

*Е. С. Пчелинцева, С. Г. Новиков,
А. В. Беринцев, Б. М. Костишко, В. В. Светухин*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ¹

Аннотация. Цель работы: моделирование импульсного режима работы радиационно-стимулированного источника электрического тока на основе изотопа ^{63}Ni . Моделирование проводилось в системе LTspice IV согласно структурной схеме импульсного радиационно-стимулированного источника тока. Бетавольтаический элемент питания представлял собой батарею из 1000 кремниевых pin-структур с глубиной залегания p - n -перехода 1,2 мкм и кремниевых фотодиодов с глубиной залегания перехода 6,5 мкм, включенных последовательно и параллельно с общей площадью p - n -переходов около 1000 см². В конструкции импульсного радиационно-стимулированного источника тока в соответствии со схемой удалось достигнуть увеличения выходного напряжения до 1,3 В в постоянном режиме, выходного импульсного тока – до значения 200 мА, импульса напряжения – до значения 180 мВ, с длительностью импульса до 2 мс и частотой повторения порядка 800 Гц. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения радиационно-стимулированного элемента электрического питания, работающего в импульсном режиме, когда имеется необходимость в источнике питания, работающем более 50 лет и дающем ток генерации до 200 мА в пике разрядки. Предполагаемыми областями применения полученного материала являются микроэлектромеханические системы, нуждающиеся в элементе питания, работающие длительное время в труднодоступных местах и климатических условиях.

Ключевые слова: бетавольтаический эффект, радиационно-стимулированная генерация тока, моделирование физических процессов.

*E. S. Pchelintseva, S. G. Novikov,
A. V. Berintsev, B. M. Kostishko, V. V. Svetukhin*

MODELING OF A PULSE RADIATION-INDUCED POWER SOURCE

Abstract. Objective: The present work considers modeling of pulse radiation-induced power source based on ^{63}Ni isotope. Modeling has been performed in LTspice IV system in accordance with the structural chart of the pulseradiation-induced power source. Betavoltaic power source is a cell that combines 1000 silicon pin- structures with p - n - junction depth of 1.2 μm and silicon photodiodes with p - n - junction depth of 6.5 μm connected in series and in parallel with a total junction area of 1000 cm². From a designed pulse radiation-induced power source the authors have obtained an increase of the output voltage up to 1.3 V for the DC operation and an increase of the output pulse current up to 200 mA, voltage pulse up to 180 mV for the pulsed operation with the pulse duration under 2ms and repletion rate of about 800 Hz. The results demonstrate that the pulse radiation-induced power source can operate efficiently over 50 years generating current up to 200 mA at the maxi-

¹ Работа финансируется в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы».

num discharge. The sources can be employed for microelectromechanical systems requiring long lifetime power source able to operate in nooks and severe climates.

Key words: betavoltaic effect, radiation-induced power generation, modeling of physical processes.

Для современных микроэлектромеханических систем и полупроводниковых приборов нового поколения необходимы миниатюрные источники электрического питания, работающие продолжительное время и обладающие высокой эффективностью и малыми габаритами. Среди подобных источников электрического питания выделяются радиоизотопные источники питания. Преимущества энергетических источников на основе радиоизотопов являются большой срок работы (свыше 10 лет в зависимости от выбора изотопа), низкий вес, небольшой размер, широкий температурный диапазон и высокая надежность. Периоды полураспада и соответствующая длительность работ таких батарей питания варьируются от нескольких (^{147}Pr) до ста лет (^{63}Ni) [1–3]. На основе радиоизотопных источников питания возможно создание гибридного источника тока или напряжения с элементами накопления заряда, работающего в импульсном режиме.

Предлагаемый импульсный радиационно-стимулированный источник тока, основанный на использовании энергии радиоактивного распада различных изотопов, содержит первичный преобразователь на основе полупроводниковой структуры с p - n -переходами с нанесенным на его поверхность изотопом ^{63}Ni , испускающим бета-электроны с широким энергетическим спектром, а также устройство преобразования постоянного напряжения первичного источника в переменное, умножитель напряжения и импульсный генератор. Структурная схема источника приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема импульсного радиационно-стимулированного источника питания

Электрическая принципиальная схема импульсного радиационно-стимулированного источника питания приведена на рис. 2, где блок 1 представляет собой инвертор на коммутируемых конденсаторах, блок 2 – умножитель напряжения, блок 3 – импульсный генератор с низковольтным питанием.

Представленная схема работает следующим образом. Под воздействием бета-электронов, испускаемых источником ^{63}Ni , в области пространственного заряда (ОПЗ) генерируются электронно-дырочные пары, а за счет встроенного электрического поля в ОПЗ происходит разделение заряда. Таким образом, на входе X1 и X2 образуется контактная разность потенциалов.

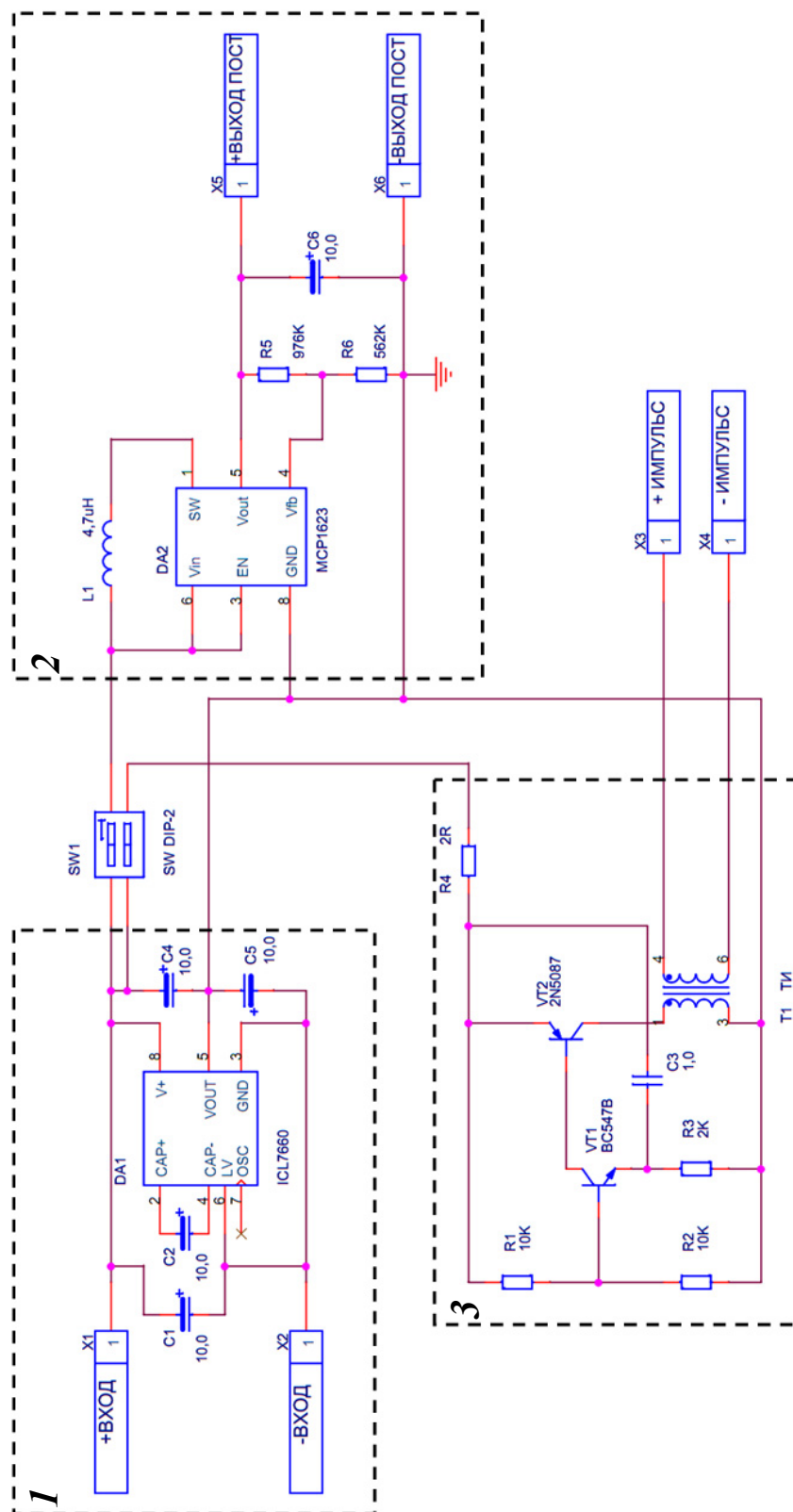


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема импульсного радиационно-стимулированного источника питания

Если задействовать блоки 1 и 2, то такой режим на выходах X5 и X6 позволяет получить преобразование импульсного низкого напряжения в высокое постоянное напряжения, а если блоки 1 и 3 то на выходе X3 и X4 радиационно-стимулированного источника импульсы тока амплитудой до сотен миллиампер. Переключение режима работы импульсного источника тока осуществляется ключом SW1.

В качестве инвертора используется широко распространенная микросхема ICL7660, которая содержит четыре силовых МОП ключа, управляемых логическими элементами и сдвигателем уровня напряжения, работа которых осуществляется на частоте, полученной в результате деления на два частоты задающего RC-генератора. Это позволяет формировать управляющие импульсы с требуемыми характеристиками «меандр» и оптимизировать по потреблению работу задающего RC-генератора, рабочая частота которого без внешних элементов составляет 10 кГц. Внутренний регулятор напряжения необходим для обеспечения работы микросхемы от источника с пониженным напряжением. Принцип работы микросхемы в режиме идеального инвертора напряжения рассмотрим по функциональной схеме, приведенной на рис. 3. При замыкании ключей S1 и S3 и размыкании ключей S2 и S4 во время первой половины цикла внешний конденсатор C1 заряжается от источника питания до напряжения V_+ , а при замыкании ключей S2 и S4 и размыкании ключей S1 и S3 во время второй половины цикла конденсатор C1 передает частично свой заряд внешнему конденсатору C2, обеспечивая на выводе VOUT напряжение $-(V_+)$. Указанные значения напряжения соответствуют установившемуся режиму.

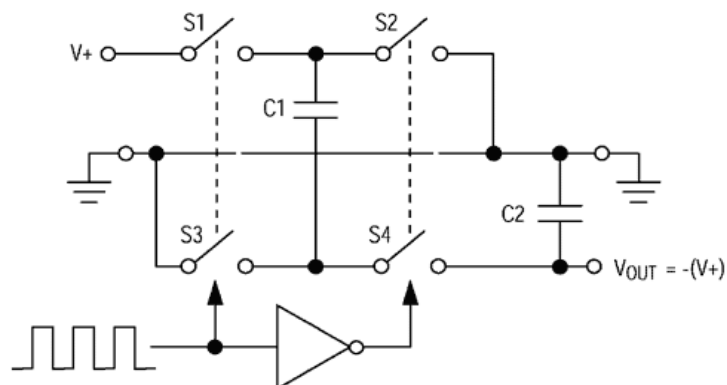


Рис. 3. Функциональная схема работы микросхемы ICL7660

В качестве умножителя используется MCP1623/24 – компактный высокоэффективный повышающий преобразователь с фиксированной частотой переключения. Высокая эффективность достигается за счет использования P - и N -канальных переключателей с низким сопротивлением. Схема компенсации и схема защиты интегрированы в микросхему для минимизации внешних компонентов. MCP1624 потребляет всего 19 мкА в рабочем режиме. Схема включения приведена на рис. 4.

Схема импульсного генератора с низковольтным питанием приведена на рис. 3 (блок 3). В качестве элемента питания используется модель источника с выходным напряжением 2 В и внутренним сопротивлением 1 кОм.

Конденсатор C_4 заряжается от элемента через инвертор, напряжение с C_4 через резистор R_4 поступает на пороговый элемент VT_2 , R_1 , R_2 и времязадающую цепочку C_3 , R_3 . Транзистор VT_1 осуществляет сброс заряда C_4 и разряд конденсатора C_3 на импульсный трансформатор.

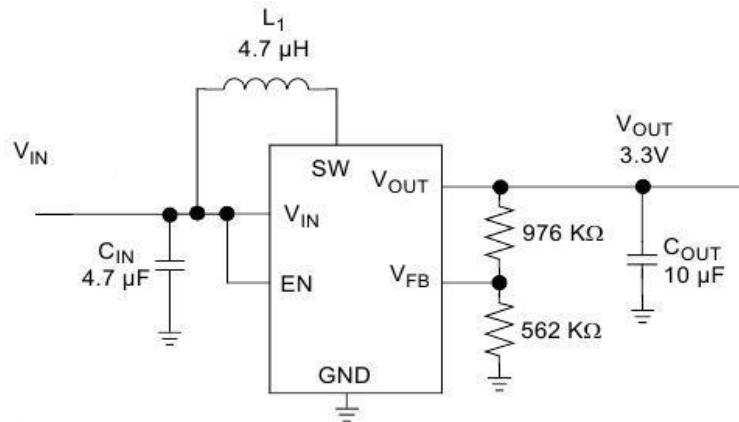


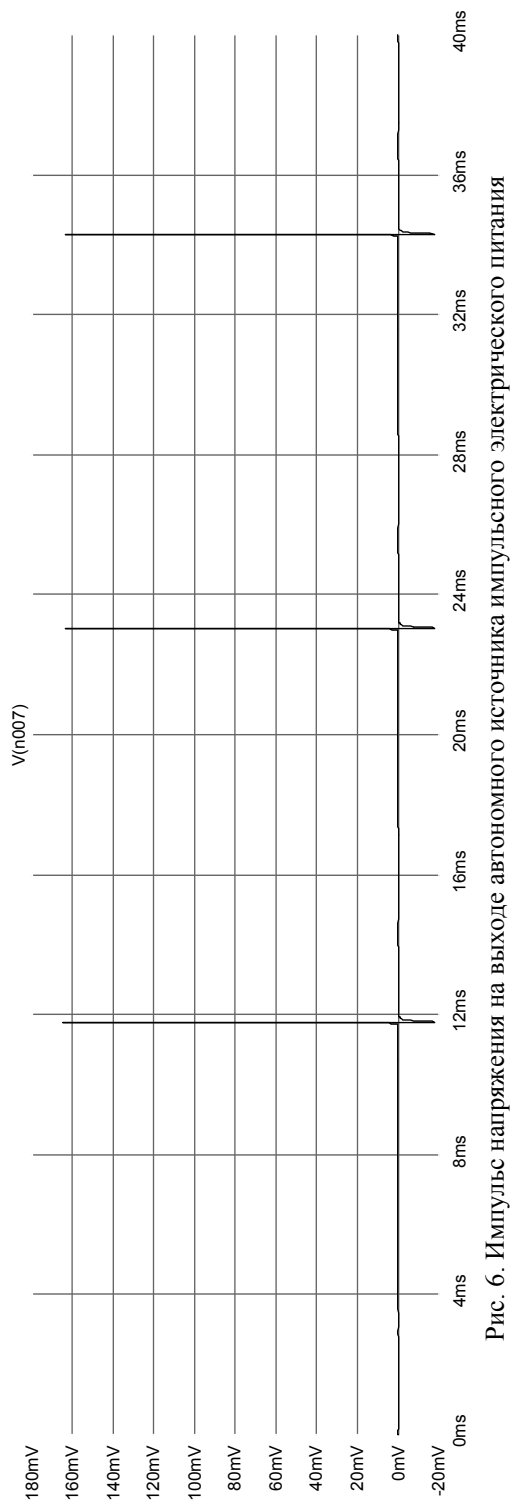
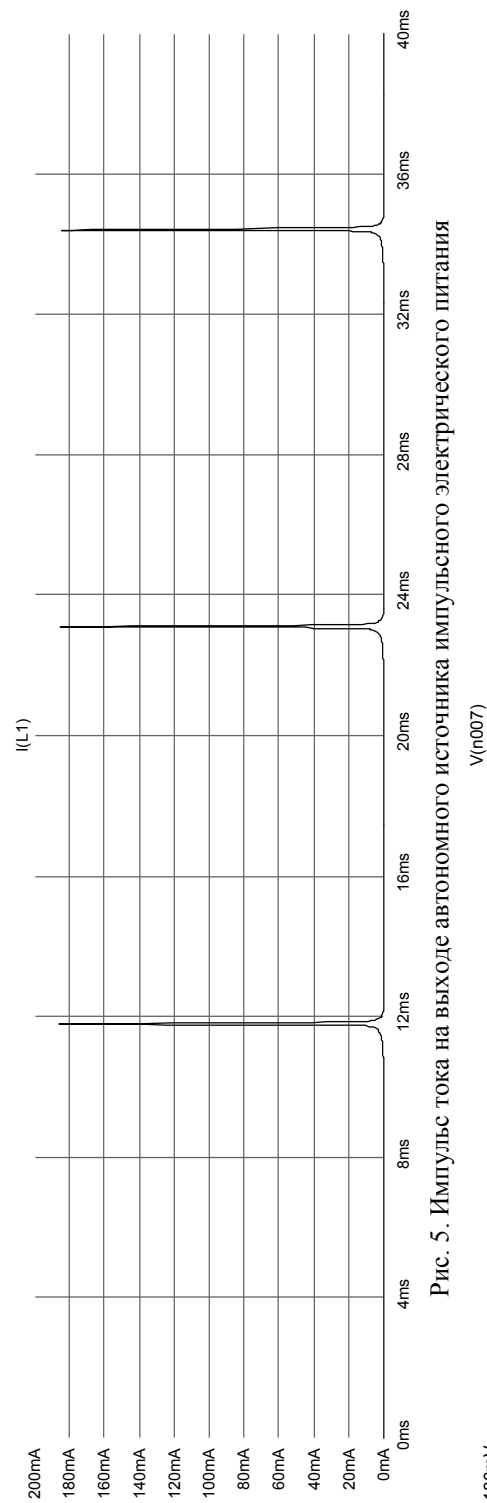
Рис. 4. Схема включения MCP1623/24

Для моделирования работы импульсного радиационно-стимулированного элемента питания использовались экспериментальные данные, полученные в ОАО ГНЦ «НИИ Атомных реакторов», по определению генерации тока на кремниевых диодах с применением изотопа ^{63}Ni различной активности. В качестве первичных радиоизотопных преобразователей были использованы кремниевые *pin*-структуры, предоставленные ОАО «Завод Искра» (тип А) с глубиной залегания *p-n*-перехода 1,2 мкм, шириной ОПЗ 8 мкм, и кремниевые *p-n*-диоды, предоставленные ОАО «Сапфир» (тип В), представляющие собой некорпусированные фотодиоды ФД-344 с охранном кольцом из *p-n*-перехода, созданные на основе пластин кремния *n*-типа КДБ-10 с глубиной залегания *p-n*-перехода 6,5 мкм и ОПЗ 3,6 мкм [4].

Кремниевый *p-n*-диод типа А был подвергнут облучению в течение года с использованием радионуклида Ni^{63} активностью 40 мКи. При этом ток генерации составлял 40–50 нА, а напряжение на внешних контактах образца 18 мВ. Для образцов типа В ток генерации составил 60 и 90 нА, 2,9 и 16,5 мВ для источников активностью 10 и 40 мКи соответственно [5].

Моделирование проводилось в системе LTspice IV согласно структурной схеме импульсного радиационно-стимулированного источника тока. Для получения уровней токов и напряжений, достаточных для работы электрической схемы генерации импульсов тока, необходима сборка батареи из нескольких сотен элементов. При моделировании импульсного радиационно-стимулированного источника тока использована батарея из 1000 элементов, включенных последовательно и параллельно с общей площадью *p-n*-переходов около 1000 см².

В конструкции импульсного радиационно-стимулированного источника тока в соответствии со схемой удалось достигнуть увеличения выходного напряжения до 1,3 В в постоянном режиме, выходного импульсного тока до значения 200 мА (рис. 5), импульса напряжения до значения 180 мВ (рис. 6), с длительностью импульса до 2 мс и частотой повторения порядка 800 Гц.



Заключение

Конструктивно предлагаемый импульсный радиационно-стимулированный источник электрического питания с применением бета-источника ^{63}Ni активностью 40 мКи может представлять собой герметичный корпус с выведенными наружу клеммами для подключения полезной нагрузки с небольшими габаритными размерами и временем работы более 50 лет. При работе схемы в постоянном режиме мощность источника электрического питания составляет около 250 мВт, а в импульсном режиме 3,6 мВт.

Список литературы

1. **Guo, H.** Nanopower betavoltaic microbatteries / H. Guo, A. Lal // The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems (Boston, 2003). – Boston, 2003. – P. 36–39.
2. **Ануфренко, В. Б.** Использование сверхмногослойных наноструктур для прямого преобразования ядерной энергии в электрическую / В. Б. Ануфренко, А. М. Михайлова, А. Н. Палагушкин // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 30–38.
3. **Blanchard, J.** Nuclear microbatteries for MEMS and nano devices / J. Blanchard et al. // Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology – APCOT. – 2006. – P. 1–4.
4. **Нагорнов, Ю. Р.** Моделирование радиационно-стимулированного источника тока на *pin*-структурах / Ю. Р. Нагорнов, Е. С. Пчелинцева, Б. М. Костишко, О. А. Корнилов, В. М. Радченко, В. Д. Рисованный // Известие высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 113–125.
5. **Пчелинцева, Е. С.** Радиационно-стимулированный источник энергии на основе изотопа никель-63 / Е. С. Пчелинцева и др. // ВАНТ. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2011. – № 1. – С. 65–69.

References

1. Guo H., Lal A. *The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems* (Boston, 2003). Boston, 2003, pp. 36–39.
2. Anufrenko V. B., Mikhaylova A. M., Palagushkin A. N. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nanosystems and Microsystems technology]. 2008, no. 8, pp. 30–38.
3. Blanchard J., et al. *Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology*. APCOT. 2006, pp. 1–4.
4. Nagornov Yu. R., Pchelintseva E. S., Kostishko B. M., Kornilov O. A., Radchenko V. M., Risovanny V. D. *Izvestie vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Physics and mathematics sciences]. 2009, no. 3 (11), pp. 113–125.
5. Pchelintseva E. S., et al. *VANT. Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyu apparaturu* [Physics of radiation exposure of radio electronic equipment]. 2011, no. 1, pp. 65–69.

Пчелинцева Екатерина Сергеевна

кандидат физико-математических наук, начальник зондовой и электронной микроскопии, Научно-исследовательский технологический институт, Ульяновский государственный университет (г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42)

E-mail: nanolabniti@gmail.com

Pchelintseva Ekaterina Sergeevna

Candidate of physical and mathematical sciences, head of the laboratory probe and electronic microscopy, Research Technological Institute, Ulyanovsk State University (Ulyanovsk, 42 L. Tolstogo str.)

Новиков Сергей Геннадьевич

кандидат технических наук, начальник лаборатории твердотельной электроники, Научно-исследовательский технологический институт, Ульяновский государственный университет (г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42)

E-mail: novikovsg@ulsu.ru

Novikov Sergey Gennad'evich

Candidate of engineering sciences, head of the laboratory of solid state electronics, Research Technological Institute, Ulyanovsk State University (Ulyanovsk, 42 L. Tolstogo str.)

Беринцев Алексей Валентинович

научный сотрудник лаборатории твердотельной электроники, Научно-исследовательский технологический институт, Ульяновский государственный университет (г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42)

E-mail: berints@mail.ru

Berintsev Aleksey Valentinovich

Researcher, laboratory of solid state electronics, Research Technological Institute, Ulyanovsk State University (Ulyanovsk, 42 L. Tolstogo str.)

Костишко Борис Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физических методов в прикладных исследованиях, ректор Ульяновского государственного университета (г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42)

E-mail: kost@sv.uven.ru

Kostishko Boris Mikhaylovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of the sub-department of physical methods in applied research, rector of Ulyanovsk State University (Ulyanovsk, 42 L. Tolstogo str.)

Светухин Вячеслав Викторович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физического материаловедения, директор Научно-исследовательского технологического института, Ульяновский государственный университет (г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42)

E-mail: slava@sv.uven.ru

Svetukhin Vyacheslav Viktorovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of sub-department of materials science, director of Research Technological Institute, Ulyanovsk State University (Ulyanovsk, 42 L. Tolstogo str.)

УДК 537.533.9

Моделирование импульсного радиационно-стимулированного источника электрического питания / Е. С. Пчелинцева, С. Г. Новиков, А. В. Беринцев, Б. М. Костишко, В. В. Светухин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 147–155.