетных траекторий электронов и фотонов, полученных в результате моделирования (*б*): 1 – радиolumинесцентный источник; 2 – фотопреобразователь; 3 – зеркало; 4 – корпус

В результате моделирования для каждого случая рассчитано количество фотонов, попадающих на детектирующие поверхности фотопреобразователей, приходящееся на один бета-распад  $\eta$ :

$$\eta = \frac{N_p}{N_e},$$

где  $N_p$  – общее количество зарегистрированных фотонов;  $N_e$  – число генерируемых событий (бета-распадов).

Максимальное значение показателя  $\eta = 19,85$  получено для модели образца с тремя радиoluminesцентными источниками.

На рис.2,б представлена визуализация траекторий электронов, испускаемых газобразным тритием, а также фотонов, полученных в результате взаимодействия электронов со слоем люминофора.

По результатам моделирования разработан экспериментальный образец фотоэлектрического источника питания с наилучшими выходными параметрами  $I_{к.з}=0,3$  мкА и  $U_{х.х}=1$  В на основе трех радиoluminesцентных источников и двух фотопреобразователей. Корпус с минимальными габаритами, формирующий пространство для радиoluminesцентных источников между двумя фотопреобразователями, изготовлен методом 3D-печати на базе спроектированной объемной модели. Для минимизации световых потерь внутренние поверхности корпуса по периметру закрывались светоотражающим материалом. На базе данного образца источника питания собрана батарея с выходными параметрами  $U_{х.х} = 2,5$  В и  $I_{к.з} = 1,2$  мкА в едином корпусе со встроенными электронными часами с жидкокристаллическим экраном.

**Заключение.** По результатам проведенных экспериментальных исследований макета автономного фотоэлектрического источника питания на основе использования двойного преобразования энергии радиоактивного распада изотопа  $^3\text{H}$  установлено, что полученные выходные характеристики (ток короткого замыкания и напряжение холостого хода) значительно превышают значения аналогичных параметров у разработанных к настоящему времени источников на основе прямого преобразования. В разработанных источниках эффект значительного повышения токов и напряжений достигнут за счет согласования спектров излучения радиoluminesцентных источников света и спектров поглощения фотопреобразователей (см. рис.1). При этом КПД самих фотопреобразователей данного типа составляет всего 10–12 %. Кроме того, в разработанных конструкциях удалось снизить оптические потери за счет максимально близкого расположения источников света, помещенных в светоотражающую кювету, и фотопреобразователей. При исследованиях нагрузочных характеристик для разработанных источников максимальная мощность получена при сопротивлениях нагрузки примерно 100 кОм. Это позволяет провести максимально эффективное согласование разработанных источников с потребителями. При этих значениях сопротивлений определены рабочие токи и напряжения:  $I = 228$  нА,  $U = 0,6$  В. Исходя из указанных значений, можно рассчитать максимальную выходную мощность  $P_{\max}$  и определить фил-фактор  $FF$ :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{к.з} U_{х.х}} = 0,57.$$

Максимальные значения тока короткого замыкания  $I_{к.з} = 300$  нА и напряжения холостого хода  $U_{х.х} = 1$  В получены для сочетания двух фотопреобразователей с тремя радиoluminesцентными источниками света. На основе образца источника питания с приведенными параметрами собрана батарея в едином корпусе с электронными часами. Для такой батареи  $I_{к.з} = 1,2$  мкА и  $U_{х.х} = 2,5$  В, что выше значений, полученных в работе [8], а также выше обычных значений для источников электрического питания данного типа.

Показана возможность создания эффективного радиоизотопного источника питания двойного преобразования с использованием радиoluminesцентных источников света на основе изотопа  $^3\text{H}$  и кремниевых аморфных фотоэлектрических преобразователей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (договор №16-48-730330/16).*

### Литература

1. Polymers, phosphors, and voltaics for radioisotope microbatteries / **K.E. Bower, Y.A. Barbabel, Y.G. Shreter, G.W. Bohnert**. – Abingdon: CRC Press, 2002. – P. 504.
2. **Olsen L.C., Cabauy P., Elkind B.J.** Betavoltaic power sources // *Physics Today*. – 2012. – Vol. 65. – № 12. – P. 35–38.
3. Радиационно-стимулированный источник энергии на основе изотопа никель-63 / **Е.С. Пчелинцева, Ю.С. Нагорнов, Б.М. Костишко и др.** // *Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. – 2011. – Т. 1. – С. 65–69.
4. A review of nuclear batteries / **M.A. Prelas, C.L. Weaver, M.L. Watermann et al.** // *Progress in Nuclear Energy*. – 2014. – Vol. 75. – P. 117 – 148.
5. Parameter optimization and experiment verification for a beta radioluminescence nuclear battery / **Liang Hong, Xiao-Bin Tang, Zhi-Heng Xu et al.** // *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2014. – Vol. 302. – N. 1. – P. 701–707. – URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10967-014-3271-2> (дата обращения: 04.04.2016).
6. Development of a beta radioluminescence nuclear battery / **Xu Zhi-Heng, Tang Xiao-Bin, Hong Liang et al.** // *Nuclear Science and Techniques*. – 2014. – Vol. 25. – N. 4. – P. 40603. URL: [http://www.j.sinap.ac.cn/nst/EN/abstract/article\\_466.shtml](http://www.j.sinap.ac.cn/nst/EN/abstract/article_466.shtml). (дата обращения: 04.04.2016).
7. Alpha indirect conversion radioisotope power source / **M. Sychov, A. Kavetsky, G. Yakubova et al.** // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2008. – Vol. 66. – N. 2. – P. 173 – 177. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804307002771>. (дата обращения: 04.04.2016).
8. Разработка автономного фотоэлектрического источника питания с длительным сроком службы / **С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, А.А. Черторийский и др.** // *Радиоэлектронная техника: межвуз. сб. науч. тр.* / Под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – С. 43 – 51.

Статья поступила  
22 апреля 2016 г.

**Светухин Вячеслав Викторович** – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского технологического института им. С.П.Капицы Ульяновского государственного университета (НИТИ УлГУ). *Область научных интересов:* дефектообразование в полупроводниках, радиационная физика и технология. **E-mail: Slava@sv.uven.ru**

**Новиков Сергей Геннадьевич** – кандидат технических наук, начальник лаборатории твердотельной электроники НИТИ УлГУ. *Область научных интересов:* микроэлектроника, негатроника, оптоэлектроника, полупроводниковые приборы с положительной обратной связью.

**Беринцев Алексей Валентинович** – кандидат технических наук, инженер НИТИ УлГУ. *Область научных интересов:* оптоэлектроника, микроэлектроника, полупроводниковые приборы.

**Черторийский Алексей Аркадьевич** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник НИТИ УлГУ. *Область научных интересов:* оптические измерения, оптоволоконные датчики и системы на их основе.

**Алексеев Александр Сергеевич** – аспирант Ульяновского государственного университета, стажер-исследователь НИТИ УлГУ. *Область научных интересов:* полупроводниковые приборы, оптоэлектроника, микроэлектроника.