



УДК 621.383.8

Ю.Д. Акульшин, М.С. Лурье, Е.Н. Пятышев,
А.В. Глуховской, А.Н. Казакин

БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИЙ МЭМС-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

На ряде примеров показана актуальность создания малогабаритных автономных источников энергии. Сделан краткий обзор конструктивных решений по прямому преобразованию в электричество энергии радиоактивного распада. Описаны известные разработки бета-вольтаических преобразователей. Приведены результаты сравнительного анализа предельных возможностей бета-вольтаических преобразователей для различных сочетаний полупроводникового материала и долгоживущего изотопа.

ТЕХНОЛОГИИ; МЭМС; ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ.

*Yu.D. Akulshin, M.S. Lurie, E.N. Piatyshev,
A.V. Gluhovskoi, A.N. Kazakin*

BETA-VOLTAIC MEMS CONVERTER

The given paper describes the design of the beta-voltaic converter with a regular relief textured surface. The design of some known beta-voltaic converters has been reviewed. We have also shown the comparison results of the specific power converter for various combinations of a semiconductor and long-lived isotope.

TECHNOLOGY; MEMS; POWER CONVERSION.

В связи с развитием микросистемной техники и началом проведения ряда амбициозных проектов, вплоть до многофункционального мониторинга планетарного масштаба, появилась необходимость в автономных источниках электроэнергии (генераторах), которые могли бы обеспечить многолетнее энергоснабжение микросистем, находящихся в недоступных местах. Такими местами могут быть объекты космического базирования, системы распределенного мониторинга земли, встроенные в каркасы зданий или в дорожные покрытия датчики и т. п. [1–3]

Даже приблизительный анализ возможных приложений изделий микросистемной техники позволяет выделить по отраслям деятельности следующие задачи, решение которых требует применения длительного автономного энергообеспечения.

Космонавтика

- функциональные микросистемы малогабаритных космических объектов (мониторинг параметров движения, темпера-

туры, давления, интенсивности и спектров облучения и т. д.);

- дежурные системы включения основной аппаратуры при достижении заданного внешнего параметра (например, изменения гравитации, магнитного поля, освещенности и т. п.).

МЧС и системы безопасности

Микросистемы распределенного многофункционального мониторинга, в т. ч.:

- сеть информационных датчиков в сейсмоопасных районах, районах расположения АЭС, прибрежных и внутриконтинентальных гидрологических сооружений и т. п., с целью своевременного предупреждения о надвигающихся катастрофических ситуациях природного происхождения;

- то же – внутри сооружений, труднодоступных конструкций и узлов, с целью предотвращения техногенных катастроф;

- системы информационных микродатчиков охраны периметра особо важных объектов и сооружений.

Газпром

Микросистемы распределенного многофункционального мониторинга, в т. ч.:

- МЭМС-контроля давления, температуры и расхода транспортируемого продукта вдоль газо- и нефтепроводных магистралей;
- МЭМС-диагностики состояния конструкций по длине газо- и нефтепроводных систем.

Строительство, ЖКХ и прикладная геология

- Встроенные системы мониторинга механических напряжений и других прочностных характеристик внутри строительных конструкций;
- мониторинг состояния и прочностных характеристик подземных энергетических магистралей;
- мониторинг ветровой нагрузки сооружений и строительных конструкций;
- распределенный многофункциональный мониторинг слоя вечной мерзлоты.

Генераторы, обеспечивающие энергоснабжение таких автономных микросистем, должны функционировать десятилетиями и быть соизмеримыми по габаритно-весовым показателям с другими МЭМС.

Электрохимические батареи, аккумуляторы и ионисторы такую задачу решить не могут. Очевидным решением задачи может явиться только атомная микроэнергетика. Тепловые атомные преобразователи, давно используемые в качестве автономных энергогенераторов, для решения данной

задачи неприемлемы по массогабаритным показателям. Для этого пригодны только нетепловые преобразователи, которые могут напрямую преобразовывать энергию радиоактивного распада в электрический заряд. Для прямого преобразования могут использоваться два механизма распада радионуклида: альфа- и бета-распад. По соображениям безопасности рентгеновское излучение должно быть при этом минимальным. Немного выходя за пределы данной статьи, перечислим все известные к настоящему времени конструктивные подходы к решению проблемы.

Альфа-распад. Наиболее перспективное направление прямой трансформации альфа-распада рассмотрено в совместных работах Института космических исследований РАН (Москва) и Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» (Харьков). Это вторично-эмиссионный радиоизотопный источник тока (ВЭРИИТ), основанный на неравновесной эмиссии сверхтепловых электронов. Процесс реализуется при прохождении альфа-излучения трансурановых элементов через тонкие металлические пленки. Схематическое изображение преобразователя показано на рис. 1.

Физический принцип работы ВЭРИИТ состоит в том, что из-за разницы в коэффициентах вторичной электронной эмиссии пленок двух различных металлов бинарной ячейки происходит зарядка слоев относительно друг друга. КПД устройства достигает 10 %, а толщина одного пакета бинарных ячеек не превышает 1 мкм. Ценным

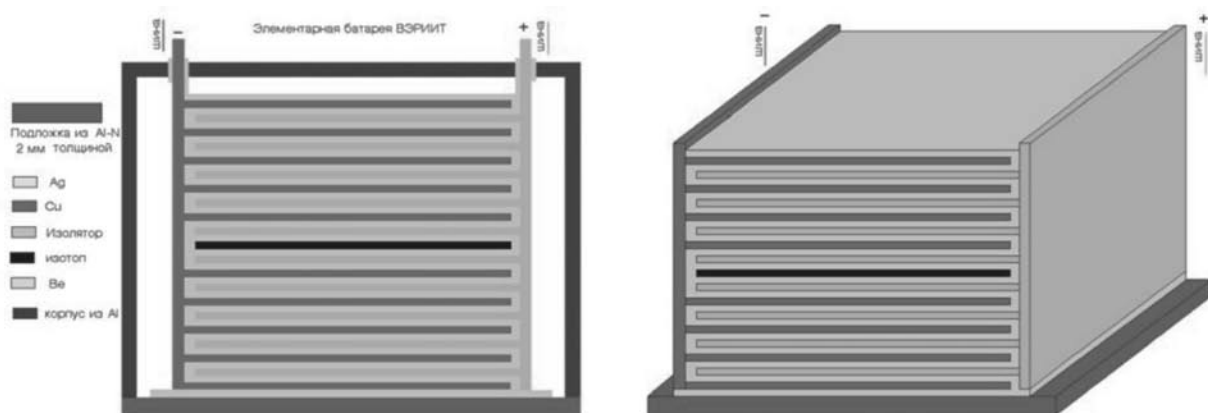


Рис. 1. Схема устройства вторично-ионного преобразователя



качеством таких преобразователей, способным обеспечить их применение не только в микросистемной технике, является принципиальная возможность конструирования устройств с мощностью от мкВт до кВт, путем последовательного и параллельного соединения исходных пакетов бинарных ячеек.

Другим способом использования альфа-излучения является способ двойного преобразования, в котором излучение изотопа трансформируется в фотонное излучение люминофора, которое преобразуется затем в электричество с помощью полупроводниковых структур. Данный способ по ряду причин применяется все реже.

Бета-распад. Недавно появилась новая разновидность конструкции изотопной батарейки – МЭМС с подвижным переносчиком заряда. В 2004 г. в Корнельском университете (США) с помощью объемной МЭМС-технологии был изготовлен элемент питания на изотопе Никеле-63, способный работать, по утверждению авторов, более 50 лет. Опытный образец имел форму куба с ребром, меньшим 1 мм. Внутри куба над слоем изотопа была установлена металлическая консоль (кантилевер). При распаде изотопа поглощаемое консолью излучение заряжает ее, и электрическое поле заставляет кантилевер сгибаться по направлению к слою изотопа. Замыкание консоли на изотоп снимает заряды, и консоль выпрямляется (рис. 2).

Пока изотоп распадается, консоль продолжает свои движения вверх-вниз, генерируя на выходе пульсирующее электрическое

напряжение. Данные по параметрам не приведены, но можно предположить, что такая конструкция невелика по мощности. Проблематичной представляется также возможность безотказной работы упругой консоли в течение времени, соизмеримом с периодом полураспада Никеля-63 (100 лет).

Бета-вольтаический эффект. Работа бета-вольтаического преобразователя основана на том, что излученные при распаде электроны или позитроны высоких энергий, попадая в область p - n перехода полупроводниковой пластины, генерируют там электронно-дырочную пару, которая затем пространственно разделяется областью пространственного заряда (ОПЗ). Вследствие этого на n и p -поверхностях полупроводниковой пластины возникает разность электрических потенциалов. Принципиально механизм преобразования напоминает тот, который реализован в полупроводниковых солнечных батареях, но с заменой фотонного облучения на облучение электронами или позитронами бета-распада радионуклидов.

Для энергообеспечения изделий МСТ одним из важнейших становится требование уменьшения габаритов энергопреобразователя, т. е. требование максимальной удельной мощности – мощности на единицу объема преобразователя.

Работы по созданию бета-вольтаических микропреобразователей проводятся рядом фирм США и Японии. Проблемой, в частности, заняты исследовательская лаборатория американских ВВС (AFRL), фирма Medtronic, компания City Labs Inc., фирма



Рис. 2. Схема МЭМС-преобразователя энергии

Samsung и др. Некоторые изделия уже находятся в рыночном обращении.

Компания City Labs, Inc. (США) наладила коммерческое производство компактных тритиевых бета-гальванических элементов питания NanoTritium P100a (рис. 3) и выполняет контракт от ВВС США на разработку более мощных батарей. Согласно пресс-релизу производителя, NanoTritium™ может служить источником непрерывного питания в течение двадцати и более лет для различных платформ в микроэлектронике. Области применения: электроснабжение датчиков давления/температуры, медицинских имплантатов, полупассивных и активных систем идентификации, часов, SRAM-памяти, питание маломощных процессоров (например, ASIC, FPGA, и т. д.). NanoTritium™ доступна в нескольких конфигурациях напряжения/тока. Одна батарейка способна выдавать от 0,8 до 2,4 В при токе от 50 до 300 нА в течение 20 лет, т. е. вырабатывает постоянную мощность порядка 0,1–0,2 мкВт.

Основой батарейки является объемный диод, формируемый в каналах пористого кремния. Средние размеры каналов и кремниевых промежутков составляют порядка 1 мкм. Эффективная площадь объемного *p-n* перехода на пористом слое во много десятков раз превышает площадь плоской поверхности. Источником энергии в NanoTritium™ является бета-распад трития, введенного в состав полимера, заполняющего каналы пористого слоя [4].

Если в качестве источника радиоактив-

ной энергии рассматривать только тритий (например, в виде тритийзамещенного полиэтилена), предложенное техническое решение следует считать оптимальным, поскольку энергия распада трития чрезвычайно мала (5,5 КэВ) и пробеги электронов излучения в кремнии составляют около 1 мкм. Таким образом, перемычка кремния в пористом слое полностью поглощает излучение канала. Однако такая ситуация нарушится для изотопов с большей энергией распада. Очевидно, что если в пористом кремнии использовать радионуклид с большей энергией распада и соответственно большей длиной пробега электронов или позитронов, часть радиоактивной энергии будет бесполезно расходоваться на нагрев изотопа в соседних каналах текстурированного слоя.

В последние годы в научной литературе появилось много сообщений о бета-вольтаическом эффекте на кремнии с изотопом ^{63}Ni , [2,3] энергетические параметры которого существенно превышают энергетику трития.

Для дальнейших поисковых исследований полезно было бы рассмотреть, хотя бы в сравнительно-оценочном плане, другие возможные сочетания различных полупроводниковых и радиоактивных материалов. Такая сравнительная оценка максимально возможной удельной мощности генераторов для различных сочетаний полупроводников и доступных к использованию долгоживущих изотопов была недавно проведена в лаборатории нано- и микросистемной тех-

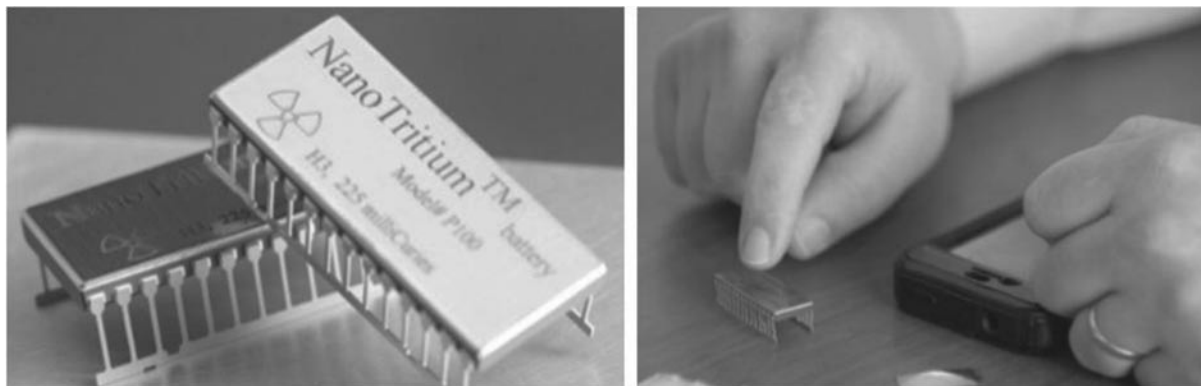


Рис. 3. Батареи NanoTritium™ компании City Labs, Inc.

Таблица 1

Параметры долгоживущих радионуклидов

| Изотоп | Период полураспада, лет | Удельный вес, г/см ³ | Удельная активность, Бк/см ³ *10 ¹⁰ (С) | Тип распада | Энергия распада E, МэВ | | | Удельная мощность w ₀ , Вт/см ³ с |
|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|---|-------------|------------------------|-------|--------|---|
| | | | | | Альфа | Бета | Гамма | |
| Кадмий-113m | 14 | 8,6 | 7637 | β | — | 0,19 | — | 2,3 |
| Цезий-137 | 30 | 1,90 | 618,6 | β | — | 0,19 | — | 0,19 |
| Никель-63 | 96 | 8,902 | 1975 | β | — | 0,17 | 0,0048 | 0,54 |
| Свинец-210 | 22 | 11,34 | 3230 | β | — | 0,038 | <0,001 | 0,2 |
| Радий-228 | 5,8 | 5,5 | 5698 | β | — | 0,017 | — | 0,36 |
| Самарий-151 | 90 | 7,52 | 549 | β | — | 0,020 | — | 0,017 |
| Стронций-90 | 29 | 2,54 | 1315 | β | — | 0,20 | — | 0,42 |
| Тритий ³ H | 12 | 9·10 ⁻⁵ | 326·10 ⁻⁵ | β | — | 0,005 | — | 26·10 ⁻⁸ (для газа) |

ники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Следует отметить, что различные источники информации содержат несколько различающиеся данные по энергетическим параметрам радионуклидов. Нами использовались параметры, приведенные в [1], поскольку эта работа выполнена сравнительно недавно, принадлежит солидному ведомству и содержит наиболее полную информацию по интересующим вопросам. Извлечение из работы [1] (изотопы с многолетним периодом полураспада) приведено в табл. 1.

Из таблицы видно, что выбор изотопов бета-распада с приемлемым временем жизни ограничивается всего несколькими наименованиями (³H, ⁶³Ni, ⁹⁰Sr, ²²⁸Ra, ¹³⁷Cs, ^{113m}Cd).

Структура рассчитываемого полупроводникового чипа представляла собой упорядоченный и масштабно увеличенный аналог пористого слоя (рис. 4).

Для рассмотрения были выбраны перечисленные выше бета-радионуклиды и наиболее широко применяемые полупроводники. Расчет производился на основе

энергетических характеристик изотопов и эффективных пробегов электронов в изотопе и полупроводнике, но без учета ряда вторичных факторов, т. е. фактически при допущении КПД = 100 %.

Полученные значения максимально возможной удельной мощности преобразователей приведены в табл. 2. Выделенные серым цветом ячейки таблицы указывают на сомнительную возможность реализации

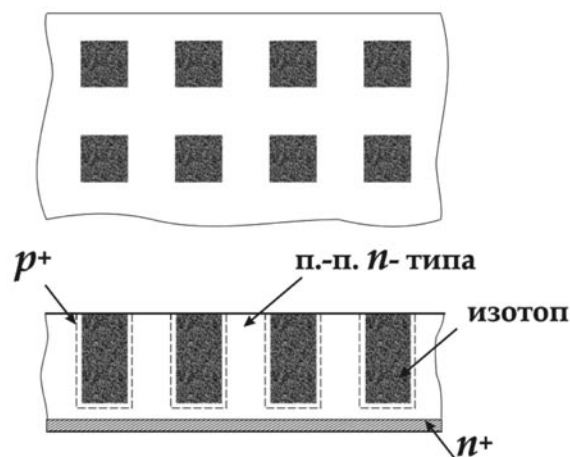


Рис. 4. Схема конструкции преобразователя

Таблица 2

Максимально возможная удельная мощность преобразований

| Изотоп | Полупроводник | | |
|--------------------------------------|---------------|--------------|-------------|
| | Si, W, мВт | GaAs, W, мВт | SiC, W, мВт |
| $^3\text{H}(\text{C}_2\text{T}_4)_n$ | 0,2 | — | — |
| ^{63}Ni | 0,8 | 1,2 | 1,2 |
| ^{90}Sr | — | 4 | 3,8 |
| ^{228}Ra | 0,47 | 0,5 | 0,5 |
| ^{137}Cs | — | 2 | 1,9 |
| $^{113\text{m}}\text{Cd}$ | 7 | 13 | 10 |

данного сочетания в бета-вольтаической конструкции из-за вероятности радиационного повреждения полупроводника. Однако нет априорных противопоказаний для использования этих изотопов в конструкции кантилеверного МЭМС-преобразователя.

Проведенный расчет позволяет сделать следующие выводы:

1. В ряду полупроводников более выгодными материалами, чем кремний, представляются арсенид галлия и карбид кремния. Нужно иметь в виду, однако, что формирование объемных диодов в этих полупроводниках окажется более трудной задачей, чем в кремнии и может потребовать разработки новых нетрадиционных методов легирования.

2. В ряду изотопов более выгодным, чем тритий, и на сегодняшний день единственно возможным для повышения удельной мощности преобразователей является Никель-63.

3. В промежуточных продуктах распада «тяжелых» изотопов присутствуют радионуклиды с недопустимо высокими энергиями различных излучений. Исключение составляет Стронций-90, энергия излучения которого ненамного превышает пороговую энергию дефектообразования в кремнии. Гамма-излучение в короткой цепочке его превращений практически отсутствует, а промежуточный продукт распада – Иттрий-

90 – не относится к числу долгоживущих изотопов. Поскольку стойкость к облучению зависит не только от энергии, но и от времени (дозы облучения), возможность применения этого изотопа требует исследования в условиях работы преобразователя.

4. Наиболее интересным из долгоживущих изотопов бета-распада представляется Кадмий-113m. В результате распада $^{113\text{m}}\text{Cd}$ превращается в стабильный индий. Средняя энергия распада $^{113\text{m}}\text{Cd}$ – 190 КэВ – лишь незначительно превышает порог дефектообразования в кремнии, а беспрецедентно высокая эффективность делает этот изотоп очень привлекательным для дальнейших исследований.

Еще раз отметим, что приведенные в табл. 2 значения удельной мощности следует рассматривать только как сравнительно-оценочные величины, которые могут оказаться полезными при проведении будущих практических разработок.

В настоящее время ведутся активные разработки автономных источников энергоснабжения на основе бета-вольтаических преобразователей. Наиболее приемлемыми изотопами являются тритий и никель-63. Использование кремниевых микротехнологий для реализации преобразователей должно обеспечить успешный выход на уровень массового производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peterson J., MacDonell M., Haroun L., Monette F. Radiological and Chemical Fact Sheets

to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas. Argonne National Laboratory Environmental

Science Division. U.S. Department of Energy, 2007.

2. **Пчелинцева Е.С.** Моделирование и исследование бета-вольтаического эффекта на кремниевых pin структурах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ульяновск: УлГУ, 2011.

3. **Нагорнов Ю.С.** Современные аспекты

применения бета-вольтаического эффекта: монография. Ульяновск, 2012.

4. NanoTritium P100a – новая тритиевая батарея со сроком службы 20 лет [электронный ресурс]/ URL: http://pitbit.ru/news/technology/nanotritium_element_pitaniya_so_srokom_sluzhby_20 лет/

REFERENCES

1. **Peterson J., MacDonell M., Haroun L., Monette F.** *Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas*, Argonne National Laboratory Environmental Science Division, U.S. Department of Energy, 2007.

2. **Pchelintseva Ye.S.** *Modelirovaniye i issledovaniye betavoltaicheskogo effekta na kremniyevykh pin strukturakh*: Dissertatsiya k.f.-m.n.,

Ulyanovsk: UIGU Publ., 2011. (rus)

3. **Nagornov Yu.S.** *Sovremennyye aspekty primeneniya betavoltaicheskogo effekta*, Ulyanovsk, 2012. (rus)

4. *NanoTritium P100a – novaya tritiyevaya batariya so srokom sluzhby 20 let*. Available: http://pitbit.ru/news/technology/nanotritium_element_pitaniya_so_srokom_sluzhby_20 лет/

АКУЛЬШИН Юрий Дмитриевич – ведущий инженер лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: acul@mems.ru

AKULSHIN, Yurii D. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: acul@mems.ru

ЛУРЬЕ Михаил Семенович – ведущий научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: milur@mail.ru

LURIE, Mikhail S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: milur@mail.ru

ПЯТЫШЕВ Евгений Нилович – заведующий лабораторией нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: pen@mems.ru

PIATYSHEV, Evgenii N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: pen@mems.ru

ГЛУХОВСКОЙ Анатолий Викторович – младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: tog1@mail.ru

GLUHOVSKOI, Anatoliy V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: togl@mail.ru

КАЗАКИН Алексей Николаевич — *научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: keha@newmail.ru

KAZAKIN, Aleksey N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: keha@newmail.ru