

ИСТОЧНИКИ ТОКА НА ОСНОВЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ С β -АКТИВНЫМИ ИЗОТОПАМИ

В.А. Степанов*, **, В.А. Чернов*, Ю.Г. Паршиков****,
В.П. Лебедев*****, Е.В. Харанжевский*****, *******

* *ООО «Лаборатория материалов ИАТЭ»*

249030, Калужская обл., г. Обнинск, Пяткинский проезд, д. 12

** *Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ*

249030, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1

*** *ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»*

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1

**** *ФГБУН Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН*

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, с. 6

***** *ОАО «ЭЛЕКОНД»*

427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, д. 3

***** *Удмуртский государственный университет*

426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1



В асимметричных суперконденсаторах при нейтронном облучении происходит разделение и накопление электрического заряда. В работе представлены исследования источников тока с радиоактивными изотопами (ИТРИ) на основе суперконденсаторов емкостью 100 Ф, изготовленных с помощью активации нейтронами элементов введенных в электроды веществ (VN или SrO).

После облучения нейтронами с дозой до 400 Гр суперконденсаторы превращаются в ИТРИ и характеризуются скоростью зарядки до 7,8 мкВ/сут. Скорость зарядки ИТРИ увеличивается пропорционально активационной нейтронной дозе до 14 кГр. Это связано с образованием β -активных изотопов в результате реакций $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ и $^{88}\text{Sr}(n,\gamma)^{89}\text{Sr}$ в материалах электродов суперконденсатора.

Оценка скорости радиационно-индуцированного накопления заряда с учетом выделяющейся при β -распаде ^{14}C и ^{89}Sr энергии исключает известные механизмы разделения заряда в конденсированной среде за счет ионизации и рождения вторичных электронов, образования электронов и дырок и т.п. Разделение и накопление электрического заряда в ИТРИ связано с неравновесными термоэлектрическими явлениями в приэлектродных нанообластях. При ядерных реакциях в наноразмерных областях возникают «градиенты температуры» до 10^5 К/нм, что приводит к процессу «испарения» до 10^{13} электронов из нанокристаллитов на временах $\sim 10^{-11}$ с.

Ключевые слова: источник тока с радиоактивным изотопом, суперконденсатор, нейтронное облучение, радиационно-индуцированный электрический заряд.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве источников тока постоянной готовности с большим сроком автономной эксплуатации наиболее перспективны источники, основанные на прямом преобразовании ядерной энергии в электрическую, при котором распад радиоактивных изотопов приводит к радиационно-индуцированному разделению электрических зарядов. За последние шесть десятилетий разработано и изготовлено много типов прямых преобразователей ядерной энергии в электрическую [1]. Кроме обеспечения требований радиационной безопасности использование прямого преобразования энергии сдерживается значительной дороговизной реализуемых к настоящему времени различных устройств преобразователей. Высокая цена обусловлена дороговизной выделения нужных изотопов (β - или α -активных) и сложностью работы с радиоактивным материалом. По этой причине такие источники энергии использовались и используют там, где с затратами не считаются, на космических объектах, в военной технике.

Суперконденсаторы с внутренней наведенной радиоактивностью могут быть эффективными альтернативными источниками тока. Необходимый эффект от преобразования ядерной энергии в электрическую достигается чрезвычайно большой межфазной площадью, на которой происходит радиационно-индуцированное разделение заряда. Дорогостоящее изготовление систем с радиоактивными веществами заменяется ядерным легированием в нейтронном поле изготовленного в обычных заводских условиях полуфабриката, когда в результате взаимодействия с нейтронами введенные в материал электрода элементы превращаются в радиоактивные изотопы, и суперконденсатор превращается в источник тока с радиоактивным изотопом (ИТРИ).

Физическое моделирование процессов разделения электрического заряда в ИТРИ ранее было проведено с помощью измерений электрофизических характеристик суперконденсаторов, в которых роль радиоактивного изотопа играет проникающее непрерывное нейтронное излучение [2]. В данной работе приводятся результаты исследований облученных асимметричных по площади электродов суперконденсаторов с твердым неорганическим электролитом Ag_4RbJ_5 , а в работах [3 – 5] с органическим электролитом (раствор TEATFB в пропиленкарбонате). Разделение и накопление электрического заряда на электродах наблюдали непосредственно в процессе нейтронного облучения. Было показано, что накопление заряда зависит от асимметрии электродов, не зависит от плотности потока нейтронов и определяется поглощенной дозой излучения. Характеристики ИТРИ можно оценивать с помощью экспериментально полученной в [2,6] величины удельной на единицу мощности поглощенной дозы поверхностной плотности электрического заряда, создаваемой на проводнике структуры металл-диэлектрик-метал (МДМ), $\rho \sim 10^{-8}$ Кл/(Гр·м²). Эта величина постоянна вне зависимости от типа МДМ-структуры и вида облучения (электронного, нейтронного, ионного).

Как оказалось, электрическое напряжение между электродами и емкость суперконденсаторов увеличивались и после прекращения облучения. Это связано с наведенной радиоактивностью, возникающей вследствие активации нейтронами неорганического и органического электролитов, а также углеродного материала электродов. В твердых электролитах в результате реакции $^{85}\text{Rb}(n,\gamma)^{86}\text{Rb}$ возникает активный изотоп с периодом полураспада $T_{1/2} = 18,642$ сут ($\beta - 1,8$ и $0,7$ МэВ, $\gamma - 1,08$ МэВ), а в результате реакции $^{85}\text{Rb}(n,p)^{85}\text{Kr}$ получается изотоп с $T_{1/2} = 10,776(3)$ лет ($\beta - 0,72$ МэВ и $\gamma - 0,54$ МэВ) [7]. β -активный ($0,155$ МэВ) изотоп ^{14}C с $T_{1/2} = 5700$ лет возникает в органических электролитах и материале электродов в результате (n,γ) -реакции из ^{13}C , присутствующего в количестве $1,07\%$ в природном углероде, а также из растворенного азота в результате реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$.

В работе приводятся результаты исследований макетов ИТРИ – суперконденсаторов с β -активностью одного из электродов, которая возникла за счет нейтронной активации предварительно введенных веществ.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Суперконденсаторы (СК) и макеты ИТРИ с емкостями 100 Ф и внутренним сопротивлением ~ 1 кОм были изготовлены в ОАО «ЭЛЕКОНД». Площадь электродов составляла ~ 40 см², а эффективная площадь ~ 2000 м². Электроды состояли из активированного угля со связующими – фторопластом, бутадиенстирольным латексом, карбоксиметилцеллюлозой. Органический электролит представлял собой раствор ТЕАТФВ в пропиленкарбонате с различной молярностью – от 0,01 до 1 моль. Один из электродов ИТРИ содержал наночастицы либо BN, либо SrO в количестве 1 мг/см² в отличие от СК, в котором оба электрода были одинаковы.

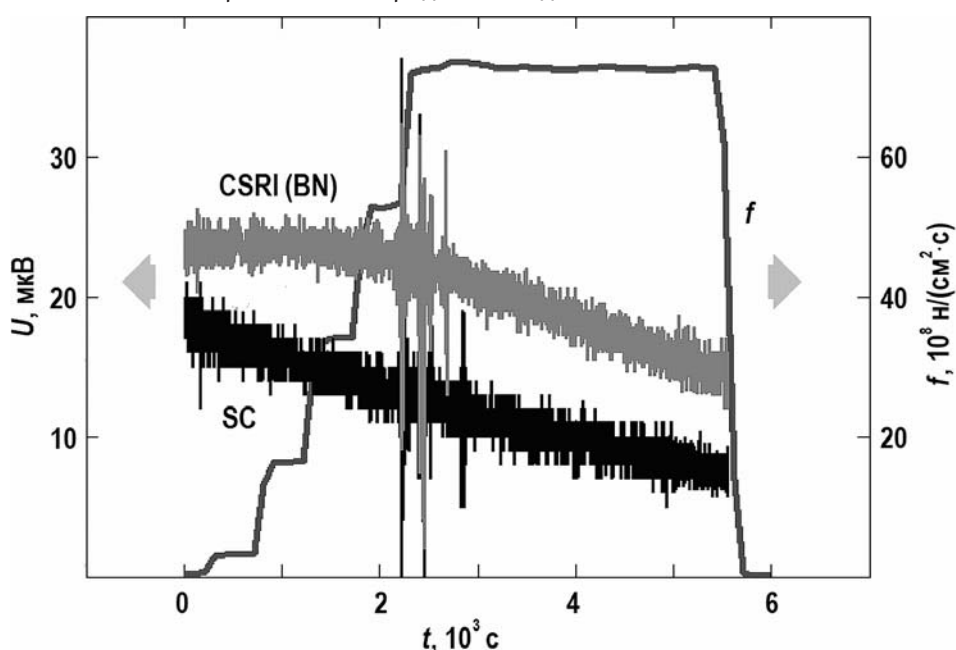


Рис. 1. Интенсивность нейтронов f и разность потенциалов U суперконденсатора (СК) и макета ИТРИ (CSRI) в процессе облучения

Образцы СК и макетов ИТРИ с BN и SrO облучались нейтронами с мощностью дозы до 0,1 Гр/с в герметичной емкости с предварительно отожженным силикагелем. На рисунке 1 показаны результаты измерений непосредственно в процессе облучения нейтронами в течение ~ 5500 с. После облучения нейтронами в результате реакций $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ и $^{88}\text{Sr}(n,\gamma)^{89}\text{Sr}$ в материалах электродов появлялись β -активные изотопы углерода или стронция. Результаты измерений разности потенциалов на облученных образцах СК и ИТРИ с BN и SrO в течение 15 сут представлены на рис. 2.

В процессе облучения в течение $5,5 \cdot 10^3$ с происходит снижение остаточного потенциала на образцах (~ 20 мкВ) до 40% от начального значения. Снижение остаточного потенциала, по-видимому, связано с частичной ионизацией в приэлектродном двойном электрическом слое в электролите, его замыканием и, как следствие, разрядом СК и ИТРИ. Из рисунка 2 видно, что после облучения нейтронами дозой около $2,9 \cdot 10^{13}$ н/см² за время $1,3 \cdot 10^6$ с в ИТРИ разность потенциалов возросла до 70 – 130 мкВ. В течение того же времени разность потенциалов на СК не изменяется с точностью 5 мкВ.

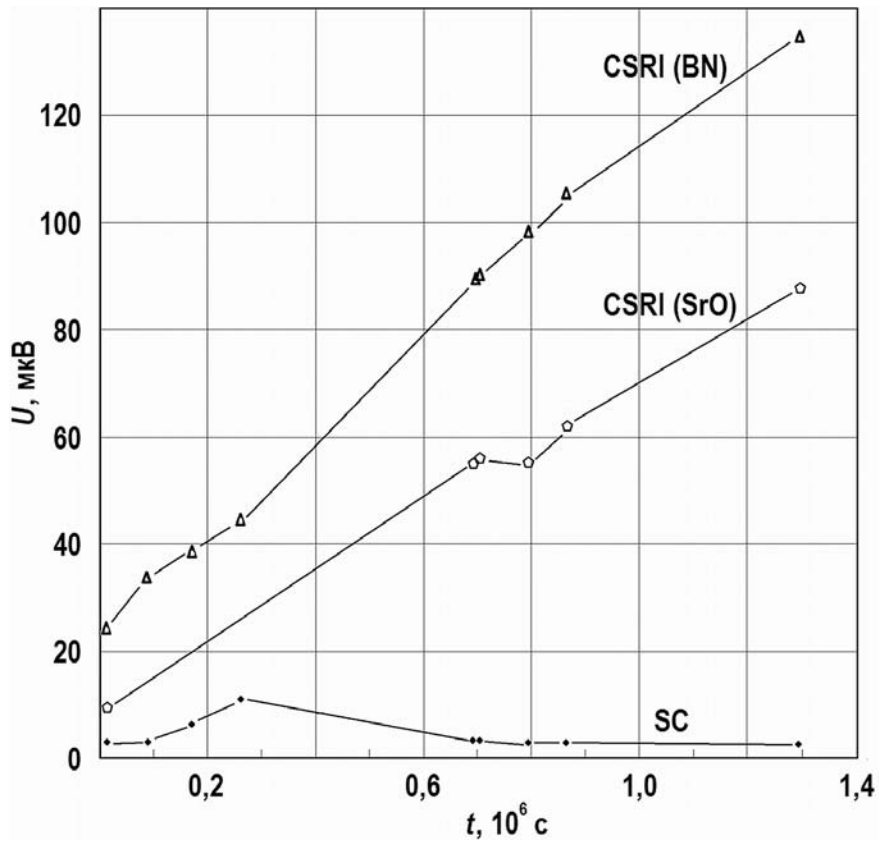


Рис. 2. Зависимость разности потенциалов от времени облученных нейтронами с дозой $2,9 \cdot 10^{13}$ н/см² образцов источников тока CSRI и суперконденсатора SC

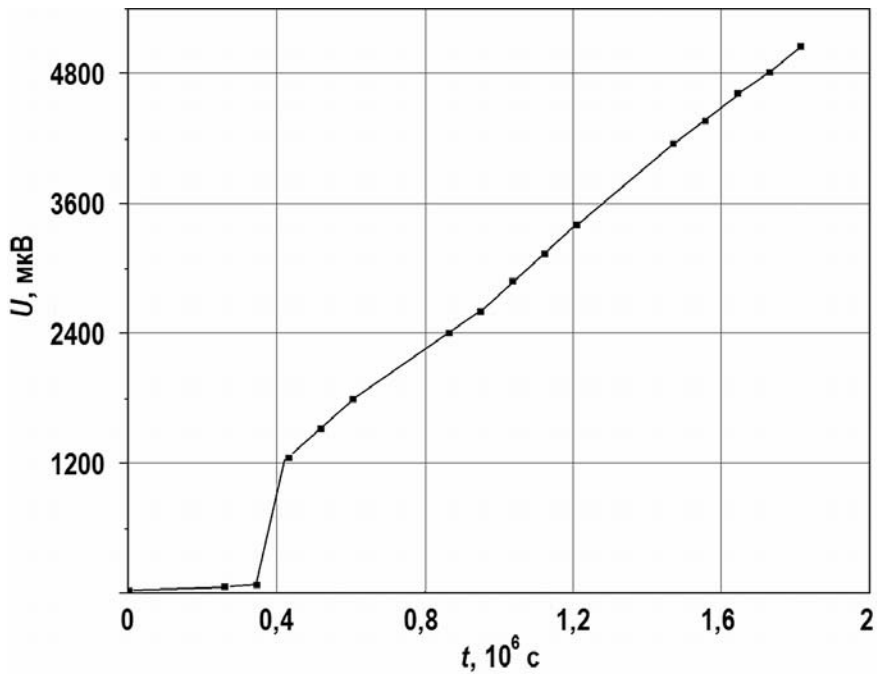


Рис. 3. Изменение разности потенциалов облученного нейтронами с дозой $1,0 \cdot 10^{15}$ н/см² образца CSRI (BN)

Для исследования влияния дозы облучения и содержания β -активных изотопов на скорость изменения разности потенциалов на электродах образец ИТРИ (BN) дополнительно облучили до дозы $1,0 \cdot 10^{15}$ н/см². Перед этим электроды макета были замкнуты на 10^4 с. После облучения через 17 суток выдержки для спада наведенной короткоживущей гамма-активности от элементов конструкции электроды ИТРИ (BN) также замкнули на четверо суток ($3,5 \cdot 10^5$ с). Результаты последующих в течение 21 сут ($1,8 \cdot 10^6$ с) измерений разности потенциалов показаны на рис. 3. К началу измерений разность потенциалов составила 20 мкВ, а через $3 \cdot 10^5$ с медленный рост напряжения, как видно на рисунке, сменился быстрым.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Важным экспериментальным подтверждением реализации ИТРИ на основе суперконденсатора является результат изменения скорости зарядки с увеличением активационной нейтронной дозы. Сравнение графиков на рис. 2 и 3 показывает, что скорость зарядки образца ИТРИ (BN) увеличилась в 31 раз – от 7,8 до 240 мкВ/сут при увеличении дозы облучения нейтронами в 34,5 раза. Это свидетельствует о пропорциональности скорости разделения заряда количеству β -активных изотопов ^{14}C в электроде суперконденсатора.

Некоторые выводы относительно микроскопического механизма разделения зарядов в макетах ИТРИ можно сделать, анализируя кинетику изменения разности потенциалов на электродах образцов. В течение $1 \cdot 10^6$ с разность потенциалов увеличивается на ~ 100 мкВ (см. рис. 2), что соответствует скорости накопления заряда $\sim 10^{-8}$ Кл/с. С другой стороны, можно оценить число распадов в единицу времени, получаемых активацией нейтронами изотопов. С учетом известных данных о сечении реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ [7] и энергии нейтронов в диапазоне энергий от тепловых до 10^4 эВ получим, что при дозе $2,9 \cdot 10^{13}$ н/см² доля активных ядер ^{14}C составляет $\sim 10^{-11}$. Содержание BN составляет 40 мг, что соответствует $5 \cdot 10^{20}$ атомам азота на всем электроде и образовавшимся $5 \cdot 10^9$ изотопам углерода. Ядра ^{14}C испытывают β -распад с периодом 5700 лет ($1,8 \cdot 10^{11}$ с), что означает примерно один распад за 100 с на всем электроде ИТРИ (BN). Если полагать, что все ядерные реакции приводят к разделению заряда между электродом и электролитом, то один распад приводит к перемещению через приграничный двойной электрический слой $\sim 10^{13}$ электронов.

Аналогичный результат получается для ИТРИ (SrO). Эффективное среднее сечение $^{88}\text{Sr}(n,\gamma)^{89}\text{Sr}$ [7] для спектра нейтронов составляет три барна, так что доля активированных изотопов также $\sim 10^{-11}$. С учетом общего числа атомов Sr $5 \cdot 10^{19}$ и периода полураспада ^{89}Sr 54 дня ($4,7 \cdot 10^6$ с) получим оценку в несколько десятков делений за секунду. Это соответствует перемещению до $10^9 - 10^{10}$ электронов через границу *углеродный слой - электролит* в результате одного ядерного превращения.

Такая оценка с учетом выделяющейся при β -распаде энергии 0,155 МэВ (^{14}C) и 1,5 МэВ (^{89}Sr) исключает механизмы разделения заряда в результате ионизации – рождения вторичных электронов, образования электронов и дырок и т.п. Действительно, количество вторичных электронов при энергии ионизации более 1 эВ не может превышать числа 10^6 . Кроме того оценки для ИТРИ с электродами с BN и SrO отличаются на три – четыре порядка, в то время как из эксперимента следует примерно одинаковый результат. Вероятнее всего, механизмы разделения и накопления электрического заряда в ИТРИ связаны с микроскопическими неравновесными явлениями термоэлектронного переноса через двойной электрический слой толщиной в несколько межатомных расстояний на границе с электролитом.

Выделяющаяся при β -распаде энергия приводит к увеличению температуры электронов в нанобластях на поверхности проводящего углеграфитового электрода до 1 – 2 эВ. На временах до 10^{-13} с до таких же величин возрастает решеточная температура, и возникает так называемый «термопик», который может существовать на временах до 10^{-6} – 10^{-7} с в наноразмерных кристаллитах. Оценки в соответствии с [8] с использованием газодинамических соотношений переноса в условиях, возникающих на нанометровом масштабе «градиентов температуры» до 10^{14} К/м, приводят к значениям скорости «испарения» электронов из нанокристаллов на уровне до 10^{13} на временах $\sim 10^{-11}$ с.

Процесс является стохастическим и сильно неоднородным вдоль поверхности раздела, движущей силой которого являются локальные всплески «температуры» до 1 – 2 эВ. В течение таких «термопиков» через двойной электрический слой перемещается до 10^{13} электронов. Неоднородность распределения заряда вдоль поверхности (неоднородность образующегося двойного электрического слоя) приводит к длительным процессам перетекания, выравнивания заряда в приповерхностном слое электролита, что, вероятно, обуславливает начальное замедление процесса заряда ИТРИ в течение $3 \cdot 10^5$ с, которое отчётливо видно на рис. 3. Длительная релаксация в процессах перезарядки суперконденсаторов – хорошо известный факт [9, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовлены макеты источников тока с радиоактивными изотопами (ИТРИ) на основе суперконденсаторов с помощью активации нейтронами элементов введенных в электроды веществ (BN, SrO). После облучения нейтронами с дозой $2,9 \cdot 10^{13}$ н/см² за время $1,3 \cdot 10^6$ с разность потенциалов возросла до 70 – 130 мкВ при отсутствии изменений на контрольном образце в пределах 5 мкВ.

Показано, что скорость зарядки ИТРИ увеличивается пропорционально активационной нейтронной дозе до $1,0 \cdot 10^{15}$ н/см². Скорость накопления заряда ИТРИ пропорциональна количеству β -активных изотопов ¹⁴C, образующихся в результате (n,p)-реакции на азоте нанокристаллического BN, введенного в один из электродов.

Оценка скорости радиационно-индуцированного накопления заряда с учетом выделяющейся при β -распаде ¹⁴C и ⁸⁹Sr энергии исключает известные механизмы разделения заряда в конденсированной среде в результате ионизации и рождения вторичных электронов, образования электронов и дырок и т.п. Вероятнее всего, разделение и накопление электрического заряда в ИТРИ связано с неравновесными термоэлектрическими явлениями в приэлектродных нанобластях.

Литература

1. Степанов В.А., Чернов В.А. Динамическая неустойчивость в суперконденсаторах после нейтронного облучения. // Материалы Всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий». – М.: МЦАИ РАН, 2019. С. 115-119. – ISBN 978-5-4465-2435-8. DOI: <https://doi.org/10.26103/MZ.2019.94.80.015>.
2. Чернов В.А., Степанов В.А., Сигейкин Г.И., Прудников Н.В., Еремин В.П. Миниатюрные наноструктурированные источники тока на основе прямого преобразования ядерной энергии. // Российский химический журнал. – 2016. – Т. LX. – № 3. – С. 20-25.
3. Степанов В.А., Чернов В.А., Паршиков Ю.Г., Лебедев В.П., Харанжевский Е.В. Радиационно-индуцированное разделение и накопление электрического заряда в суперконденсаторах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 1. – С. 146-153. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.14>
4. Stepanov V.A., Chernov V.A., Parshikov Yu.G., Lebedev V.P., Kharanzhevskiy Ye. V. Radiation-induced separation and accumulation of electric charge in supercapacitors. // Nuclear Energy

and Technology. – 2018. – Vol. 4(3). – PP. 163-166. DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.4.30780>.

5. Степанов В.А., Лебедев В.П., Паршиков Ю.Г., Харанжевский Е.В., Чернов В.А. Электродинамические эффекты в асимметричных суперконденсаторах после нейтронного облучения. / Материалы Всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки)». – М.: МЦАИ РАН, 2018. – С. 100-105. – ISBN 978-5-4465-2049-7.

6. В.А. Степанов, В.П. Лебедев, Ю.Г. Паршиков, Е.В. Харанжевский, В.А. Чернов. Макеты источников тока на основе асимметричных суперконденсаторов с β -активными электродами. / Материалы Всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий». – М.: МЦАИ РАН, 2019. – С. 110-114. – ISBN 978-5-4465-2435-8. DOI: <https://doi.org/10.26103/MZ.2019.36.71.014>.

7. IAEA. Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) Электронный ресурс: <https://www-nds.iaea.org/exfor/> (дата доступа 10.12.2019).

8. Stepanov V.A. Radiation-Stimulated Diffusion in Solids. // Technical Physics. – 1998. – Vol. 43. – Iss. 8. – PP. 938-942. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1259104>.

9. Учайкин В.В., Амброзевич А.С., Сибатов Р.Т. Амброзевич С.А., Морозова Е.В. Эффекты памяти и нелинейного транспорта в процессах зарядки-разрядки суперконденсатора. // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – Вып. 2. – С. 95-104. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784216020249>.

10. Bertrand N., Sabatier J., Briat O., Vinassa J.M. Fractional Non-Linear Modelling of Ultracapacitors. // J. Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. – 2010. – Vol. 15. – No 5. – PP. 1327-1337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.05.066>.

Поступила в редакцию 16.12.2019 г.

Авторы

Степанов Владимир Александрович, директор, заведующий кафедрой, д-р физ.-мат. наук
E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru

Чернов Владимир Алексеевич, зам. начальника лаборатории, доцент, канд. физ.-мат. наук
E-mail: vac.lnfi@ipre.ru

Паршиков Юрий Григорьевич, директор, д-р техн. наук
E-mail: mzairan@mzairan.ru

Лебедев Виктор Петрович, советник генерального директора, канд. техн. наук
E-mail: lebedev18@live.ru

Харанжевский Евгений Викторович, главный конструктор, доцент, д-р техн. наук
E-mail: eh@udsu.ru

CURRENT SOURCES BASED ON SUPERCAPACITORS WITH β -RADIOISOTOPES

Stepanov V.A.*,**, Chernov V.A.***, Parshikov Yu.G.****, Lebedev V.P.*****, Kharanzhevskiy E.V.*****

* LLC «Materials' Laboratory of Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering»
12 Pyatkinsky proezd, Obninsk, Kaluga reg., 249030 Russia

** Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040, Russia

*** JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»
1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

**** FGBUN Interdepartmental Center of Analytical Researches in the Field of Physics, Chemistry and Biology at the RAS Presidium
65, bld. 6 Profsoyuznaya str., Moscow, 117997 Russia

***** OJSC «ELECOND»
3 Kalinin str., Sarapul, Udmurt Republic, 427968 Russia

***** Udmurt State University
1 Universitetskaya str. 1, Izhevsk, 426034 Russia

ABSTRACT

In asymmetric supercapacitors, electric charges are separated and accumulated during neutron irradiation. The paper deals with current sources with radioactive isotopes (CSRI) based on 100 F supercapacitors made by means of neutron activation of elements introduced into the electrodes of substances (BN or SrO). After neutron irradiation with a dose of up to 400 Gy, the supercapacitors turn into CSRI with a charging rate of up to 7.8 μ V/day. The CSRI charging rate increases in proportion to the activation neutron dose up to 14 kGy. This is due to the production of β -active isotopes as a result of the reactions $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ and $^{88}\text{Sr}(n, \gamma)^{89}\text{Sr}$ in the supercapacitor electrodes.

An estimate of the radiation-induced charge accumulation rate, taking into account the energy released during β -decay of ^{14}C and ^{89}Sr , excludes the known charge separation mechanisms in a condensed medium due to the ionization and production of secondary electrons, electron-hole pair generation, etc. The electric charge separation and accumulation in CSRI occurs as a result of nonequilibrium thermoelectric phenomena in the near-electrode nano-regions. Nuclear reactions in nanoscale regions produce «temperature gradients» up to 10^5 K/nm. This leads to the «evaporation» of up to 10^{13} electrons from nanocrystallites at times of $\sim 10^{-11}$ s.

Key words: current sources with radioactive isotopes (CSRI), supercapacitor, neutron irradiation, radiation-induced electric charge.

REFERENCES

1. Stepanov V.A., Chernov V.A., Dynamic instability in supercapacitors after neutron irradiation. *Proc. of the All-Russian Sci. Conf. «Technologies and Materials for Extreme Conditions (Forecasting Research and Innovative Development)»*. Moscow. MTsAIRAS Publ., 2019, pp. 115-119. ISBN 978-5-4465-2435-8/C. DOI: 10.26103/MZ.2019.94.80.015 (in Russian).
2. Chernov V.A., Stepanov V.A., Sigeikin G.I., Prudnikov N.V., Eremin V.P. Miniature Nano-Structured Current Sources Based on Direct Conversion of Nuclear Energy. *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal*. 2016, v. LX, no. 3, pp. 20-25 (in Russian).

3. Stepanov V.A., Chernov V.A., Parshikov Y.G., Lebedev V.P., Kharanzhevskiy Y.V. Radiation-Induced Separation and Accumulation of Electric Charge in Supercapacitors. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 1, pp. 146-153. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.14> (in Russian).
4. Stepanov Vladimir A., Chernov Vladimir A., Parshikov Yury G., Lebedev Victor P., Kharanzhevskiy Yevgeny V. Radiation-Induced Separation and Accumulation of Electric Charge in Supercapacitors. *Nuclear Energy and Technology*. 2018, v. 4(3), pp. 163-166. DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.4.30780>.
5. Stepanov V.A., Lebedev V.P., Parshikov Y.G., Kharanzhevskiy Y.V., Chernov V.A. Electrodynamic Effects in Asymmetric Supercapacitors after Neutron Irradiation. *Proc. of the All-Russian Sci. Conf. «Technologies and Materials for Extreme Conditions (Forecasting Research and Innovative Development)»*. Moscow. MTsAI RAS Publ., 2018, pp. 100-105, ISBN 978-5-4465-2049-7 (in Russian).
6. Stepanov V.A., Lebedev V.P., Parshikov Y.G., Kharanzhevskiy Y.V., Chernov V.A. Models of current sources based on asymmetric supercapacitors with β -active electrodes. *Proc. of the All-Russian Sci. Conf. «Technologies and Materials for Extreme Conditions (Forecasting Research and Innovative Development)»*. Moscow. MTsAI RAS Publ., 2019, pp. 110-114. ISBN 978-5-4465-2435-8/C. DOI: <https://doi.org/10.26103/MZ.2019.36.71.014> (in Russian).
7. IAEA. *Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)*. Available at: <https://www.nds.iaea.org/exfor/> (accessed Dec 10, 2019).
8. Stepanov V.A. Radiation-Stimulated Diffusion in Solids. *Technical Physics*. 1998, v. 43, iss. 8, pp. 938-942. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1259104>.
9. Uchaikin V.V., Ambrozevich A.S., Sibatov R.T., Ambrozevich S.A., Morozova E.V. Memory and Nonlinear Transport Effects in Charging-Discharging of Supercapacitor. *Zhurnal Technicheskoy Fiziki*. 2016, v. 1, no. 2, pp. 250-259. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784216020249> (in Russian).
10. Bertrand N., Sabatier J., Briat O., Vinassa J.M. Fractional Non-Linear Modelling of Ultracapacitors. *J. Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2010, v. 15, no. 5, pp. 1327-1337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.05.066>.

Authors

Stepanov Vladimir Aleksandrovich, Director, Head of Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru

Chernov Vladimir Alekseevich, Deputy Head of the Laboratory, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: vac.lnfi@ippe.ru

Parshikov Yury Grigorievich, Director, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: mzairan@mzairan.ru

Lebedev Viktor Petrovich, Advisor to Director General, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: lebedev18@live.ru

Kharanzhevsky Evgeny Viktorovich, Chief Designer, Assistant Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: eh@udsu.ru