

Секция 4

***РАДИАЦИОННЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ И ЯДЕРНО-
ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ***

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАЛОРИМЕТРИИ

Д. А. Аверьянов, Д. С. Блау

НИИ «Курчатовский Институт», +79165645470
daver99@yandex.ru

Гомогенные калориметры на основе сцинтилляционных монокристаллов широко используются в физике высоких энергий и смежных областях благодаря их хорошему энергетическому, пространственному и временному разрешениям. Сегодня активно обсуждается использование новых сцинтилляционных материалов в таких калориметрах, например, новый многообещающий материал $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ (GAGG) [1]. В данной работе предлагается концепция составного калориметра с последовательно расположенными кристаллами GAGG и PWO для прецизионного измерения фотонов низких (до нескольких МэВ) и высоких энергий, соответственно. Показано возможное применение подобного калориметра на основе кристаллов GAGG для обнаружения скрытых веществ с помощью метода меченых нейтронов [2]. Данный калориметр позволяет с хорошей точностью идентифицировать такие элементы, как O, C, N и другие.

Список литературы

1. T. Furuno, A. Koshikawa, T. Kawabata et al. Journal of Instrumentation 2021, 16, P10012.
2. L. I. Ussery et al., Report LA12847MS (Los Alamos, 1994).

APPLICATION OF NEW INORGANIC SCINTILLATORS FOR ELECTROMAGNETIC CALORIMETRY

D. A. Averyanov, D. S. Blau

National Research Centre "Kurchatov Institute", +79165645470
daver99@yandex.ru

Homogeneous calorimeters based on scintillation monocrystals are widely used in high energy physics and related fields due to their good energy, spatial and timing resolution. Today, the use of new scintillation materials in such calorimeters is being actively discussed, for example, the promising new material $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ (GAGG) [1]. In this paper, we propose the concept of a composite calorimeter with successively arranged GAGG and PWO crystals for precision measurement of photons of low (up to several MeV) and high energies, respectively. A possible application of such a calorimeter based on GAGG crystals for the detection of hidden substances using the tagged neutron method [2] is shown. This calorimeter allows to identify elements such as O, C, N and others with good accuracy.

References

1. T. Furuno, A. Koshikawa, T. Kawabata et al. Journal of Instrumentation 2021, 16, P10012.
2. L. I. Ussery et al., Report LA12847MS (Los Alamos, 1994).

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ

А. В. Андреев^{1,2*} и коллаборация “TANGRA”

¹141980 Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6, тел. +7 (496) 216-50-59, факс. +7 (496) 216-51-46, e-mail: post@jinr.ru

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

*andreev.av20@physics.msu.ru

Почва играет особую роль в производстве продуктов питания, а также принимает участие в регулировании химического состава атмосферы, поэтому точное определение концентрации различных химических элементов в почве сегодня является важной задачей для различных областей науки.

Современная наука обладает большим арсеналом методов изучения таких сложных систем как почва. В частности, наиболее распространенными способами определения концентрации углерода в почве являются химические методы, которые требуют предварительной подготовки образца.

На сегодняшний день представляется перспективным определение концентрации углерода в почве с помощью нейтрон-гамма анализа на быстрых нейтронах. Данный метод основан на нейтронном облучении материала и анализе спектров γ -квантов, испускаемых в результате нейтрон-ядерных реакций. По площади γ -пииков можно судить о количестве того или иного вещества в образце. Эти конфигурации состоят из источника нейтронов, гамма-детектора (детекторов), электроники и системы сбора данных.

Существуют два различных типа систем для нейтронно-гамма-анализа: мобильная установка [1], которая может перемещаться по полю для сбора данных, и стационарная установка для исследования образца[2].

Важной задачей при разработке прототипа устройства для анализа почв является создание качественной модели проектируемой системы. Расчёт установки может быть выполнен в пакете программ Geant4, представляющем из себя инструментарий для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием метода Монте-Карло.[3] Спектры, полученные с помощью Geant4 иногда имеют заметные отклонения от экспериментальных данных. Однако эта проблема может быть решена путем отдельного моделирования транспорта нейтронов и генерации гамма-квантов. Эта работа посвящена компьютерному моделированию установки для анализа почвы в инструментарии Geant4.

1. A. Kavetskiy, G. Yakubova, S. A. Prior et al. //Applied Radiation and Isotopes. 2019. Vol. 150. P. 127–134.

2. Разинков Е. А., Алексахин В. Ю., Рогов Ю. Н. и др. // Горный журнал. No 2. 51. (2022).

3. Geant4 v. 10.01, p. 2. https://geant4.web.cern.ch/support/download_archive?page=3.

SIMULATION OF A SETUP FOR CARBON ANALYSIS OF SOIL SAMPLE

A. V. Andreev^{1,2*} and “TANGRA” collaboration

¹Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia
tel. +7 (496) 216-50-59, fax. +7 (496) 216-51-46,

e-mail: post@jinr.ru

²Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University (MSU),
Leninskie gory, 1, b. 2, Moscow, Russia, 119991

* andreev.av20@physics.msu.ru

Soil plays important role in food production, as well as participates in regulating the chemical composition of the atmosphere, so accurate determining the concentration of different chemical elements in soil today remains an important task for various fields of science.

Modern science has a large arsenal of methods for studying such complex systems as soil. In particular, the most common ways determination of concentration in the soil sample are chemical methods. But they require specific preparations.

Nowadays, it seems promising to determine the concentration of different chemical elements in the soil using so-called neutron-gamma analysis on fast neutrons. This method is based on neutron irradiation of the material and analysis of the spectra of gamma quanta. By the area of the characteristic gamma peaks, it is possible to determine the amount of a particular substance in the sample. The system used for such analysis, consists of a neutron source, a gamma detector (detectors) and data collection systems.

There are two different types of typical system for neutron gamma analysis: mobile setup [1], which can move on field collecting data and stationary setup researching a specimen of material [2].

An important task in the development of a prototype device for analysis is to create a qualitative model of the designed system. This model can be done in the Geant4, a toolkit that models the passage of elementary particles through matter using the Monte Carlo method, developed at CERN.[3] Modeled spectra in Geant4 sometimes demonstrate notable deviation from the experimental data. However, this issue can be resolved by separately modeling neutron transport and generating gamma-quantum. This work involves computer modeling of the setup for analysis of soil sample in toolkit Geant4.

1. A. Kavetskiy, G. Yakubova, S. A. Prior et al. //Applied Radiation and Isotopes. 2019. Vol. 150. P. 127–134.

2. E. A. Razinkov, V. Y. Aleksakhin, Yu. N. Rogov et al // Mining Journal. 2022. No. 2. P. 51–56.

3. Geant4 v. 10.01, p. 2. https://geant4.web.cern.ch/support/download_archive?page=3.

ФОРМИРОВАНИЕ ДОЗОВОГО ПОЛЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ

М. Р. Андреев, М. А. Долгополов, В. М. Вахтель

ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, Россия, vakhtel@phys.vsu.ru

Рассмотрим формирование распределений полей доз гамма-излучения в однородной среде на основе метода фильтров-конверторов путем преобразования первичного гамма-излучения во вторичное с помощью комптоновского рассеяния при энергии $E_\gamma > 1,5$ МэВ. Дозовое поле формировалось в фантоме воды с линейными размерами поля от 10x10 см до 1x1 см при энергиях гамма-квантов $\approx 2,3$ МэВ.

Фильтры-конверторы из алюминия толщиной до 0,3 см позволяют увеличивать дозу на 2–3 % в слое фантома толщиной 1,5 см, в указанных пределах поля, что согласуется с рассчитанной оценкой при однократном рассеянии в фильтре. Аналогичный результат обеспечивает фильтр из железа. Данный способ эффективен в радиационных технологиях органических материалов.

FORMATION OF GAMMA RADIATION DOSE FIELD USING THE METHOD OF COMPTON SCATTERING

M. R. Andreev, M. A. Dolgoplov, V. M. Vakhtel

Voronezh State University, 394018, Voronezh, University square, 1, Russia, Vakhtel@phys.vsu.ru

Let us consider the formation of dose field distributions of gamma radiation in a homogeneous medium based on the method of filter-converters by transforming primary gamma radiation into secondary radiation using Compton scattering at energies. The dose field was formed in a water phantom with linear field dimensions ranging from 10x10 cm to 1x1 cm at gamma quantum energies of approximately 2.3 MeV.

Aluminum filter-converters up to 0.3 cm thick allow for an increase in dose by 2-3% in a phantom layer 1.5 cm thick, within the specified field limits, which is consistent with the calculated estimate for single scattering in the filter. A similar result is provided by an iron filter. This method is effective in radiation technologies for organic materials.

ДЕТЕКТОР ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ НА ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ.

С. Н. Апасов, В. М. Вахтель, М. И. Ляшенко, Д. Е. Костомаха

ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет,
394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, Россия, apasov@nwatom.ru.

При радиационных авариях, связанных с потерей источников ионизирующего излучения или в случаях крупномасштабных выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду, основной задачей ликвидации последствий данной аварии является поиск источников ионизирующего излучения и загрязненных территорий. Соблюдение принципов радиационной безопасности (оптимизации, нормирования, обоснования) требует от организаторов данных видов работ постоянного совершенствования методов измерения и применения дистанционных методов обследования загрязненных территорий и поиска источников ионизирующего излучения.

Мероприятия по поиску источников и установления их характеристик в месте аварии называются радиационной разведкой. В настоящий момент радиационная разведка проводится вручную или с применением робототехнических комплексов, путем измерения мощности дозы гамма излучения, в данном случае, надо отметить что процесс поиска (локализации) может занимать достаточно длительное время, что влечет за собой увеличение дозовых нагрузок операторов-дозиметристов.

Используемые типы детекторов при радиационной разведке представляют собой стандартные устройства на основе сцинтилляторов или газоразрядных детекторов. Данные типы детекторов регистрируют точечные величины ионизирующего излучения (мощность дозы, плотность потока или скорость счета импульсов), для эффективного процесса поиска источника ионизирующего излучения необходимо применять детекторы или устройства детектирования, которые имеют возможность определения направления распространения гамма излучения. Современные средства радиационного контроля могут визуализировать поля гамма излучения, определять направление максимума мощности дозы, а, соответственно и направление распространения излучения, но в первом случае устройства имеют очень высокую цену, а во втором, как правило – это достаточно массивные устройства со свинцовыми коллиматорами.

Суть данной работы состоит в создании достаточно простого по конструкции и недорого устройства, с помощью которого, с заданной точностью, можно регистрировать направление распространения гамма излучения, и тем самым достаточно быстро проводить локализацию источника гамма излучения.

Данное устройство можно отнести к комплексному детектору. Схема выбрана достаточно известная и ранее использовавшаяся в исследованиях космического мюонного излучения и поиска источников космического излучения. Устройство представляет собой два или несколько газоразрядных счетчиков, работающих в режиме счетчика Гейгера, включенных по схеме совпадений (гамма-телескоп). В данной схеме скорость электрических импульсов на выходе схемы совпадений зависит от взаимного расположения детекторов и источника гамма излучения, при том, когда исследуемое гамма излучения проходит через оба детектора и один гамма квант с очень малой временной задержкой возбуждает электрический импульс в обоих детекторах – наблюдается максимальное количество именно импульсов совпадений. Используя данный эффект можно получать азимут на источник гамма излучения и более быстро проводить их поиск и локализацию. В настоящий момент проходит испытание лабораторный стенд данного устройства, собранный на основе счетчиков типа ВС-8. В дальнейшем планируется построить подробные счетные характеристики данной схемы, а также различные геометрии расположения детекторов.

Достоинствами данной схемы, по сравнению с другими является то, что отсутствующие тяжелые коллиматоры и движущиеся элементы, обработка будет происходить полностью в автоматическом режиме на основании наработанных баз данных регистрации излучений, и конечно – относительная дешевизна установки.

GAMMA RADIATION DETECTOR WITH RADIATION SOURCE INDICATION CAPABILITIES

S. N. Apasov, V. M. Vakhtel, M. I. Lyashenko, D. E. Kostomakha

Voronezh State University, 394018, Voronezh, University square, 1, Russia, apasov@nwatom.ru

In case of radiation accidents related to the loss of ionizing radiation sources or in case of large-scale release of radioactive substances into the environment, the main task of eliminating the accident consequences is to search for the ionizing radiation sources and contaminated areas. Compliance with the radiation safety principles (optimization, standardizing, justification) requires the organizers of these types of work to enhance the measurement methods constantly and implement remote methods of contaminated areas inspection and ionizing radiation sources determination.

Detection of the sources and their determination in the accident area are called radiation surveying. Nowadays radiation surveying is carried out manually or with the use of robotic systems by measuring gamma radiation dose rate. It should be noted that in this case the process of detection (confinement) can take quite a long time, which leads to an increase in radiation exposure of health-physicist operators.

The types of detectors used in radiation surveying are standard devices based on scintillators or gas discharge detectors. These types of detectors record point-source values of ionizing radiation (dose rate, flux density or pulse count rate). For effective determination of ionizing radiation source, it is necessary to use detectors or detection devices capable to identify the direction of gamma radiation propagation. Modern radiation monitoring means are able to visualize gamma radiation fields, determine the maximum dose rate direction and thus the direction of radiation propagation. However, the devices of the first type are very expensive and the second type ones are usually fitted with lead collimators and are rather massive.

The essence of this work is to create a structurally simple and inexpensive device that will make it possible to register the direction of gamma radiation propagation with a given accuracy and thereby quickly confine the source of gamma radiation.

This device can be classified as a complex detector. The operating principle is pretty well-known and was previously used for the researches of muons of cosmic radiation and for the searching of cosmic radiation sources. The device consists of two or more gas discharge detectors working in the Geiger counter mode and connected into a coincidence gate (gamma-ray telescope). The speed of electrical pulses at the output of this coincidence gate depends on the mutual position of the detectors and the gamma radiation source. Moreover, when the considered gamma radiation passes through both detectors and when one gamma quantum with a very small-time delay excites an electric impulse in both detectors, the maximum number of coincidence impulses is observed. Using this effect, it is possible to get the azimuth of gamma radiation source and thus searching and confining of such sources can be carried out more quickly. Development model of this device, assembled on the basis of VS-8 type counters is currently undergoing laboratory testing. It is planned to build detailed counter characteristics of this circuit, as well as various options of geometric arrangement of the detectors.

The advantage of this development in comparison with others is the absence of heavy collimators and moving components. Data processing will be carried out utterly automatically based on the radiation recording databases. One more advantage is relatively low price of the installation.

НОВЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НЕЙТРОННОЙ ТОМОГРАФИИ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Б. А. Бакиров

Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6
+7 (496) 216-64-94
bulatbakirov@jinr.ru

Метод компьютерной томографии с использованием различных типов излучения (рентгеновские лучи, нейтроны, электромагнитное поле и т. д.) получил широчайшее распространение и продолжает набирать популярность в таких смежных с физикой областях как медицина, материаловедение, геология, археология и многие другие. Особое место в современном материаловедении занимает нейтронная томография [1]. Природа взаимодействия нейтронов с веществом определяет существенные преимущества данного метода: большая глубина проникновения, чувствительность к легким элементам, хороший контраст для элементов с близкими атомными номерами.

Однако, метод нейтронной томографии имеет ряд нерешенных проблем: большая длительность эксперимента, низкое качество изображений, вычислительная ресурсоемкость. Таким образом развитие метода нейтронной томографии требует применения новых математических алгоритмов обработки и реконструкции данных. Наиболее перспективными в данной области являются алгоритмы основанные на сверточных нейронных сетях и глубоком обучении [2].

В данной работе была реализована наиболее оптимальная архитектура сверточной нейтронной сети для предварительной обработки и томографической реконструкции нейтронных радиографических данных. Обучение нейронной сети проводилось с помощью набора данных, полученных на станциях нейтронной томографии в Лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка и НИЦ «Курчатовский институт». Результатом стала программа, эффективность работы которой сравнивалась с существующими методами обработки данных.

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта ОМУС № 23-402-02.

Список литературы

1. Podurets K. M. et al. Modern methods of neutron radiography and tomography in studies of the internal structure of objects // Crystallography Reports. 2021. Т. 66. С. 254–266.
2. Micieli D. et al. Accelerating neutron tomography experiments through artificial neural network based reconstruction // Scientific Reports. 2019. Т. 9. №. 1. С. 2450.

NEW ALGORITHMS FOR PROCESSING NEUTRON TOMOGRAPHY DATA BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

B. A. Bakirov

Joint Institute for Nuclear Research
Russia, 141980, Moscow Region, Dubna, 6 Joliot-Curie St
+7 (496) 216-64-94
bulatbakirov@jinr.ru

The method of computed tomography using various types of radiation (X-rays, neutrons, electromagnetic field, etc.) has become widespread and continues to gain popularity in such fields related to physics as medicine, materials science, geology, archeology and many others. Neutron tomography occupies a special place in modern materials science [1]. The nature of the interaction of neutrons with matter determines the significant advantages of this method: a large penetration depth, sensitivity to light elements, good contrast for elements with close atomic numbers.

However, the neutron tomography method has several unsolved problems: long duration of the experiment, low image quality, computational resource intensity. Thus, the development of the neutron tomography method requires the use of new mathematical algorithms for data processing and reconstruction. The most promising in this field are algorithms based on convolutional neural networks and deep learning [2].

In this work, the most optimal architecture of a convolutional neutron network for preprocessing and tomographic reconstruction of neutron radiographic data was implemented. The neural network was trained using a set of data obtained at neutron tomography stations at the Frank Laboratory of Neutron Physics and the National Research Centre “Kurchatov Institute”. The result was a program whose efficiency was compared with existing data processing methods.

The work was carried out with the financial support of the AYSS grant No. 23-402-02.

References

1. Podurets K. M. et al. Modern methods of neutron radiography and tomography in studies of the internal structure of objects //Crystallography Reports. 2021. V. 66. P. 254–266.
2. Micieli D. et al. Accelerating neutron tomography experiments through artificial neural network based reconstruction //Scientific Reports. 2019. V. 9. №. 1. P. 2450.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНОВ ПРОТОННЫМ ПУЧКОМ

Т. Л. Бобровский, М. В. Боховко, А. Ф. Гурбич, П. С. Прусаченко

Физико-энергетический институт им. Лейпунского (ФЭИ),
пл. Бондаренко 1, г. Обнинск, 249033, Россия;
timofeybobrovskiy@gmail.com

При оценке радиационной стойкости материалов, модификации поверхностей ионными пучками используются различные модели тормозных способностей, среди которых наибольшее распространение получил SRIM [1]. Согласно работе [2] тормозные способности модели SRIM-2013 для тяжелых ионов с энергией менее 1 МэВ/нуклон не обладают должной согласованностью и как следствие не обладают надёжностью. Поэтому существует потребность в экспериментальном определении профилей тяжелых имплантированных ионов в различных средах и при разной энергии ионов. В данной работе мы экспериментально определили профили распределения имплантированных ионов ^{58}Ni при помощи метода, описанного в работе [3]. В данном методе образец сканируется по глубине пучком протонов, при этом изменяется их пробег до достижения ими резонансной энергии в реакции $^{58}\text{Ni}(p,\gamma)^{59}\text{Cu}$. Измерение интенсивности γ -излучения из реакции $^{58}\text{Ni}(p,\gamma)^{59}\text{Cu}$ в зависимости от энергии протонов позволило восстановить продольное распределение имплантированных ионов. Было установлено, что полученные результаты для ^{58}Ni не воспроизводятся расчётами, получаемыми при помощи программы SRIM-2013.

1. James F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack. “SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010)”. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 268 (2010) 1818.
2. Klaus Wittmark, “Misconception impairing the validity of the stopping power tables in the SRIM library and suggestions for doing better in the future”. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 427 (2020) 44.
3. D. I. Porat, K. Ramavataram. A proposed method for measuring ranges of heavy ions in solid. Proc. Phys. Soc. 76 (1960). pp. 438-439.

Bobrovsky T. L., Bokhovko M. V., Gurbich A. F., Prusachenko P. S.

I.I. Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering (IPPE),
Bondarenko sq. 1, Obninsk, 249033, Russia
timofeybobrovskiy@gmail.com

When the radiation resistance of materials or surface modification by ion beams are calculated various stopping power models are used. Most widely SRIM [1] is used. According to [2], the stopping power of the SRIM-2013 model does not have the proper consistency and, as a result, is not reliable for heavy ions with an energy of less than 1 MeV/nucleon. Therefore, there is a need to experimentally determine the profiles of heavy implanted ions in various substances and for different ion initial energies. In this work, we experimentally determined the distribution of implanted ^{58}Ni ions using the method described in [3]. In this method, the target is scanned in depth by a proton beam, by changing their range until they reach the resonance energy in the $^{58}\text{Ni}(p,\gamma)^{59}\text{Cu}$ reaction. Measurement of the intensity of γ -radiation from the reaction $^{58}\text{Ni}(p,\gamma)^{59}\text{Cu}$ as a function of proton energy made it possible to reconstruct the longitudinal distribution of implanted ions. It was found that the results obtained for ^{58}Ni are not reproduced by the calculations obtained using the SRIM-2013 program.

1. James F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack. "SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010)". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 268 (2010) 1818.

2. Klaus Wittmark, "Misconception impairing the validity of the stopping power tables in the SRIM library and suggestions for doing better in the future". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 427 (2020) 44.

3. D. I. Porat, K. Ramavataram. A proposed method for measuring ranges of heavy ions in solid. Proc. Phys. Soc. 76 (1960). pp. 438-439

УПРАВЛЕНИЕ РЕГИСТРАЦИЕЙ ПРОТОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСКОРИТЕЛЕ У-70

**Э. Н. Братишка¹, А. А. Городнов¹, А. А. Жирунов¹, М. С. Ефремов¹,
А. Д. Решетняк¹, А. О. Пергаев², Е. В. Рыбакова²**

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира 37

² СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородская обл.

otd4@expd.vniief.ru

На синхротронном ускорителе протонов У-70 (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ г. Протвино) проводятся работы на протонном радиографическом комплексе (ПРГК) [1]. Основной задачей данного комплекса является регистрация протонных изображений при проведении радиографических экспериментов. Для выполнения данной задачи в состав комплекса входят три пункта регистрации протонных изображений (ПРПИ). Каждый ПРПИ оснащен программно-аппаратным комплексом для регистрации протонных изображений, включающим в себя систему управления генераторами задержек, систему управления осциллографами, систему управления контроллерами объективов, систему позиционирования объектов и систему управления питанием. Для разработки программного обеспечения систем управления использовался инструментальный программный пакет CRW-DAQ [2].

Система управления генераторами задержек позволяет производить подбор параметров для каждого из устройств, а именно: время задержки относительно сигнала синхронизации ускорителя, амплитуду и длительность сигнала для срабатывания затвора ПЗС-регистраторов. Система управления осциллографами позволяет удаленно получать данные об интенсивности

пучка с измерительного трансформатора тока (пояс Роговского) и о сигналах срабатывания затворов. При помощи системы управления контроллерами объективов производится подбор диафрагмы и настройка фокусировки изображения. Система позиционирования объектов дает возможность удаленно перемещать исследуемые объекты, управлять положением сцинтилляторов и реперных объектов. Система управления питанием обеспечивает бесперебойным питанием оборудование, позволяет удаленно управлять подачей питания на аппаратные подсистемы (осциллографы, генераторы, регистраторы и т. д.) и отслеживать состояние внешней электрической сети.

Список литературы

1. А. И. Андриянов и др. Ввод в эксплуатацию комплекса ПРТК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ. – Препринт ИФВЭ 2015-3. – Протвино, 2015. – 13 с.

2. А. В. Курякин, Ю. И. Виноградов Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ) // Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006612848 от 10.08.2006 г. URL: www.crw-daq.ru.

PROTON IMAGE REGISTRATION CONTROL DURING RADIOGRAPHIC EXPERIMENTS ON ACCELERATOR U-70

**E. N. Bratishka¹, A. A. Gorodnov¹, A. A. Zhirunov¹, M. S. Efremov¹,
A. D. Reshetnyak¹, A. O. Pergaev², E. V. Rybakova²**

¹ Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics», Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave, 37

²SarFTI NRNU MEPhI, Sarov, Nizhny Novgorod region
otd4@expd.vniief.ru

On proton synchrotron accelerator U-70 (SRC “Kurchatov Institute” - IHEP, Protvino) there are conducted works on proton radiography complex (PRGC) [1]. The main task of PRGC is proton image registering during radiographic experiments. To fulfill this task, the complex involves three proton image registering stations (PIRS). Each PIRS is equipped by a hardware-software complex for proton image registration, involving a delay generators control system, an oscillographs control system, a lens controllers’ control system, an objects positioning system and a power control system. Software package toolkit CRW-DAQ was employed to develop software of control systems.

A delay generator control system allows parameters’ seek for each device, namely: delay time relatively to an accelerator sync, signal amplitude and duration for triggering of a shutter of CCD-registers. Oscillograph control system allows a remote receiving data on beam intensity from a measuring current transformer (Rogowski loop) and on triggering signals of shutters. A diaphragm is selected and an image focus is regulated by the control system of lens controllers. The object positioning control system permits to remotely move studied objects, to control position of scintillators and reference objects. The power control system supplies equipment with no-break power, allows a remote control over power supply onto hardware subsystems (oscillographs, generators, registers et al.) and monitoring of a state of external electric circuit.

References

1. A. I. Andriyanov et al. Commissioning of PRC complex on accelerator U-70 SRC IHEP. – Preprint IHEP 2015-3. – Protvino, 2015. – 13 p.

2. A. V. Kuryakin, Yu. I. Vinogradov Program for physical measurements automation and experimental plants (CRW-DAQ) // RF certificate on official program registration for computer system №2006612848 dated by 10.08.2006 URL: www.crw-daq.ru.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОИСКА И ИДЕНТИФИКАЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧАЮЩИХ НУКЛИДОВ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

И. С. Бредихин

ООО «Гамматек», Москва, 1-й Нагатинский проезд 2 строение 35БН, офис 19
+79057650009, ivan@gammatech.pro

В последние годы наблюдается тенденция на использование методов машинного и глубокого обучения для самых различных задач науки и техники. При этом, в ряде областей эти методы, несмотря на все возложенные на них ожидания, показывают весьма скромный результат. Предположение, что методы глубокого обучения смогут внести существенный вклад в решение задач идентификации в области спектрометрии, основывается на нескольких факторах:

По своей сути методы глубокого обучения пытаются имитировать работу человека и головного мозга (нейроны, нейронные связи, обучение и поиск паттернов). Поэтому эти методы особенно хорошо работают там, где в решаемой задаче помимо понятной расчетно-алгоритмической части (например, при решении ОДУ или уравнений в частных производных), имеется математически плохо формализованный поиск паттернов. Использование классического подхода идентификации, помимо формального алгоритмизованного процесса выделения пиков, применяет шаг сопоставления найденных пиков с имеющимися библиотеками нуклидов. При этом, для получения финального списка гамма-нуклидов, входящих в состав анализируемой смеси, используется достаточно большое количество эвристик [1]. Соответственно, у методов глубокого обучения есть потенциал для того, чтобы успешно научить машину этим эвристикам. Это в итоге продвигает нас к большей автоматизации процесса разбора гамма-спектров.

В области гамма-спектроскопии имеется потенциальная возможность с помощью машинного обучения построить человеко-ориентированные классификаторы и методы декомпозиции спектров. Даже если в этой области не будет достигнута 100% автоматизация, где машина полностью заменит человека, построение таких классификаторов уже будет существенным упрощением задачи. Функция машины – выполнить достаточное количество предварительной работы по выделению характеристик, по которым либо она сама, либо человек сможет сделать разбор и анализ спектра. Особенно это актуально для разбора сложносоставных спектров, с 4-мя и более нуклидами).

В данной работе мы представим результаты первого этапа разработки программно-аппаратного мобильного решения для проведения поиска и идентификации радионуклидных загрязнений с возможностью определения их активности. Одной из ключевых особенностей разрабатываемого ПАК является именно инновационный алгоритм обработки спектров, который использует методы машинного обучения. Мы показываем текущие результаты применения глубокого обучения на свёрточных архитектурах (CNN) и на архитектурах 1D U-Net. Мы анализируем, насколько эти архитектуры помогли продвинуться вперед в решении задач разбора спектров, а также делаем вывод, как можно улучшить текущий подход и архитектуры в соответствии с задачей построения интерпретируемых человеком классификаторов, как описано выше.

Список литературы

[1] Kamuda, M., Zhao, J., & Huff, K. (2020). A comparison of machine learning methods for automated gamma-ray spectroscopy. In Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (Vol. 954, p. 161385). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.063>

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE/HARDWARE INSTRUMENTATION FOR THE SEARCH AND IDENTIFICATION OF GAMMA-EMITTING NUCLIDES BASED ON MACHINE LEARNING

I. S. Bredikhin

Gammatech LLC, Moscow, 1st Nagatinskiy proezd 2 building 35BN, office 19
+79057650009, ivan@gammatech.pro

There has been a trend towards the use of machine learning and deep learning methods for a wide variety of tasks in science and technology recently. Despite all the expectations, in a number of areas, these methods, show very modest results. The assumption that deep learning methods can make a significant contribution in identification in the field of spectrometry is based on several factors:

At its core, deep learning methods try to imitate the work of a person and the brain (neurons, neural connections, learning and pattern searching). Therefore, these methods work especially well where understandable computational-algorithmic part (for example, when solving ODEs or partial differential equations) is combined with a mathematically poorly formalized search for patterns. The use of the classical identification approach, in addition to the formal algorithmized peak extraction process, uses the step of comparing the found peaks with the available nuclide libraries. At the same time, a sufficiently large number of heuristics are used to obtain the final list of gamma nuclides that make up the analyzed mixture [1]. Accordingly, deep learning methods have the potential to successfully teach these heuristics to a machine. This eventually moves us towards greater automation of the process of parsing gamma spectra.

In the field of gamma spectroscopy, there is a potential opportunity to build human-oriented classifiers and spectral decomposition methods using machine learning. Even if 100% automation is not achieved in this area, where a machine will completely replace a person, the construction of such classifiers will already be a significant simplification of the task. The function of the machine is to perform a sufficient amount of preliminary work on the selection of characteristics, according to which either it itself or a person can analyze and analyze the spectrum. This is especially true for the analysis of complex spectra, with 4 or more nuclides.

In this paper, we present the results of the first stage of developing a software and hardware mobile instrumentation for searching and identifying radionuclide contamination with the ability to determine their activity. One of the key features of the developed HSS is the innovative spectrum processing algorithm that uses machine learning methods. We show the current results of applying deep learning on convolutional architectures (CNN) and on 1D U-Net architectures. We analyze how these architectures have helped advance the spectrum analysis problem and conclude how the current approach and architectures can be improved in accordance with the task of building human-interpretable classifiers, as described above.

References

[1] Kamuda, M., Zhao, J., & Huff, K. (2020). A comparison of machine learning methods for automated gamma-ray spectroscopy. In Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (Vol. 954, p. 161385). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.063>

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ВЕКТОРОВ МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНЫХ МОМЕНТОВ

В. М. Вахтель, Д. Е. Костомаха, В. А. Работкин

ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет,
394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, Россия
E-mail: vakhtel@phys.vsu.ru

Показано, что каждому случайному вектору $(CBP)_j : v(\cdot)_j = (v_0, v_1, \dots, v_l)_j$, $0 \leq v_j$, $\sum_{i=0}^l v_i = n$, $0 < n = 2, 3, \dots$ представляющему эмпирическое дискретное распределение случайной выборки объемом n из случайных отсчетов $k_i = i$, $i = 0, 1, \dots, l$, однозначно соответствуют дробные центральные комплексные моменты $\mu(S)$ порядка $S = r + \alpha$, $r = 1, 2, \dots$; $0 \leq \alpha \leq 1$, $\mu(S) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^S = \text{Re}(\mu(S)) + i \text{Im}(\mu(S))$, $i^2 = -1$, [1].

Проекции фазовых траекторий $\mu(S)_j$ на плоскость $(\text{Re}(S); \text{Im}(S))$ закономерно меняют свои характеристики при переходе от $v(\cdot)_j$ к $v(\cdot)_{j+m}$ в их последовательности между близкими CBP в распределении $C(I(v(\cdot)_j))$ их идентификатора $I(v(\cdot)_j)$: $1 < I(v(\cdot)_j) = a(\cdot) \cdot v(\cdot)_j$; $a(\cdot) = (a_0, \dots, a_l)$.

Проекция на плоскость $\text{Im}(\mu(S), S)$ мнимой составляющей $\mu(S)$ и реальной составляющей $\text{Re}(\mu(S), S)$ представляет гармонические затухающие при $\bar{k} < 1$ или возрастающие при $\bar{k} > 1$ колебания функции S , позволяющие прогнозировать ожидаемые значения $\text{Im}(S > S_0)$, $\text{Re}(S > S_0)$, и, в частности, в особых точках $\alpha = 0; 0,5$:

$$\begin{cases} \text{Im}(S > S_0) = \text{Im}(S_0) e^{-y \cdot (S - S_0)} (-1)^r \sin(\pi \cdot S), & r > 2 \\ \text{Re}(S) = \mu_0 e^{-y \cdot S_0} \cos(y \cdot S). \end{cases}$$

По характеристикам фазовых траекторий $\mu(S)$, включая проекции, можно классифицировать отдельные CBP и их упорядоченные по $I(\cdot)_j$ совокупности подобно траекториям дифференциальных уравнений [2].

Список литературы

1. Bliznyakov N. M., et. al., in NUCLEUS-2022, Book of Abstracts, 303, (2022).
2. Арнольд В. И., Обыкновенные дифференциальные уравнения, М: МЦНМО, 2018, 244.

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF RANDOM DISCRETE VECTORS BY THE METHOD OF COMPLEX MOMENTS

V. M. Vahtel, D. E. Kostomakha, V. A. Rabotkin

Voronezh State University, 394018, Voronezh, University square, 1, Russia,
E-mail: vakhtel@phys.vsu.ru

It is demonstrated that for each random vector (RV) $0 \leq v_j$, $\sum_{i=0}^l v_i = n$, $0 < n = 2, 3, \dots$ representing the empirical discrete distribution of a random sample volume of random counts $k_i = i$, $i = 0, 1, \dots, l$, explicitly correspond to fractional central complex moments $\mu(S)$ of order $S = r + \alpha$, $r = 1, 2, \dots$; $0 \leq \alpha \leq 1$, $\mu(S) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^S = \text{Re}(\mu(S)) + i \text{Im}(\mu(S))$, $i^2 = -1$, [1].

Projections of the phase trajectories $\mu(S)_j$ on the plane $(\text{Re}(S); \text{Im}(S))$ tend to change their characteristics in the transition from $\nu(\cdot)_j$ к $\nu(\cdot)_{j+m}$ in their sequence between close RV in distribution $C(I(\nu(\cdot)_j))$ of their identifier $I(\nu(\cdot)_j) : 1 < I(\nu(\cdot)_j) = a(\cdot) \cdot \nu(\cdot)_j ; a(\cdot) = (a_0, \dots, a_l)$.

Projection on the plane $\text{Im}(\mu(S), S)$ of the virtual component $\mu(S)$ and the actual component $\text{Re}(\mu(S))$ on the plane $\text{Re}(\mu(S), S)$ represent harmonic damping at $\bar{k} < 1$ or increasing at $\bar{k} > 1$ variations of function S , enabling us to predict the expected values of $\text{Im}(S > S_0)$, $\text{Re}(S > S_0)$, and, in particular, in specific points $\alpha = 0; 0,5$:

$$\begin{cases} \text{Im}(S > S_0) = \text{Im}(S_0) e^{y \cdot (S - S_0)} (-1)^r \sin(\pi \cdot S), & r > 2 \\ \text{Re}(S) = \mu_0 e^{-y \cdot S_0} \cos(y \cdot S). \end{cases}$$

According to the characteristics of the phase trajectories $\mu(S)$, including the projections, we can classify the individual RVs and their ordered $I(\cdot)_j$ totality similarly to the trajectories of differential equations [2].

References

1. Bliznyakov N. M., et. al., in NUCLEUS-2022, Book of Abstracts, 303, (2022)
2. V.I. Arnold. The Ordinary Differential Equations, M: MTsNMO, 2018, 244

РАЗРАБОТКА КРИОСТАТА ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕСТОВ ПРИЕМНИКОВ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

**А. В. Вдовин, А. А. Гунбина, А. М. Красильников, М. А. Мансфельд,
М. А. Маркина, К. В. Минеев, Е. Л. Певзнер, М. А. Тарасов, Н. В. Тягушкин,
А. Н. Черников, В. С. Эдельман, В. Ф. Вдовин**

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН
им. А. В. Гапонова-Грехова (ИПФ РАН). 603600, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.
Тел. +7 (831) 436-62-02, факс +7 (831) 416-06-16, e-mail: dir@ipfran.ru

Высококочувствительные приемники субтерагерцового (субТГц) диапазона частот для космических и баллонных миссий требует глубокого криогенного охлаждения до субкельвинных (субК) уровней. Эти миссии предъявляют жесткие требования к радиационной стойкости аппаратуры. Космические лучи могут драматически повлиять на чувствительную приемную аппаратуру, и требуется наземная проверка приборов на источниках, имитирующих радиационное воздействие. Уникальные источники и ускорители ВНИИЭФ дают такую возможность. В 2022 были сделаны первые тесты с приемными субТГц структурами [1]. Они показали актуальность задачи и эффективность инструмента. Облучённые приемники тестировались в стационарных лабораторных субК криостатах растворения ^3He в ^4He и сорбционных криостатах на выживаемость и оценку степени повреждения облученных приемных структур после радиационного воздействия. Оценки влияния на чувствительность в таком эксперименте выполнить невозможно. Для этого и создается мобильный субК криостат для проведения «горячих» тестов работающих приемных структур в режиме приема тестового субТГц сигнала эталона. Создание отечественного субК криостата имеет очень широкое значение: квантовый компьютеринг, квантовые коммуникации и т. д. В связи с санкциями, коммерческие субК криостаты Oxford Instr., Blue Force и т. п.) недоступны, российских аналогов нет, и криостат будет востребован.

В докладе представлен проект такого криостата и уже созданные ключевые элементы прототипа криостата. Разработка начата в апреле 2023 г в рамках совместного с сотрудниками ВНИИЭФ изучения на месте возможностей и требований помещений и действующих установок. Авторы выражают благодарность сотрудникам ВНИИЭФ А. Грунину, Д. Юнину и

Е. Голихиной, а также руководству проекта «Ядерная и радиационная физика» Национального Центра Физики и Математики за поддержку.

Список литературы

[1] A. Atepalikhin, A. Grunin, M. Tarasov, D. Yunin, et al. First Results on Irradiation of Superconducting Elements for Terahertz Receivers in Deep Space. 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), 2023, DOI 10.1109/rmc55984.2022.10079335

DEVELOPMENT OF A CRYSTAT THE RADIATION TESTS OF SUBTERAHERTZ RECEIVERS

**A. V. Vdovin, A. A. Gunbina, A. M. Krasilnikov, M. A. Mansfeld,
M. A. Markina, K. V. Mineev, E. L. Pevzner, M. A. Tarasov, N. V. Tyatyushkin,
A. N. Chernikov, V. S. Edelman, V. F. Vdovin**

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS (IAP RAS).
603600, Nizhny Novgorod, Ulyanov street, 46.
Tel. +7 (831) 436-62-02, fax +7 (831) 416-06-16, e-mail: dir@ipfran.ru

High sensitive subterahertz (subTHz) receivers for space and balloon missions require deep cryogenic cooling to subkelvin (subK) levels. These missions impose stringent requirements on the radiation resistance of the equipment. Cosmic rays can dramatically affect sensitive receiving equipment, and ground-based verification of instruments at sources simulating radiation forcing are required. The unique sources and accelerators of VNIIEF provide such an opportunity. In 2022, the first tests with receiving subTHz structures were made [1]. They demonstrated the relevance of the task and the effectiveness of the tool. Irradiated receivers were tested in stationary laboratory subK cryostats for dissolving ^3He in ^4He and sorption cryostats for survival and assessment of the degree of damage to irradiated receiving structures after radiation exposure. It is impossible to estimate the effect on sensitivity in such an experiment. For this, a mobile subK cryostat is being created to conduct "hot" tests of operating receiving structures in the mode of receiving a test sub-THz signal of the standard. Development of Russian subK cryostat has a very wide meaning: quantum computing, quantum communications, etc. Due to sanctions, commercial subK cryostats (Oxford Instr., Blue Force, etc.) are unavailable, there are no Russian analogues, and the cryostat will be in demand.

The report presents the project of such a cryostat and already fabricated elements of the cryostat prototype. Development began in April 2023 as part of a joint on-site study of the capabilities and requirements of the premises and existing installations with VNIIEF employees. The authors express their gratitude to VNIIEF staff members A. Grunin, D. Yunin and E. Golikhina, as well as to the management of the project "Nuclear and Radiation Physics" of the National Center for Physics and Mathematics for their support.

References

[1] A. Atepalikhin, A. Grunin, M. Tarasov, D. Yunin, et al. First Results on Irradiation of Superconducting Elements for Terahertz Receivers in Deep Space. – 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), 2023, DOI 10.1109/rmc55984.2022.10079335.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО СОСТАВЛЯЮЩИХ АМПЛИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ДЕТЕКТОРЕ ПРОТОНОВ ОТДАЧИ

И. С. Вершинин, А. В. Долгополов, В. В. Гаганов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира 37
otd4@expd.vniief.ru

Одним из основных детекторов нейтронов, применяемых на генераторе НГ-11И, является детектор протонов отдачи, образующихся при взаимодействии быстрых нейтронов с водородосодержащим конвертором. Конструктивно детектор представляет собой вакуумный герметичный цилиндрический бокс, выполненный из нержавеющей стали, внутри которого соосно располагаются тонкий полиэтиленовый диск (конвертер) и цилиндрический кристалл CsI (сцинтиллятор). Во внутреннем объеме детектора поддерживается вакуум, что обеспечивает беспрепятственный пролёт протонов отдачи от конвертера к сцинтиллятору. В ходе измерений регистрируется распределение амплитуд импульсов детектора, которое соответствует энергетическому спектру регистрируемых частиц.

В ходе эксплуатации детектора было обнаружено, что заряженные частицы, образующиеся при взаимодействии нейтронов с конструктивными элементами детектора, вносят существенный вклад в регистрируемый спектр. В рамках данной работы методом Монте-Карло в программном комплексе PHITS 2.88 было выполнено моделирование переноса частиц внутри детектора и изучен вклад, вносимый протонами отдачи, образующимися в конвертере и другими частицами, образующимися в конструктивных элементах в регистрируемый спектр.

Получена оценка вклада электронов и альфа-частиц в амплитудные распределения протонов отдачи, регистрируемых детектором при работе генератора НГ-11И. Определено влияние конструкционных материалов детектора на амплитудное распределение протонов, электронов и альфа-частиц. Представлены результаты сравнения расчётных и экспериментальных амплитудных распределений.

MONTE-CARLO METHOD SIMULATION OF AMPLITUDE DISTRIBUTION COMPONENTS IN PROTON RECOIL DETECTOR

I. S. Vershinin, A. V. Dolgoplov, V. V. Gaganov

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics» Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

One of the main neutron detectors, applied on generator NG-11I, is a proton recoil detector, being formed under interaction between fast neutrons and a hydrogenous converter. Structurally, the detector represents a vacuum sealed cylindrical box, made of stainless steel, inside of which a thin polyethylene disk (converter) and a cylindrical crystal CsI (scintillator) are located in alignment. Vacuum is maintained in the inner detector volume, what provides a free path of recoil protons from the converter to the scintillator. In measurements registered is distribution of detector's pulse amplitudes, which corresponds to energy spectrum of registered particles.

During detector operation it was detected that charged particles, being formed under interaction between neutrons and structural components of the detector, contribute significantly to the registered spectrum. Within the framework of these efforts by Monte-Carlo method in software package PHITS 2.88 there was simulated particles' transport inside detector, and studied a contribution, made by recoil protons, being formed in converter, and other particles, forming a registered spectrum in structural components.

Obtained was evaluation of electron and alpha-particle contribution to amplitude distributions of recoil protons, registered by detector under operation of generator NG-11I. Specified is an effect of detector's structural components on amplitude distribution of protons, electrons and alpha-particles. Presented are comparison results of calculation and experimental amplitude distributions.

ШЕСТИДЕТЕКТОРНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ИХ ВИДА МЕТОДОМ ΔE -E

**О. П. Вихлянцев, Н. В. Завьялов, Л. Н. Генералов, А. В. Курякин, И. А. Карпов,
Н. Е. Гурин, А. Д. Тумкин, С. В. Фильчагин, Д. С. Дроздова**

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира 37
otd4@expd.vniief.ru

На электростатическом тандемном ускорителе ЭГП-10 (РФЯЦ-ВНИИЭФ) [1] используется аппаратно-программный комплекс [2] для регистрации заряженных частиц с разделением их вида методом ΔE -E. С течением времени комплекс получил свое дальнейшее развитие: выполнена замена всех шести ΔE -E телескопов и проведена модернизация спектрометрических каналов регистрации сигналов. Шестидетекторный спектрометр на базе новых телескопов и ядерно-физической аппаратуры позволил улучшить качество регистрации первичных данных и увеличить скорость набора.

Новые ΔE -E телескопы производства «Физико-Технического Института имени А. Ф. Иоффе» РАН, г. Санкт-Петербург включают в себя зарядочувствительные предварительные усилители, расположенные в корпусе телескопа в непосредственной близости к кремниевым детекторам. Данная компоновка телескопов позволила уменьшить шумы и повысить энергетическое разрешение спектрометрических каналов.

Модернизация спектрометрического измерительно тракта заключалась в замене усилительной и измерительной аппаратуры. Используемые усилители были заменены на специальные 8-канальные спектрометрические усилители-формирователи типа 8-Chann SA-MUX производства ООО «ТехИнвест» г. Дубна. Используемый аналого-цифровой преобразователь был заменен на двухканальный аналого-цифровой преобразователь типа РА27п производства ООО «ТехИнвест» г. Дубна. Спектрометрические измерительные каналы, построенные на данной аппаратуре, имеют большее быстродействие, что позволило повысить скорость набора спектрометрической информации.

Список литературы

1. С. Н. Абрамович // ВАНТ, Физика ядерных реакторов, спец. выпуск, ТИЯС-XI, 1997. с. 4.
2. О. П. Вихлянцев, Л. Н. Генералов, А. В. Курякин, И. А. Карпов, Н. Е. Гурин, А. Д. Тумкин, С. В. Фильчагин // Ядерная физика и инжиниринг, 2016, том 7, № 4, с. 326–335.

SIX-DETECTOR SPECTROMETER OF CHARGED PARTICLES WITH THEIR TYPE SEPARATION BY METHOD ΔE -E

**O. P. Vikhlyantsev, N. V. Zavyalov, L. N. Generalov, A. V. Kuryakin, I. A. Karpov,
N. Ye. Gurin, A. D. Tumkin, C. V. Fil'chagin, D. S. Drozdova**

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of
Experimental Physics» Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

On electrostatic tandem accelerator EGP-10 (RFNC-VNIIEF) [1] a hardware-software complex [2] is used to register charged particles with their type separation by method ΔE -E. With time the complex has come into its further development: all six ΔE -E telescopes have been changed and spectrometer signal-recording channels have been modernized. A six-detector spectrometer based on new telescopes and nuclear physics equipment allows improvement of quality of initial data recording and collection rate increase.

New ΔE -E telescopes, produced by «A.F. Ioffe Physical-Technical Institute» RAS, St. Petersburg involve charge-sensitive preamplifiers, placed in a telescope body in immediate proximity to silicon detectors. The given arrangement of telescopes has allowed decrease of noises and heightening of spectrometry channel energy resolution.

To update a spectrometer measuring channel, amplifying and gaging equipment was changed. Used amplifiers were changed for special 8-channel spectrometer amplifiers of 8-Chann SA-MUX type, produced by LLC “TekhInvest”, Dubna. Applied analog-digital converter was replaced for two-channel analog-digital converter of PA27n type by production of LLC “TekhInvest”, Dubna. Spectrometer measuring channels, built on this equipment, have a high performance that made it possible to increase the speed of the spectrometric information collection.

References

1. S. N. Abramovich // VANT, Nuclear Reactors Physics, Special issue TTYaS-XI, 1997. p.4
2. O. P. Vikhlyantsev, L. N. Generalov, A. V. Kuryakin, I. A. Karpov, N. Ye. Grunin, A. D. Tumkin, S. V. Fil'chagin // Nuclear Physics and Engineering, 2016, volume 7, № 4, p. 326–335.

ПОИСК ТОЧЕЧНЫХ ЭМИССИОННЫХ ЦЕНТРОВ МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ НА КАТОДЕ МНОГОПРОВОЛОЧНОЙ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ КАМЕРЫ ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТА НА БАК

М. Э. Бузоверя¹, И. А. Карпов¹, А. Ю. Архипов¹, Г. Е. Гаврилов^{2*},
А. А. Дзюба², О. Е. Маев², М. В. Суясова²

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира 37

² Петербургский институт ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт»,
188300, Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова роща 1, Россия

* gavrilov_ge@npi.nrcki.ru

На сегодняшний день единственной проблемой, связанной с радиационной стойкостью, многопроволочных пропорциональных камер (МПК), работающих на БАК [1, 2], являются спонтанные самоподдерживающиеся токи, вызывающие аварийное отключение или понижение высоковольтного питания в детекторах. Исследования МПК, демонтированных из экспериментальных установок из-за постоянного возникновения таких токов, показали, что причиной эффекта являются точечные центры эмиссии электронов на поверхности катодных плоскостей [3]. Оценка величины тока эмиссии на катоде по величине наблюдаемых скачков тока в МПК показала 0.1–2 нА, что совпадает с токами при низкопороговой эмиссии углеродных наноструктур, специально получаемых в лабораториях [4, 5].

Появление подобных структур вполне реально и в МПК. Рабочие газовые смеси в мюонных МПК из CMS и LHCb обычно содержат углеродосодержащие молекулы ($\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$), которые диссоциируют в газоразрядной плазме у анодных проволочек. В представленной работе показано, что продукты этих реакций вызывают островковую карбонизацию медной фольги на катоде. В итоге, эмиссия таких точечных углеродных наноструктур из-за газового усиления на анодных проволочках дает макроскопический эффект в МПК: всплеск тока на десятки микроампер.

С целью обнаружения на катоде наноструктур, обладающих способностью к эмиссии электронов в электрическом поле детектора ($E_{\text{кат}} \sim 5000 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$), была исследована МПК, демонтированная из экспериментальной установки LHCb. Поиск проводился путем последовательного применения методов атомно-силовой микроскопии, начиная с полуконтактных фазовых и топографических измерений, и заканчивая измерениями токовых характеристик на предварительно выделенных участках поверхности. Особенностью исследования было стабильное несменяемое положение образцов в микроскопе и использование одного кантилевера во всех фазах исследований.

Список литературы

1. The LHCb collaboration et. al. // JINST. 2008. 3 S08005.
2. The CMS collaboration et. al. // Nucl. Instrum. Meth. A494:504-508, 2002.
3. Albicocco F.P., Anderlini L., Anelli M. et al. // JINST. 2019. V.14. Art. P11031.
4. Obratsov A.N., Zolotukhin A.A., Ustinov A.O. // Carbon. 2003. V. 41. No. 4. P. 836.
5. Иванов А.И., Небогатикова Н.А. и др. // ФТП. 2017. Т. 51. № 10. С. 1357.

SEARCH FOR THE CENTERS OF POINT EMISSION BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY AT THE CATHODE OF A MULTIWIRE PROPORTIONAL CHAMBER FROM THE EXPERIMENT AT THE LHC

**M. E. Buzoverya¹, I. A. Karpov¹, A. Yu. Arkhipov¹, G. E. Gavrilov²,
A. A. Dzyuba², O. E. Maev², M.V. Suyasova²**

¹ Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics» Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37

² Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center “Kurchatov Institute,” Gatchina, Leningrad. oblast, 188350 Russia

* gavrilov_ge@pnpi.nrcki.ru

To date, the only problem associated with the radiation resistance of the multiwire proportional chambers (MWPC) operating at the LHC [1, 2] are spontaneous self-sustaining currents, the appearance of which leads to an emergency shutdown or a decrease of the high-voltage power supply at the detectors. Studies of MWPCs dismantled from experimental facilities due to the constant occurrence of such currents showed that the effect is caused by the pointlike centers of electron emission on the surface of the cathode planes [3]. According to estimates based on the magnitude of the observed current jumps in the MWPC, the emission current at the cathode ranges from 0.1 to 2 nA, which coincides with the currents of the low-threshold emission from carbon nanostructures produced in the laboratory [4, 5].

The appearance of such structures is quite real in the MWPC. Working gas mixtures in the muon MWPC from CMS and LHCb usually contain carbon-containing molecules (Ar/CO₂/CF₄), which dissociate in the gas-discharge plasma near the anode wires. The present work shows that the products of these reactions lead to island carbonization of the copper foil on the cathode. As a result, the emission from such pointlike carbon nanostructures due to the gas amplification in vicinity of the anode wires gives a macroscopic effect in the MWPC: a current surge of tens of microamperes.

In order to detect the nanostructures capable of emitting electrons in the electric field on the cathode ($E_{cath} \sim 5000 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$), we studied the MWPC dismantled from the LHCb experiment. The search was carried out by successive application of the atomic force microscopy methods, starting with semi-contact topographic and phase measurements and ending with measurements of current characteristics at the pre-selected areas of the sample surface. A feature of the study was the stable unchangeable position of the samples at the microscope and using only one cantilever in all phases of the search.

References

1. The LHCb collaboration et. al. // JINST. 2008. 3 S08005.
2. The CMS collaboration et. al. // Nucl. Instrum. Meth. A494:504-508, 2002.
3. Albicocco F. P., Anderlini L., Anelli M. et al. // JINST. 2019. V.14. Art. P11031.
4. Obratsov A. N., Zolotukhin A. A., Ustinov A. O. // Carbon. 2003. V. 41. No. 4. P. 836.
5. Ivanov A. I., Nebogatikova N. A. et al. // FTP. 2017. V. 51.No 10. P. 1357.

ДЕТЕКТОРЫ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАССЕЙВАТЕЛЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ И ВЫСОКОДОЗНЫХ ПОЛЕЙ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**О. А. Горелова, А. В. Грунин, А. Н. Залялов, К. Н. Ковшов,
С. А. Лазарев, А. Г. Малькин, М. С. Миронов, Н. К. Миронов**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира 37
otd4@expd.vniief.ru

Проблема обеспечения функционирования аппаратуры в условиях воздействия ионизирующих актуализировалась в 60-е годы прошлого века. Интенсивно исследуются различные физические процессы в полупроводниках и диэлектриках, изделиях электронной компонентной базы, приборах и в сложных технических системах. В последние годы произошли существенные изменения в метрологическом обеспечении измерений, и как частный случай, испытаний. Эти изменения связаны, во-первых, с расширением круга задач испытаний и повышенными требованиями к точности результатов, во-вторых, с совершенствованием действующих и созданием новых испытательных установок и средств измерений и, в-третьих с изменениями нормативной базы метрологии в сторону их ужесточения. Возникает необходимость обобщить имеющийся опыт разработки детекторов высокоинтенсивных излучений и определить перспективы их использования в современных условиях.

В докладе на примере оптимизации сферического детектора для регистрации амплитудно-временных характеристик тормозного излучения (ТИ) установки ЛИУ-30 демонстрируются возможности по расчетам методом Монте-Карло по программе СМК энергетической зависимости чувствительности моделей сферического детектора при различных конструктивных размерах и материалах его составных частей.

Перспективным вариантом практического применения детекторов с диэлектрическим рассеивателем [1] является использование простых и надежных детекторов-компараторов для обеспечения передачи размера единицы экспозиционной дозы от статического эталонного γ -источника к рабочим средствам измерений и к мощным источникам ТИ, работающим в импульсном режиме. Это позволит повысить точность измерений экспозиционной дозы в полях мощных импульсных источников ТИ.

DETECTORS WITH DIELECTRIC SCATTERER FOR CHARACTERISTICS MEASURING OF HIGH-INTENSITY AND HIGH-DOSE BREMSSTRAHLUNG FIELDS

**O. A. Gorelova, A. V. Grunin, A. N. Zalyalov, K. N. Kovshov, S. A. Lazarev,
A. G. Mal'kin, M. S. Mironov, N. K. Mironov**

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics» Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

The problem of supplying equipment operation under ionizing effect was acute in the 1960-s of the last century. Various physical processes in semi-conductors and dielectrics, products of electronic component base (ECB), apparatuses and those in complex engineering systems are studied strongly. Recently significant changes have taken place in metrological assurance of measurements, and, particularly, tests. These changes are related to, firstly, extension of scope of test functions and raised standards of results' accuracy, secondly, improvement of active and development of new test units and measuring instruments and, thirdly, changes of metrology regulatory system towards their toughening. A necessity arises to summarize available experience of development of high-intensity radiation detectors and to determine prospects for their employment under present-day conditions.

By the example of optimization of spherical detector meant for recording amplitude-time characteristics of LIU-30 installation bremsstrahlung, the report shows capabilities based on Monte-Carlo method calculations by program SMK of energy dependence of models' sensitivity of spherical detector at different structural dimensions and materials of its component parts.

Promising variant for practice of detectors with dielectric scatterer [1] is application of simple and reliable comparator detectors to supply transfer of a unit value of exposure dose from static standard γ - source to ordinary measuring instruments and to high-power bremsstrahlung sources, operating in a pulsed operation. This allows measurement precision rise of exposure dose in fields of high-power pulsed bremsstrahlung sources.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВИЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АДРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

**И. И. Дегтярев, Ф. Н. Новоскольцев, О. А. Ляшенко,
Р. Ю. Синюков, Д. А. Цветков, А. Р. Селезнева**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А. А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1, Тел.: (4967) 71-36-23, Факс: (4967) 74-28-24, Email: fgbu@ihep.ru, Igor.Degtyarev@ihep.ru

В работе приводится описание физических основ математической модели первичных радиационных повреждений твердых тел, облучаемых адронным излучением низкого и промежуточного диапазона энергий. Рассмотрены следующие этапы генерации дефектов: первично выбитые атомы, каскады атом-атомных столкновений (динамическая стадия формирования повреждений) на основе 6 типов каскадных функций. Программная реализация описанной модели включена в состав программного комплекса RTS&T [1, 2], предназначенного для статистического моделирования связанного переноса многокомпонентного (200 типов частиц, и ионов) излучения в гетерогенных пространственно-неоднородных геометриях произвольной степени сложности в диапазоне энергий 10^{-11} эВ – 20 ТэВ. В докладе приведено сравнение результатов численного моделирования характеристик облучения боросиликатного стекла, предназначенного для иммобилизации радиоактивных отходов, с экспериментальными данными.

Список литературы

[1] I. I. Degtyarev, F. N. Novoskoltsev, O. A. Liashenko, E. V. Gulina, L. V. Morozova // RTS&T-2014 code status, Nuclear Energy and Technology, Volume 1, Issue 3, November 2015, Pages 222-225.

[2] И. И. Дегтярев, Ф. Н. Новоскольцев, О. А. Ляшенко, Р. Ю. Синюков, Е. В. Алтухова, А. И. Блохин, П. А. Блохин, А. А. Пряничников // RTS&T-2021 — Обновленный комплекс программ статистического моделирования связанного переноса многокомпонентного излучения в гетерогенных пространственно-неоднородных средах, Сборник трудов XI Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Москва, 26–29 октября 2021 года, т. 3, с. 148.

MATHEMATICAL MODEL OF PRIMARY RADIATION DAMAGES OF SOLIDS IRRADIATED BY LOW- AND INTERMEDIATE ENERGY HADRONS

**I. I. Degtyarev, F. N. Novoskoltsev, O. A. Liashenko, R. Yu. Sinyukov,
D. A. Tzvetkov, A. R. Selezneva**

Institute for High Energy Physics named by A.A. Logunov of NRC “Kurchatov Institute”, 142281, Moscow reg., Protvino, Nauki sq. 1, E-mail: fgbu@ihep.ru, Igor.Degtyarev@ihep.ru

The report describes the physical foundations of the mathematical model for primary radiation damages of solids irradiated by low- and intermediate energy hadrons. The following stages of defect generation are considered: primarily knocked-out atoms, atomic-atomic collision cascades (dynamic stage of damage formation) based on 6 types of cascade functions. The software implementation of the described model is included in the RTS&T code system [1,2], designed for statistical modelling of the associated transport of multicomponent (200 types of particles and ions) radiation in heterogeneous spatially heterogeneous geometries of arbitrary degree of complexity in the energy range of 10^{11} eV - 20 TeV. The report compares the results of numerical modelling of the radiation characteristics of borosilicate glass intended for immobilization of radioactive waste with experimental data.

References

[1] I. I. Degtyarev, F. N. Novoskoltsev, O. A. Liashenko, E. V. Gulina, L. V. Morozova // RTS&T-2014 code status, Nuclear Energy and Technology, Volume 1, Issue 3, November 2015, Pages 222-225.

[2] I. I. Degtyarev, F. N. Novoskoltsev, O. A. Lyashenko, R. Yu. Sinyukov, E. V. Altukhova, A. I. Blokhin, P. A. Blokhin, A. A. Pryanichnikov // The RTS&T-2021 – updated code for statistical modeling of coupled transport of multicomponent radiation in heterogeneous spatially inhomogeneous media, Proceedings of the XI Russian Scientific Conference "Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies", Moscow, October 26-29, 2021, vol. 3, p. 148.

К ТЕСТИРОВАНИЮ ПОРОГОВЫХ SiO₂ АЭРОГЕЛЕВЫХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ДЕТЕКТОРОВ НА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ (МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЯ)

**А. Л. Полонский, А. М. Лапик, Л. З. Джилавян*, В. П. Лисин,
В. Н. Пономарёв, Н. В. Руднев, А. В. Русаков**

Институт ядерных исследований Российской академии наук,
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а
т. (499)1352112, ф. (499)1352268
*E-mail: dzhil@inr.ru

Пороговые SiO₂ аэрогелевые черенковские детекторы с выбранными показателями преломления широко используются для разделения заряженных пионов и каонов [1]. Необходимые для таких детекторов тестирования и калибровки, определяющие их существенные характеристики (полную эффективность регистрации, распределение числа просматривающих детектор «активированных» фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и др.), можно проводить и на пучках ускорителей, и на космических лучах [2]. В предыдущей нашей работе [3] предложен метод тестирования таких детекторов на космических лучах, использующий минимальное количество добавочной «электроники» и не требующий массивные слои Pb- поглотителя [2]. В настоящей работе сопоставляются данные экспериментов и моделирования, учитывающего: описание дифференциального по энергии и углам потока мюонов в космических лучах; образование, отражение, поглощение черенковских фотонов и их вылет из облучаемой мишени; квантовую эффективность фотокатодов в используемых ФЭУ.

Список литературы

1. S. Alef *et al.* // Eur. Phys. J. 2020. Vol. 56. Issue 4. P. 104.
2. A. R. Buzykaev. Development of Cherenkov ASHPH counters for the KEDR detector. The candidate of sciences (physics – mathematics) dissertation. G. I. Budker Institute of Nuclear Physics. Novosibirsk. 2017.
3. A. M. Lapik *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 1.

TO TESTS OF THRESHOLD SILICA AEROGEL CHERENKOV DETECTORS ON COSMIC RAYS (SIMULATION AND MEASUREMENTS)

**A. L. Polonski, A. M. Lapik, L. Z. Dzhilavyan*, V. P. Lisin,
V.N. Ponomarev, N.V. Rudnev, A.V. Rusakov**

Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences.
7a, 60th October Anniversary Prospect, Moscow 117312, Russia
phone: (499)1352112, fax: (499)1352268
*E-mail: dzhil@inr.ru

Threshold SiO₂ aerogel Cherenkov detectors with chosen refractive indices are widely used to separate charged pions and kaons [1]. The tests and calibrations necessary for such detectors, which determine their essential characteristics (total detection efficiency, distribution of the number of "activated" photomultiplier tubes (PMTs) viewing the detector, etc.), can be carried out both on accelerator beams and on cosmic rays [2]. In our previous work [3], we proposed a method for testing such detectors on cosmic rays, which uses a minimum amount of additional "electronics" and does not require massive layers of Pb- absorber [2]. In this work, the data of experiments and simulations are compared, taking into account: the description of the muon flux in cosmic rays differential in energy and angles; formation, reflection, absorption of Cherenkov photons and their escape from the irradiated target; quantum efficiency of photocathodes in the used PMTs.

References

1. S. Alef *et al.* // Eur. Phys. J. 2020. Vol. 56. Issue 4. P. 104.
2. A. R. Buzykaev. Development of Cherenkov ASHPH counters for the KEDR detector. The candidate of sciences (physics – mathematics) dissertation. G.I. Budker Institute of Nuclear Physics. Novosibirsk. 2017.
3. A. M. Lapik *et al.* // Moscow University Physics Bull., 2023, No. 1.

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ И МОЩНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ ГАММА - ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ЗАЛЕ ГЕНЕРАТОРА НГ-11И

А. В. Долгополов, В. В. Гаганов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира 37
otd4@expd.vniief.ru

Выполнено детальное моделирование работы генератора НГ-11И при использовании мишени с дейтериевым насыщением. Получены расчетные оценки энергетического спектра DD-нейтронов, исходящих из мишенного узла нейтронного генератора при ускоряющем напряжении 160 кВ. Показано влияние элементов конструкции мишенного узла, стен и

дополнительного оборудования экспериментального зала на формирование спектра нейтронов и гамма излучения в экспериментальном зале НГ-11И. Представлены результаты расчёта пространственного распределения флюенса нейтронов и мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в экспериментальном зале генератора НГ-11И.

CALCULATION STUDIES OF SPATIAL DISTRIBUTION OF NEUTRON FLUENCE AND POWER OF GAMMA-RAY EQUIVALENT DOSE IN GENERATOR NG-11I EXPERIMENTAL HALL

A. V. Dolgoplov, V. V. Gaganov

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics», Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

Generator NG-11I operation was simulated in detail, using targets with deuterium saturation. Obtained were calculation estimates of DD-neutron energy spectrum, exiting the neutron generator target unit at accelerating voltage 160 kV. The paper describes an effect of structural target unit elements, walls and auxiliary equipment of experimental hall on formation of neutron and gamma-radiation spectra in experimental hall. Here are presented calculation results of spatial distribution of neutron fluence and equivalent gamma-ray dose rate in the generator NG-11I experimental hall.

РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ SiC-ДЕТЕКТОРОВ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ

С. А. Евсеев^{а, 1}, Ю. Б. Гуров^{а, 6}, М. С. Довбненко^а, Н. И. Замятин^а, Ю. А. Копылов^а,
С. В. Розов^а, В. Г. Сандуковский^а, Е. А. Стрелецкая^а, Л. Грубчин^{а, в}, Б. Затько^в

^а Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ),
141980, Россия, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6,
тел.: +7 (496) 216-40-40, факс: +7 (496) 216-51-46, e-mail: post@jinr.ru

⁶ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва,

^в Электротехнический институт, Словацкая академия наук, Братислава, Словакия

¹E-mail: evseevsa@jinr.ru

Представлены результаты исследования детекторов из карбида кремния (SiC) при облучении нейтронами. SiC-детекторы были изготовлены на основе эпитаксиального слоя 4H-SiC n-типа проводимости [1, 2]. Толщина эпитаксиального слоя n-типа составляла 50 мкм. Контакты Шоттки диаметром 3,0 мм были изготовлены путем вакуумного испарения двойного слоя Ni и Au толщиной 10 и 30 нм соответственно. Исходное энергетическое разрешение детекторов составляло < 25 кэВ для α -частиц.

Радиационная стойкость SiC-детекторов исследовалась на основе анализа характеристик этих приборов до и после облучения быстрыми нейтронами с интегральными потоками 5.1×10^{13} , 5.4×10^{14} , 3.4×10^{15} н/см². Облучение проводилось на импульсном реакторе ИБР-2М (ОИЯИ). Для калибровки и контроля спектрометрических характеристик SiC-детекторов использовался α -источник ²²⁶Ra.

Показано, что после нейтронного облучения наблюдалась значительная деградация: пики от α -частиц сместились в сторону меньших каналов и стали значительно шире. Установлено, что с увеличением нейтронного потока энергетическое разрешение ухудшается в два, десять и двадцать раз соответственно. При этом эффективность сбора заряда (CSE) снизилась с 100% до 96%, 70% и 1% (рабочее напряжение 350 В) при потоках нейтронного излучения 5.1×10^{13} , 5.4×10^{14} , 3.4×10^{15} н/см² соответственно.

Работа поддержана грантом ОИЯИ для молодых специалистов № 23-202-03.

Список литературы

1. Yu. B. Gurov et al. // Instrum. Exp. Tech. 2015. V. 1. P. 22.
2. Yu. B. Gurov et al. // JINST. 2018. V. 13. P11005.

RADIATION DAMAGE OF SiC DETECTORS UNDER NEUTRON IRRADIATION

Evseev S.^{a,1}, Gurov Yu.^{a,b}, Dovbnenko M.S.^a, Kopylov Yu.^a, Rozov S.^a, Sandukovsky V.^a, Streletskaya E.^a, Zamyatin N.^a, Hrubcin L.^{a,c}, Zat'ko B.^c

^a Joint Institute for Nuclear Research (JINR), 6 Joliot-Curie St, Dubna, Moscow Region, Russia, 141980, phone: +7 (496) 216-40-40, fax: +7 (496) 216-51-46, e-mail: post@jinr.ru

^b National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

^c Institute of Electrical Engineering, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia

¹ E-mail: evseevsa@jinr.ru

The results of an investigation of silicon carbide (SiC) detectors when irradiated with neutrons are presented. SiC detectors were manufactured on the basis of the epitaxial layer of 4H-SiC n-type conductivity [1, 2]. The thickness of n-type epitaxial layer was 50 μm . Schottky barrier contacts with a diameter of 3.0 mm were made by vacuum evaporation of a double layer of Ni and Au 10 and 30 nm thick. The initial energy resolution of detectors was < 25 keV for α -particles.

The radiation resistance of SiC detectors was studied experimentally by analyzing their characteristics before and after fast neutron irradiation with integral fluxes of 5.1×10^{13} , 5.4×10^{14} , 3.4×10^{15} n/cm². The irradiation was carried out at the pulse reactor IBR-2M (JINR, Dubna). The α -source ²²⁶Ra that was used for calibration and control of spectrometric characteristics of SiC detectors.

It is shown that after neutron irradiation, significant degradation was observed: the peaks from the alpha particles shifted towards smaller channels and became much wider; with an increase in the flux, the energy resolution degrades by two, ten and twenty times; the charge collection efficiency (CCE) decreased from 100% to 96%, 70% and 1% (operating voltage 350 V) at the neutron irradiation fluxes of 5.1×10^{13} , 5.4×10^{14} , 3.4×10^{15} n/cm², respectively.

The work was supported by the JINR grant for young specialists № 23-202-03.

References

1. Yu. B. Gurov et al. // Instrum. Exp. Tech. 2015. V. 1. P. 22.
2. Yu. B. Gurov et al. // JINST. 2018. V. 13. P11005.

КИНЕТИКА СИГНАЛА КРЕМНИЕВОГО ДЕТЕКТОРА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ДЛИННОПРОБЕЖНЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

В. К. Еремин, Н. Н. Фадеева, Е. М. Вербицкая, И. В. Еремин, Д. Д. Митина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
Телефон: (812) 292-7953, факс: (812) 297-1017
vladimir.eremin@mail.ioffe.ru

Кремниевые планарные детекторы как универсальные сенсоры ионов широко используются для трекинга ионов, их спектрометрии и определения массы. В то же время известный эффект замедления роста электрического сигнала при регистрации тяжелых ионов, называемый плазменным эффектом, существенно ограничивает временные характеристики детекторов. В работе представлены результаты исследования формы импульсного токового

сигнала, генерируемого в кремниевом планарном детекторе при регистрации тяжелого иона, пробег которого превышает толщину чувствительной области детектора (Long-Range Heavily Particle, LRHP), и электронно-дырочная плазма образуется на всей толщине прибора. Моделирование динамики распределения электрического поля вдоль оси трека, выполненное в предположении, что трек LRHP подобен цилиндру с однородной концентрацией носителей заряда, показало, что она включает быструю и медленную стадии. Быстрая стадия длительностью ~ 100 пикосекунд связана с поляризацией трека, и ей соответствует пик тока с предельно резким фронтом. Время нарастания тока в пике определяется временем пролета LRHP через чувствительную область детектора, т.е. временем образования плазмы, что составляет единицы пикосекунд. Форма и амплитуда токового сигнала может быть описана аналитически, что важно для и обработки результатов. Медленная стадия определяет спад тока в отклике детектора и поэтому не влияет на временное разрешение. Процессы в треке тяжелого иона иллюстрируются результатами математического моделирования и согласуются с ранее опубликованными данными по наблюдению кинетики сигнала кремниевых детекторов при регистрации тяжелых ионов.

KINETICS OF THE SILICON DETECTOR SIGNAL IN REGISTERING LONG-RANGE HEAVY IONS

V. Eremin, N. Fadeeva, E. Verbitskaya, I. Eremin, D. Mitina

Ioffe Institute

194021, 26 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg

(812) 292-7953, fax: (812) 297-1017

vladimir.eremin@mail.ioffe.ru

Silicon planar detectors are widely used as universal ion sensors for ion tracking, spectrometry, and mass definition. At the same time, the well-known effect of slowing down the signal rise during the detection of heavy ions, so-called the plasma effect, significantly limits the detector timing characteristics. The paper presents the results of studying the shape of a current pulse signal generated in a silicon planar detector while registering a heavy ion whose range exceeds the thickness of the detector sensitive region (Long-Range Heavy Particles, LRHP), and electron-hole plasma arises over the entire device thickness. The simulation of the dynamics of the electric field distribution along the track axis performed with the assumption that the LRHP track is similar to a cylinder with a uniform concentration of charge carriers showed that it includes fast and slow stages. The fast stage with duration of about 100 ps is associated with the track polarization, and it corresponds to a current peak with an extremely sharp rise. The rise time of the peak current is determined by the time of LRHP traversing of the detector sensitive region, i.e. plasma formation time, which is a few picoseconds. The shape and the amplitude of the current signal can be described analytically, which is important for processing the results. The slow stage controls a current decay in the detector response and therefore does not affect time resolution. The processes in the track of heavy ions are illustrated by the results of mathematical modeling and agree with previously published data on the signal kinetics of silicon detectors in the heavy ions registration.

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ОЯТ

К. В. Ершов^{1,2}, С. Е. Белов¹

¹ АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»

²Петербургский институт ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт», 188300, Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова роща 1, Россия
Ershov.k@khlopin.ru

Настоящая работа касается разработки и апробации опытной установки (средства измерения), предназначенной для контроля гидрометаллургического передела ОЯТ с помощью неразрушающих методов анализа. В установке используются ядерно-физические методы регистрации ионизирующих излучений и математической обработки полученных сигналов.

Создана многопараметрическая система регистрации, состоящая из анализатора импульсов (на четыре входа), детекторов ионизирующего альфа-, бета-, гамма- и рентгеновского излучения, компьютера и специализированного программного обеспечения для анализа получаемых данных. Анализатор импульсов содержит четыре независимых канала регистрации: импульсы, приходящие от детекторов по каждому из каналов, анализируются по их амплитуде и времени поступления в анализатор. Программное обеспечение позволяет визуализировать и анализировать амплитудные спектры по каждому из каналов, вычислять число совпадений между любыми двумя каналами, временное окно схемы совпадений регулируемое. Из полученной совокупности данных определяется состав и удельные концентрации радионуклидов.

На настоящий момент система укомплектована двумя сцинтилляционными гамма детекторами с кристаллами *Nal(Tl)* толщиной 20мм, β -детектором на основе пластикового сцинтиллятора, сцинтилляционным рентгеновским детектором с кристаллом *Nal(Tl)* толщиной 3мм, и PIPS-детектором для регистрации α -излучения. В различных конфигурациях система может регистрировать, как α -, β -, γ - и рентгеновские спектры, так и α - γ , β - γ и γ - γ совпадения, в том числе в рентгеновской области энергий.

Как сообщалось ранее авторами в [1], система будет использоваться в составе программно-аппаратного комплекса, использующего различные методы контроля, что позволит получить более широкий набор параметров технологического контроля гидрометаллургического передела ОЯТ.

Литература

[1] Агафонова-Мороз М. С. и др. Новые комплексные системы для технологического контроля растворов при переработке ОЯТ и обращении с РАО. Тезисы конференции Радиохимия 2022.

RECORDING MULTIPARAMETRIC SYSTEM IONIZING RADIATION TO DETERMINE THE COMPOSITION OF SNF

S. E. Belov¹, K. V. Ershov^{1,2}

¹V. G. Khlopin Radium Institute
²PNPI

This work concerns the development and testing of a pilot plant (measuring instrument) designed to control the hydrometallurgical process of SNF using non-destructive analysis methods. The installation uses nuclear physics methods for recording ionizing radiation and mathematical processing of the received signals.

A multiparametric registration system has been created, consisting of a pulse analyzer (with four inputs), detectors of ionizing alpha, beta, gamma and X-ray radiation, a computer and specialized software for analyzing the received data. The pulse analyzer contains four independent recording channels: the pulses coming from the detectors on each of the channels are analyzed by their amplitude and time of arrival in the analyzer. The software allows you to visualize and analyze the

amplitude spectra for each of the channels, calculate the number of matches between any two channels, the time window of the coincidence scheme is adjustable. From the obtained data set, the composition and specific concentrations of radionuclides are determined.

At the moment, the system is equipped with two scintillation gamma detectors with a 20 mm thick NaI(Tl) crystal, a beta detector based on a plastic scintillator, a scintillation X-ray detector with a 3 mm thick NaI(Tl) crystal, and a PIPS detector for recording alpha radiation. In various configurations, the system can register both α -, β -, γ - and X-ray spectra, as well as α -, β -, and γ - γ coincidences, including in the X-ray energy region.

As previously reported by the authors in [1], the system will be used as part of a hardware and software complex using various control methods, which will allow obtaining a wider set of parameters for technological control of hydrometallurgical conversion of SNF.

References

[1] Agafonova-Moroz M. S. et al. New integrated systems for technological control of solutions during SNF processing and RW management. Abstracts of the Radiochemistry 2022 conference.

ТРАНСМУТАЦИЯ Am-241 НА СИНХРОТРОНЕ ПИЯФ

И. Е. Алексеев¹, К. В. Ершов^{1,2}

¹ АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»

²Петербургский институт ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт», 188300,

Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова роща 1, Россия

Ershov.k@khlopin.ru

В отработанном ядерном топливе (ОЯТ) содержатся десятки радионуклидов. Часть из них может быть использована после переработки топлива, часть попадает в отходы. При этом отходы, содержащие короткоживущие изотопы, представляют наибольшую опасность, но быстро распадаются, долгоживущие радиоизотопы – малоактивны. Изотоп америция Am-241, обладает периодом полураспада в 432,6 года и достаточно активен 3,5 Кюри/г. В этой работе описан эксперимент по трансмутации (превращению) Am-241 в другие элементы при облучении нейтронами различных энергий. В качестве источника нейтронов использовался синхроциклотрон ПИЯФ, где на установке ГНЕЙС нейтроны образуются в реакции спалейшн. Подробное описание нейтронного спалейшн-источника приведено в статье [1]

Ранее авторами была опубликована статья [2], где описывался эксперимент по мониторингу нейтронных потоков между контейнерами, заполненными водой и установленными под камерой ускорителя, вблизи внутренней свинцовой мишени установки ГНЕЙС. Контейнеры с водой использовались для замедления нейтронов, а между контейнерами устанавливались мониторы из нержавеющей стали. Эксперимент позволил оценить «температуру» нейтронов для различных толщин замедлителя и экспериментально определить точку максимального потока тепловых нейтронов. В данном эксперименте на подложку из нержавеющей стали был нанесен Am-241 (активность мишеней 1356-2535 Бк – 10.3–18.7 нг соответственно). Подложки из нержавеющей стали использовались в качестве мониторов потока. Для регистрации фактов трансмутации и определения потока нейтронов применялись методы альфа- и гамма-спектрометрии.

При облучении Am-241 нейтронами различных энергий возможен следующий спектр ядерных реакций [3] – см. табл. ниже.

Принимая во внимание малое время активации мишеней, разницу в сечениях ядерных реакций, в облученных образцах были обнаружены лишь характеристические альфа-линии (6069 и 6113 кэВ), сопровождающие распад ²⁴²Cm, при этом максимальное количество ²⁴²Cm, 0.0159% (в процентах от активности ²⁴¹Am) было обнаружено в мишени, где поток тепловых и эпитепловых нейтронов был максимальным.

Реакция	Энергетический порог, МэВ	Сечение, барн	Целевой продукт
n,γ	0	более 7000	$^{242}\text{Am} \rightarrow ^{242}\text{Cm}$ (83%) $^{242}\text{Am} \rightarrow ^{242}\text{Pu}$ (17%)
n,2n	6.675	менее 0.3	$^{240}\text{Am} \rightarrow ^{240}\text{Pu}$
n, ^4He	0	менее 1	$^{238}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu}$
n, $^4\text{He}+n$	0	данные отсутствуют	$^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{Pa}$
n,p	0	данные отсутствуют	$^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$
n,d	2.265	данные отсутствуют	$^{240}\text{Pu} \rightarrow ^{236}\text{U}$
n,f	0	более 50	Z = 40-63 ($^{95}\text{Zr} \dots ^{156}\text{Eu}$)

Литература

1. Shcherbakov O. A., Vorobyev A. S., Ivanov E. M., et al., *Phys. Part. Nuclei*, 2018, vol. 49, p. 81–83.
2. Alekseev I. E., Belov S. E., Ershov K. V. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics volume 86, p. 1088–1091 (2022).
3. Brookhaven National Laboratory. National Nuclear Data Center. www.nndc.bnl.gov.

NUCLEAR TRANSMUTATION OF Am-241 ON THE PNPI SYNCHROTRON

I. E. Alekseev¹, K. V. Ershov^{1,2}

¹V. G. Khlopin Radium Institute
²PNPI

Spent nuclear fuel (SNF) contains dozens of radionuclides. Some of them can be used after fuel processing, some of the end up in nuclear waste. Wastes containing short-lived isotopes pose the greatest danger, but they decay quickly, long-lived radioisotopes are inactive. The isotope americium Am-241 has a half-life of 432.6 years and is quite active 3.5 Curies/g. This paper describes an experiment on the transmutation of Am-241 into other elements when irradiated with neutrons of various energies. A synchrocyclotron of the PNPI was used as a neutron source, where neutrons are formed in the spallation reaction at the internal target. A detailed description of the neutron source on the base spallation reaction is given in the article [1]

Earlier, the authors published an article [2] describing an experiment on monitoring neutron fluxes between containers filled with water and installed under the accelerator chamber, near the internal lead target. Containers with water were used to slow down neutron, and stainless steel monitors were installed between the containers. The experiment allowed us to estimate the "temperature" of neutrons for different thicknesses of the moderator and experimentally determine the point of the maximum flow of thermal neutrons. In this experiment, Am-241 was deposited on a stainless steel substrate (activity of targets 1356-2535 Bq – 10.3–18.7 ng, respectively). Stainless steel substrates were used as fluence monitors. Alpha and gamma spectrometry methods were used to register the facts of transmutation and determine the neutron flux.

When Am-241 is irradiated with neutrons of various energies, the following spectrum of nuclear reactions is possible [3] – see Table. below.

Reaction	reaction threshold, MeV	Cross section, B	The aim producte
n,γ	0	> 7000	$^{242}\text{Am} \rightarrow ^{242}\text{Cm}$ (83%) $^{242}\text{Am} \rightarrow ^{242}\text{Pu}$ (17%)
n,2n	6.675	< 0.3	$^{240}\text{Am} \rightarrow ^{240}\text{Pu}$
n, ^4He	0	< 1	$^{238}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu}$
n, $^4\text{He}+n$	0	Data absent	$^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{Pa}$
n,p	0	Data absent	$^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$
n,d	2.265	Data absent	$^{240}\text{Pu} \rightarrow ^{236}\text{U}$
n,f	0	> 50	Z=40-63 ($^{95}\text{Zr} \dots ^{156}\text{Eu}$)

Taking into account the short activation time of the targets, the difference in the cross sections of nuclear reactions, only characteristic alpha lines (6069 and 6113 keV) accompanying the decay of ^{242}Cm were detected in the irradiated samples. The maximum amount of ^{242}Cm , 0.0159% (as a percentage of ^{241}Am activity) was detected in the target, where the flow of thermal and epithermal neutrons were the maximum.

References

- [1] Shcherbakov, O.A., Vorobyev, A.S., Ivanov, E.M., et al., *Phys. Part. Nuclei*, 2018, vol. **49**, p. 81–83
- [2] Alekseev I. E., Belov S. E., Ershov K. V. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics volume 86, p. 1088–1091 (2022)
- [3] Brookhaven National Laboratory. National Nuclear Data Center. www.nndc.bnl.gov

ФОТОАКТИВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОИЗОТОПОВ, РАСПАДАЮЩИХСЯ БЕЗ ИСПУСКАНИЯ ГАММА-КВАНТОВ, В ОБЛУЧЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ РЕАКТОРОВ

М. В. Желтоножская, Д. А. Юсюк, Ю. О. Балаба, А. П. Черняев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
* zhelton@yandex.ru, +7 (905) 579-87-83

В процессе штатной эксплуатации АЭС происходит активация нейтронами конструкционных материалов активной зоны и биологической защиты реактора. При снятии станции с эксплуатации перед осуществлением демонтажа, критически важными являются характеристика и паспортизация накопленных радиоактивных отходов в облученных конструкционных материалах АЭС. Естественный кальций в значительных количествах содержится в биологической защите реактора. В составе бетона кальций образует 55–65 % массы в зависимости от марки и типа бетона. Во время работы реактора из ^{40}Ca в результате (n, γ) реакции нарабатывается радиоизотоп ^{41}Ca с периодом полураспада 10^5 лет. Традиционно для определения активности ^{41}Ca используются радиохимические методы, однако для характеристики большой массы облученной нейтронами биологической защиты реактора осуществление работ этим способом будет крайне трудоемким и дорогостоящим.

Мы предлагаем использовать фотоактивационный подход для оценки активности ^{41}Ca в облученных бетонах биологической защиты реактора по активности ^{60}Co с периодом полураспада 5,27 лет. Для реализации предлагаемого подхода предлагается использование фотоядерной реакции $^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$. Расчетная погрешность предлагаемого метода составляет 5%. Его чувствительность составляет 0,5 Бк/г при использовании полупроводниковой гамма-спектрометрии. Предложенный подход упрощает идентификацию, контроль и сертификацию ^{41}Ca в облученных бетонах биологической защиты ядерных энергоблоков и различных типах радиоактивных отходов. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-01013).

PHOTOACTIVATION APPROACH TO DETERMINATION OF LONG-LIVED RADIOISOTOPES DECAYING WITHOUT GAMMA-QUANT EMISSION, IN REACTOR IRRADIATED STRUCTURAL MATERIALS

M. V. Zheltonozhskaya, D. A. Yusyuk, Yu. O. Balaba, A. P. Chernyaev

Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory 1, b. 2
* zhelton@yandex.ru, +7 (905) 579-87-83

During normal operation of a nuclear power plant, neutrons activate the reactor core's structural materials and the reactor biological shield. During the decommissioning of a nuclear facility, the characterization and certification of the accumulated radioactive waste in the irradiated NPP structural materials is of crucial importance. Natural calcium is present in significant amounts in the reactor's biological shield. In the composition of concrete, calcium accounts 55–65 % of the mass, depending on the brand and type of concrete. During reactor operation a ^{41}Ca radioisotope with a half-life of 10^5 years is formed from ^{40}Ca by the (n, γ) reaction. Traditionally, radiochemical methods are used to determine the activity of ^{41}Ca . However, to characterize a large mass of the neutron-irradiated biological reactor shield, carrying out work by this method will be extremely laborious and expensive.

We propose to use a photoactivation approach to assess the activity of ^{41}Ca in irradiated concretes of the reactor biological shield according to the activity of ^{60}Co with a half-life of 5.27 years. To implement the proposed approach, it is proposed to use the $^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$ photonuclear reaction. The estimated uncertainty of the proposed method is 5%. Its sensitivity is 0.5 Bq/g when using semiconductor gamma spectrometry. The proposed approach simplifies the identification, control and certification of ^{41}Ca in irradiated biological shielding concretes of nuclear power plants and various types of radioactive waste. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 22-29-01013).

УЧЁТ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В ОЦЕНКЕ СТОЙКОСТИ ЭКБ К ВОЗДЕЙСТВИЮ НЕЙТРОНОВ

A. В. Грунин, С. А. Захарова, А. Е. Здарьев

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37
otd4@expd.vniief.ru

Широкое применение высоко интегрированных изделий электронной техники в различных объектах космической и ядерной техники сделало актуальным обеспечение устойчивости аппаратуры к действию ионизирующих излучений [1], в частности, к действию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). ТЗЧ вызывают не только одиночные, но и многократные сбои в интегральных схемах с топологическими нормами менее 90 нм.

Проведен анализ и обобщение литературных данных по моделям трекообразования от ТЗЧ в полупроводниковых и диэлектрических материалах (Si, Ge, SiO₂, GaAs) и характерным размерам трека. Например, радиус сердцевины трека в Si составляет 4-5 нм, длина трека определяется пробегом ТЗЧ. Рассмотрена эволюция трека ТЗЧ в полупроводниковых структурах при локальном выделении энергии от ТЗЧ, рождаемых в результате ядерных реакций от нейтронов различного происхождения. В приближении Ми-Грюнайзена проведены оценки давления и температуры, возникающих в треках рассматриваемых ТЗЧ. Температура вещества в треке за времена порядка 10^{-12} с достигает 10^3 К, что приводит к возникновению в треке теплового давления до 10^{10} Па. Локальное выделение энергии от ТЗЧ и нагрев трека приводят к возникновению акустических волн разгрузки, которые распространяются по веществу с начальной скоростью, равной скорости звука. Возникшее в треке давление может привести к динамическому разрушению некоторых полупроводниковых материалов (например,

германия). При остывании сердцевины трека происходит аморфизация кристаллической решетки, что может уменьшить дрейфовую подвижность и время жизни носителей заряда.

Показано, что при анализе процесса возникновения однократных и многократных сбоев в интегральных схемах помимо диффузионно-дрейфовой модели кинетики неравновесных носителей необходимо учитывать гидродинамический канал разгрузки трека, обусловленный движением акустической волны разгрузки. Для объяснения возможного вклада динамического разрушения материалов при воздействии нейтронов предложено рассматривать гидродинамическую модель разгрузки треков вторичных ТЗЧ.

Список литературы

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004. 320 с.

ACCOUNT OF NUCLEAR REACTIONS IN ESTIMATION OF ECB RESISTANCE TO NEUTRON EFFECTS

A. V. Grunin., S. A. Zakharova, A. E. Zdaryev

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics», Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

Equipment hardening to ionizing radiation effect [1], in particular, to the effect of heavy charged particles (HChP) has become a topical question due to a wide application of high-integrated electronics products in different objects of space and nuclear engineering. HChP cause not only single but also multiple faults in integrated circuits with layout rules less than 90 nm.

Conducted were analysis and generalization of literature data on models of track formation from HChP in semi-conductor and dielectric materials (Si, Ge, SiO₂, GaAs) as well as characteristic track dimensions. For example, the track core radius in Si is 4-5 nm, the track length is determined by HChP range. Addressed is evolution of HChP track in semiconductor structures at local energy release from HChP, born as a result of nuclear reactions of different origin neutrons. Pressure and temperature, emerging in studied HChP tracks were evaluated in Mie-Grüneisen approximation. For times of 10⁻¹² s order the track matter temperature approaches 10³ K, what leads to occurrence of thermal pressure up to 10¹⁰ Pa in the track. HChP local energy release and track heating lead to emerging of acoustic unloading waves, which are spreading over the matter with initial velocity, equaling to sound velocity. Pressure, arising in the track, can lead to dynamic failure of some semiconductor materials (for example, germanium). When track core cooling-down, amorphization of crystal lattice occurs, what can diminish drift mobility and lifetime of a charge carrier.

It is shown, that when analyzing emergence process of single and multiple failures in integrated circuits besides diffusion-drift model of non-equilibrium carriers' kinetics, one should take into account a flow dynamics channel of track unloading, conditioned by acoustic unloading wave motion. To explain possible contribution of dynamic materials failure under neutron action, it has been suggested that the flow dynamics unloading model of secondary HChP tracks be contemplated.

References

1. Chumakov A. I. Space radiation effect on integrated circuits. – М.: Radio i Svyaz, 2004. 320 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ПЛОТНОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ПРОЦЕССОВ ЭКСТРАКЦИОННОГО АФФИНАЖА

Е. П. Зеленецкая, А. Б. Тогузбаева

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30, тел. +79059922999
e-mail: zeka@tpu.ru

Работы по замыканию ядерного топливного цикла через реакторные установки на быстрых нейтронах (БН) привели к необходимости разработки технологий экстракционного аффинажа нового поколения применимых при переработке отработанного уран-плутониевого ядерного топлива (ОЯТ).

В силу высокой активности ОЯТ с БН аппараты технологических линий экстракционного аффинажа имеют ядерно-безопасную геометрию, что снижает радиационную нагрузку на технологические растворы. Но при этом возникают существенные затруднения в управлении потоками с «микрорасходами». Подобные трудности приводят к необходимости решения проблем с поддержанием высокой степени извлечения целевых компонентов, таких как уран, плутоний и др. из технологических растворов, и обеспечением ядерной чистоты конечных химических концентратов. Обозначенные проблемы можно решить за счёт жесткого контроля концентрации целевых компонент в растворах на всех технологических этапах.

Исследования в [1] показали, что профиль концентрационного распределения по технологическому объекту не равномерен. Поэтому определение концентрации целевых компонент должно проводиться не только в «головных» аппаратах, но и на потоке. Учитывая ядерную опасность производства в основу количественного и качественного анализа необходимо заложить методы неразрушающего анализа (НРА).

Одним из наиболее информативных методов, относящихся к НРА является плотнометрия. Но, несмотря на широкое распространение, данный метод имеет собственные существенные ограничения. Наличие ограничений привело к необходимости дополнительных лабораторных и компьютерных исследований возможности применения плотнометрии для контроля технологических растворов процессов экстракционного аффинажа на потоке не только в статическом, но и в динамическом режимах.

Список литературы

1. Зеленецкая, Е. П. Модель системы управления экстракционным блоком аффинажного стенда / Е. П. Зеленецкая, А. Г. Горюнов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 9. – С. 54-58. – ISSN 2079-5920.

APPLICABILITY RESEARCH OF DENSITOMETRY TO PROCESS SOLUTIONS CONTROL OF EXTRACTION REFINING PROCESSES

E. P. Zelenetskaya, A. B. Toguzbaeva

National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue, 30, Tomsk, Tomsk region,
mob. +79059922999, e-mail: zeka@tpu.ru

The work on closing the nuclear fuel cycle through fast neutron reactor (FNR) facilities led to the need to develop new generation extraction refining technologies applicable to reprocessing of spent uranium plutonium nuclear fuel (SNF).

Due to the high activity of SNF from FNR, the apparatuses of the extraction refining process lines have a nuclear-safe geometry, which reduces the radiation load on the process solutions.

However, at the same time, there are significant difficulties in flows control with «micro-flow rates». Complexities of that nature lead to the need to solve problems, not only with maintaining a high degree of target components extraction, such as uranium, plutonium, etc. from technological solutions, but also with ensuring the nuclear purity of the final chemical concentrates. These specified problems can be solved by strictly controlling the concentration of the target components in the solutions in all technological phase.

Studies in [1] have shown that the concentration distribution profile across the process facility is not uniform. Concentrations of the target components must therefore be determined not only in the «head» apparatus, but also on the flow. Given the nuclear hazard of the production, non-destructive analysis (NDA) methods should be the basis for quantitative and qualitative analysis.

One of the most informative methods related to NDA is densitometry. Nevertheless, despite its widespread use, this method has its own significant limitations. The presence of limitations has led to the necessity of additional laboratory and computer-aided research of application possibility of densitometry to process solutions control of extraction refining processes on a flow not only in static, but also in dynamic modes.

References

1. Zelenetskaya E. P. Computer-aided model of extraction unit management system of refinery plant / E. P. Zelenetskaya, A. G. Goryunov // Scientific and Technical Volga region Bulletin. – 2019. – №9. – P. 54-58. – ISSN 2079-5920.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ИЗМЕРЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ОПОРНОМ МАТЕРИАЛЕ

С. А. Золотов, А. П. Черняев, У. А. Близнюк, Ф. Р. Студеникин, П. Ю. Борщegovская, А. Д. Никитченко, Н. А. Антипина, А. А. Николаева, Н. Д. Кречетов, С. А. Соколов

Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова, 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, +7 (495) 939-41-60, zolotov.sa15@physics.msu.ru

Сегодня дозиметрическое планирование промышленной радиационной обработки (РО) осуществляется с помощью пленочной дозиметрии, погрешность которой достигает 15 % [1]. Из-за этого данный подход может быть неприменим для планирования РО объектов, чувствительных к точности измерения глубинного распределения поглощенной дозы *PDD* [2]. Альтернативой выступает применение компьютерного моделирования для планирования РО, но данный метод критически зависит от точности знания энергетического спектра ускорителя.

В данной работе предлагается алгоритм восстановления энергетического спектра ускорителя по экспериментально измеренному *PDD* в эталонном материале. Основная идея алгоритма заключается в подборе взвешенной комбинации *PDD* от моноэнергетических электронов в эталонном материале, максимально близкой к экспериментально измеренному распределению. Для проверки алгоритма на медицинском ускорителе Varian TrueBeam с помощью ионизационных камер Semiflex 3D и Roos Chamber, обеспечивающих точность 0.5 %, были экспериментально измерены *PDD*, создаваемые электронами с энергией 6 и 9 МэВ в воде, твердой воде и алюминии. Опорные данные, необходимые для работы алгоритма, были рассчитаны с помощью компьютерного моделирования с использованием инструментария Geant4.

Верификация алгоритма проводилась путем сравнения восстановленных *PDD* в целевых материалах, рассчитанных с помощью разработанного алгоритма по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям в опорных материалах, с экспериментально измеренными распределениями в целевых материалах. Расхождение между рассчитанными и экспериментальными данными составило не более 5 %, что говорит о корректной работе алгоритма. Также алгоритм показал устойчивость решения при искусственном внесении в экспериментальные данные погрешности до 30 %.

Список литературы

1. Радиационно-чувствительные пленочные композиции для измерения поглощенных доз в диапазоне 100–1000 Гр / Тенишев В. П., Емельяненко И. А. // Стандартные образцы. 2019. Т. 15. № 3. С. 33–40. DOI 10.20915/2077-1177-2019-15-3-33-40.

RECONSTRUCTION OF ELECTRON ACCELERATOR ENERGY SPECTRUM FROM EXPERIMENTALLY MEASURED ABSORBED DOSE DISTRIBUTIONS IN BASE MATERIAL

S. A. Zolotov, A. P. Chernyaev, U. A. Bliznyuk, F. R. Studenikin, P. Yu. Borshevskaya, A. D. Nikitchenko, N. A. Antipina, A. A. Nikolaeva, N. D. Krechetov, S. A. Sokolov

M. V. Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory Moscow 119991, Russian Federation, +7 (495) 939-41-60, zolotov.sa15@physics.msu.ru

Today, industrial radiation treatment (RT) dosimetry planning is performed using film dosimetry, which has an error rate of up to 15 % [1]. Because of this, this approach may be inapplicable for planning the RT of objects sensitive to the accuracy of PDD depth distribution measurements [2]. An alternative is the application of computer simulation for RT planning, but this method critically depends on the accuracy of knowledge of the accelerator energy spectrum.

In this paper, an algorithm is proposed to reconstruct the accelerator energy spectrum from experimentally measured PDD in a reference material. The basic idea of the algorithm is to select a weighted combination of PDDs from monoenergetic electrons in the reference material that is as close as possible to the experimentally measured distribution. To test the algorithm on the Varian TrueBeam medical accelerator, PDDs generated by 6 and 9 MeV electrons in water, solid water and aluminium were experimentally measured using Semiflex 3D and Roos Chamber ionisation chambers providing 0.5 % accuracy. The reference data required for the algorithm were calculated by computer simulations using the Geant4 toolkit.

Verification of the algorithm was performed by comparing the reconstructed PDDs in the target materials calculated using the developed algorithm from experimentally measured depth dose distributions in the reference materials with experimentally measured distributions in the target materials. The discrepancy between the calculated and experimental data was not more than 5%, which indicates the correct operation of the algorithm. Also the algorithm showed stability of the solution in case of artificial inclusion of an error up to 30% in the experimental data.

References

1. Radiation-sensitive film compositions for measuring of absorbed doses in the range of 100-1000 Gy / Tenishev V.P. P., Emelianenko I. A. // Standard Samples. 2019. Т. 15. № 3. С. 33-40. DOI 10.20915/2077-1177-2019-15-3-33-40.

ДЕФЕКТЫ В YBCO-GdBCO ЛЕНТАХ, НАВЕДЕННЫЕ 18 МэВ ПРОТОНАМИ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Э. М. Ибрагимова¹, С. В. Артемов¹, О. О. Бахранов¹, Н. Э. Искандаров², Х.Т. Назаров²,
М.А. Муссаева¹, О.Т. Турсункулов², О.Р. Тожибоев¹, У.Т. Курбанов¹, Б.С. Юлдашев¹,
М.С. Новиков³, С.И. Тютюнников³

¹Институт ядерной физики, п. Улугбек, Ташкент, Узбекистан,

²Центр передовых технологий, ул. Талабалар 2а, Ташкент, Узбекистан,

³ 141980 Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области,
ул. Жолио-Кюри, д. 6
ibragimova@inp.uz

Кроме применений ВТСП кабелей в энергетике, актуально создание ВТСП магнитов для ускорителей заряженных частиц. Компанией S-Innovations, РФ, изготовлены SuperOx ленты 2-поколения (YBaCuO или GdBaCuO микрослой нанесен на сталь С276 и покрыт Ag-Cu-PbSn), которые должны пропускать ток >200 А в поле выше 10 Тесла. Для этого необходимо создать систему центров пиннинга магнитного потока либо химическим введением наночастиц оксидов металла в ВТСП, либо радиационным созданием наноразмерных дефектов анизотропной структуры. При размере Куперовской пары $\xi \sim 2$ нм, оптимальное расстояние между центрами пиннинга должно быть $\sim \lambda_L$ более двух диаметров Абрикосовских вихрей тока.

Цель эксперимента – создать упорядоченные центры пиннинга из треков быстрых протонов вдоль ВТСП-ленты, исследовать их микро-наноструктуру и магнитосопротивление ρ_m в окрестности T_c и до 300 К. Отрезки лент крепили на медной охлаждаемой мишени и облучали в вакууме пучком 18,5 МэВ протонов $\varnothing 2$ см вдоль лент под углом 7° к поверхности при токе 1–2 μ А до флюенса $(1-5) \times 10^{14}$ см⁻² 10 мин. Расчетное расстояние между треками протонов 0,2–1 μ м.

Результаты. Облучение индуцировало в ВТСП радионуклиды с β - γ -эмиссией по доминирующим ядерным реакциям $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}$, $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$, $^{138}\text{Ba}(p,2pn)^{136}\text{Cs}$, $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$ и $^{155-160}\text{Gd}(p,n)^{155-160}\text{Tb}$. На поверхности обнаружены параллельные треки протонов на расстоянии ~ 1 μ м и гребни ударных волн 5 μ м, а также концентрические и спиральные волны 10-200 μ м. Локальный элементный анализ треков подтвердил генерацию этих нуклидов. Произошло частичное разложение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} \rightarrow 0.5\text{Y}_2\text{O}_3 + 2\text{BaCuO}_2 + \text{CuO}$. До облучения пики $\rho_m(0,55 \text{ Т})$ при 140 и 300 К в YBCO и 240 и 280 К в GdBCO (химический пиннинг), а после облучения – другие пики. Несверхпроводящие фазы имеют пара-ферро-магнитную природу центров пиннинга. Локализация носителей или конденсация поляронов характеризуется минимумом подвижности носителей при 160 и 250 К. По мере распада радионуклидов намагничивание и подвижность изменяются, что подтверждает радиационный пиннинг.

DEFECTS IN YBCO-GdBCO TAPES GENERATED BY 18 MeV PROTONS FOR ENHANCING MAGNETIZATION

E. M. Ibragimova¹, S. V. Artemov¹, O. O. Bahranov¹, N. E. Iskandarov², Nazarov Kh. T.²,
M. A. Mussaeva¹, O. T. Tursunkulov, O. R. Tojiboev¹, U. T. Kurbanov¹, B. S. Yuldashev¹,
M. S. Novikov³, S. I. Tyutyunnikov³

¹Institute of nuclear physics, p. Ulugbek, Tashkent, Uzbekistan;

²Center for advanced technologies, str. Talabalar 2a, Tashkent, Uzbekistan;

³ Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia
ibragimova@inp.uz

Besides implementations of HTSC cables in power engineering, it is actual designing HTSC magnets for charged particles accelerators. Company S-Innovations, RF, produced SuperOx tapes of 2-generation (YBaCuO or GdBaCuO microlayer is deposited on steel-276 and coated with Ag-Cu-PbSn microlayers), which should pass current >200 А in H field > 10 Tesla. For such goal, it is

necessary to form a net of magnetic flux pinning centers either by chemical introducing of metal-oxide nanoparticles in HTSC or by generation of nano-size anisotropic structure defects by irradiation. Having the size of Cooper pair $\xi \sim 2$ nm, the optimal distance between pinning centers should be $\sim \lambda_L > 2$ diameters of Abrikosov current vortices.

Aim of experiment – to generate ordered pinning centers from fast proton tracks along HTSC tape, to study their micro-nanostructure and magnetoresistance R_m nearby T_c and up to 300 K. Cuts of tapes were fixed on cooled copper target in vacuum and irradiated by 18.5 MeV protons beam of $\varnothing 2$ cm across along the tapes at the angle 7° to their surface at current 1–2 μ A to achieve a fluence $(1-5) \times 10^{14}$ cm^{-2} for 10 min. The distance between proton tracks was estimated 0.2-1 μm according to radial distribution.

Results. The irradiation induced radionuclides in HTSC with β - γ -emission over dominating nuclear reactions $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}$, $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$, $^{138}\text{Ba}(p,2pn)^{136}\text{Cs}$, $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$ and $^{155-160}\text{Gd}(p,n)^{155-160}\text{Tb}$. Parallel proton tracks spaced ~ 1 μm , shock waves 5 μm , and concentric/spiral waves 10-200 μm were found on the beam exposed surface. SEM and local element analysis of the tracks confirmed generation of these radionuclides. XRD showed partial disintegration $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} \rightarrow 0.5\text{Y}_2\text{O}_3 + 2\text{BaCuO}_2 + \text{CuO}$ after irradiation. Prior irradiation peaks of $R_m(0.55 \text{ T})$ are at 140 and 300 K in YBCO, and 240 and 280 K in GdBCO (chemical pinning), but after irradiation other peaks appeared. Non-superconducting phases have para-ferro-magnetic pinning centers. Localization of charge carriers or polarons condensation is characterized by the minima of carrier mobility at 160 and 250 K. During the radionuclide decay the magnetization and carrier mobility is changing, that confirms the radiation origin of pinning.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ ПОСЛЕ ИХ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В. С. Ипатова, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщеговская, Т. А. Болотник, А. В. Браун,
И. А. Родин, А. П. Черняев, М. К. Беклемишев, Д. С. Юров, Ф. Р. Студеникин,
С. А. Золотов, А. Д. Никитченко, О. Ю. Хмелевский, Я. В. Зубрицкая,
И. Т. Межетова, В. С. Иванцова

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991, ГСП-1,
Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 2, Россия; +74959394946
Телефон: +74959394946
E-mail: ipatova.vs15@physics.msu.ru

Радиационная обработка продуктов питания используется с целью контроля микробиологической и патогенной безопасности пищевой продукции, а также для продления ее сроков годности. С практической точки зрения важным является установление технологических диапазонов доз для различных категорий продукции, которые, с одной стороны, продлевают сроки хранения продуктов, с другой стороны, не приводят к существенным изменениям в их химическом составе.

На кафедре физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ ведутся исследования по выявлению физико-химических закономерностей, происходящих в пищевых продуктах, после их радиационной обработки различными физическими, химическими и микробиологическими методами. Исследования проводятся совместно с химическим факультетом МГУ, НИИЯФ МГУ, ФГБНУ ВИЛАР, СФНЦА РАН, Сеченовским университетом и Роспотребнадзором.

Методом газовой хромато-масс-спектрометрии для ряда продуктов обнаружены и количественно оценены низкомолекулярные летучие органические соединения (спирты, альдегиды, кетоны и др.), которые в большинстве своем ответственны за специфический запах продукции, а также специфично реагируют на дозу ионизирующего излучения [1].

Разработан способ идентификации и количественной оценки структурных повреждений белковых молекул с использованием методов трипсинолиза и жидкостной хроматографии [2].

Ведется разработка спектрофотометрического метода количественной оценки содержания метгемоглобина в образцах продукции, который может быть использован как индикатор интенсивности окислительных процессов после радиационной обработки.

Исследования выполняются при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. U. A. Bliznyuk et al. Scientific reports. V. 12, № 1 (2022).
2. А. В. Браун и др. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т. 89, № 3, 14-24 (2023).

PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES IN FOODS AFTER IRRADIATION

Ipatova V. S., Bliznyuk U. A., Borshchegovskaya P. Yu., Bolotnik T. A., Braun A. V., Rodin I. A., Chernyaev A. P., Beklemishev M. K., Yurov D. S., Studenikin F. R., Zolotov S. A., Nikitchenko A. D., Khmelevsky O. Yu., Zubritskaya Ya. V., Mezhetova I. T., Ivantsova V. S.

¹ Lomonosov Moscow State University,
GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation;
Phone: +74959394946
E-mail: ipatova.vs15@physics.msu.ru

Radiation processing of food products is used to control their microbiological and pathogenic safety as well as to extend their shelf life. From a practical standpoint, it's critical to set technological dose ranges for different product categories that, on the one hand, increase shelf life while, on the other, not changes in chemical composition of foods.

Research to identify the physical and chemical patterns that appear in foods after irradiation is currently being conducted at the Department of Physics of Accelerators and Radiation Medicine of the Faculty of Physics of MSU. Research is done in collaboration with the Faculty of Chemistry, SINP MSU, FGBNU VILAR, SFNTSA RAS, Sechenov University, and Rospotrebnadzor.

Low molecular weight volatile organic compounds (alcohols, aldehydes, ketones, etc.), which are primarily responsible for the specific smell of foods and also react specifically to the dose of ionizing radiation, were found and quantified using gas chromatography-mass spectrometry for a variety of products [1].

A method for identifying and quantifying structural damage to protein molecules using trypsinolysis and liquid chromatography methods has been developed [2].

A spectrophotometric method for quantifying the content of methemoglobin in product samples is being developed, which can be used as an indicator of the intensity of oxidative processes after irradiation.

This research was funded by the Russian Science Foundation, grant number 22-63-00075.

References

1. U. A. Bliznyuk et al. Scientific reports. V. 12, № 1 (2022).
2. A. V. Braun et al. Industrial laboratory. materials diagnostics. V. 89, № 3, 14-24 (2023).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ШЕСТРАНДА НА КОМПЛЕКСЕ ФКБН-3 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНОСТИ РАЗМНОЖАЮЩИХ СИСТЕМ

А. А. Кайгородов, Э. А. Гуменных, С. П. Котков, С. В. Финогеев

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г.Саров, пр. Мира 37
otd4@expd.vniief.ru

При проведении работ на комплексе ФКБН-3 [1] наиболее многочисленными и опасными с точки зрения ядерной безопасности являются операции по сборке критических систем различного состава, которые, как правило, производятся вручную. Поэтому методики измерения реактивности должны обеспечивать контроль за подкритичностью размножающих систем (РС) непосредственно в процессе набора критической массы. Такой контроль позволяют осуществлять методы Шестранда, «стреляющего» источника и обратного умножения [2]. В экспериментах на комплексе широко используются сборки с составными активными зонами (АЗ) из разных делящихся материалов, поэтому в определении степени подкритичности такихборок предпочтительней использовать метод Шестранда или импульсный метод, не требующий знания параметров запаздывающих нейтронов.

В основу метода Шестранда положено измерение интегралов от быстрой части спада плотности нейтронов утечки из РС после короткого импульса (последовательности коротких импульсов) от внешнего нейтронного генератора и медленной части, обусловленной размножением запаздывающих нейтронов. Отношение интегралов является искомой величиной реактивности в единицах $\beta_{эф}$. Длительность импульса должна быть много меньше характерного времени спада плотности мгновенных нейтронов, а частота их следования такой, чтобы переходной процесс закончился до поступления следующего импульса.

Выражение для определения реактивности в общем случае имеет вид [3]:

$$-\rho/\beta_{эф} = (N_p - M)/N_d, \quad (1)$$

где N_p и N_d – число отсчетов нейтронного детектора в быстрой и запаздывающей частях спада плотности нейтронов после начала действия импульсного источника, M – число отсчетов детектора, обусловленных регистрацией прямопролетных нейтронов источника (нейтронов, которые не испытывают взаимодействия с РС на пути от источника к детектору).

Апробация метода Шестранда проведена на РС с АЗ из урана и плутония без отражателя. Проведенные исследования позволили аттестовать методику измерения реактивности $\rho/\beta_{эф}$ в диапазоне от глубоких подкритичностей: минус $30 \beta_{эф}$ до околоскритического состояния РС: минус $1 \beta_{эф}$, что является новым достижением в практике измерений на комплексе ФКБН-3.

Список литературы

1. Панин А. В., Воронцов С. В., Девяткин А. А., Завьялов Н. В., Кувшинов М. И. История развития критмассовых экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ. // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой научной конференции. Т. 1. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 196–210.
2. Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Экспериментальные методы физики реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 272с.
3. Измерение реактивности быстрых реакторов методом площадей. П. Ф. Чередник, И. З. Сибгатуллин, М. И. Кувшинов. // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1978. Вып. 2. С. 46–52.

SJÖSTRAND METHOD APPLICATION ON COMPLEX FKBN-3 FOR MEASURING MULTIPLYING SYSTEMS' REACTIVITY

A. A. Kaigorodov, Eh. A. Gumennykh, S. P. Kotkov, S. V. Finogeev

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics», Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave, 37
otd4@expd.vniief.ru

When working on complex FKBN-3 [1] from the point of view of nuclear safety the most multiple and dangerous are operations on assembly of critical systems of different composition, which, as a rule, are manufactured manually. That is why reactivity measurement techniques must provide control over multiplying system subcriticalities (MS) directly during critical mass gain. Such a control allows fulfilling of methods of *Sjöstrand*, «shooting» source and backward multiplication [2]. Assemblies with composite cores made of different fissile materials are widely applied in the complex's experiments, that is why when determining a degree of such assembly subcriticalities it is more preferable to use *Sjöstrand* method or a pulse method, not requiring knowledge of delayed neutron parameters.

A basis for *Sjöstrand* method is measuring of integrals of a fast part of leakage neutron density decay from MS after short pulse (sharp pulse train) from an external neutron generator and those of a slow part, conditioned by multiplication of delayed neutrons. An integral relation is a reactivity sought quantity in units of β_{ef} . A pulse length must be much smaller than characteristic prompt neutron decay time, and their repetition rate - such that a transient process should have finished, before the next pulse comes.

Expression for reactivity determination in the common case has a view [3]:

$$-\rho/\beta_{ef} = (N_p - M)/N_d, \quad (1)$$

where N_p and N_d – a number of neutron detector counts in fast and delayed parts of neutron density decay after the pulsed source starts operating, M – a number of detector counts, conditioned by registering of source straight flight neutrons (neutrons, which do not interact with MS on the way from the source to the detector).

The *Sjöstrand* method is approved on MS with a core made of uranium and plutonium with no reflector. Conducted studies have allowed certification of reactivity measurement procedure ρ/β_{eff} in the range starting from deep subcriticalities: minus 30 β_{ef} up to near-critical state MS: minus 1 β_{ef} , what is a new progress in measurement practice on complex FKBN-3.

References

1. Panin A. V., Vorontsov S. V., Devyatkin A. A., Zavyalov N. V., Kuvshinov M. I. Development history of critmass experiments in RFNC-VNIIEF. // Pulsed reactors: development history and application prospects. Inter-Branch Scientific Conference Proceedings. Vol. 1. – Sarov: RFNC-VNIIEF, 2015. P. 196–210.
2. Kazanskii Yu. A., Matusevich Ye. S. Experimental methods of reactor physics. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 272p.
3. Fast reactors' reactivity measurement by an area method. P. F. Cherednik, I. Z. Sibgatullin, M. I. Kuvshinov // VANT. Ser. Pulsed reactors and simple critical assemblies. 1978. Issue 2. P. 46–52.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В. Ф. Батяев, С. Г. Беличенко, М. Д. Каретников, А. Д. Мазницин, А. Ю. Пресняков

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова»
Россия, 101000, Москва, Моспочтамт, а/я 918, +7(495) 730-1282, доб. 4-86
MDKaretnikov@vniia.ru

Наносекундный метод меченых нейтронов (ММН) основан на пространственно-временном анализе событий, возникающих при движении 14 МэВ нейтрона, время вылета, энергия и направление движения которого известны за счет регистрации сопутствующей

нейтрону альфа-частицы. Появление интенсивного генератора меченых нейтронов с альфа-детектором ИНГ-27, разработанного во ФГУП ВНИИА, привело к существенному расширению области применения меченых нейтронов. В настоящее время ММН находит применение для нейтронного анализа состава вещества, а также является удобным инструментом для прикладных и фундаментальных ядерно-физических исследований. Этому способствуют следующие особенности:

- измерение нейтронного потока с абсолютной погрешностью менее 5 % и относительной менее 1% в широком диапазоне потока нейтронного генератора;
- измерение угла вылета 14 МэВ нейтронов с погрешностью до 0,02 рад и пространственных координат места взаимодействия меченых нейтронов с ядрами вещества;
- высокое отношение эффект/фон за счет пространственно-временной дискриминация событий, обусловленных взаимодействием с веществом «немеченых» нейтронов и вторичного излучения;
- возможность калибровки гамма-детекторов непосредственно в экспериментах с помощью специальных объектов-калибраторов при прохождении в которых меченых нейтронов испускаются гамма-линии, которые легко интерпретируются на спектре ММН (альфа-гамма совпадений), а также с помощью эталонных радиоизотопов по спектру без совпадений с минимально значимым присутствием пиков от этих радиоизотопов на спектре ММН.

В работе рассмотрены примеры использования ММН для некоторых актуальных задач:

- определение отклика гамма-детекторов при воздействии 14 МэВ нейтронов;
- измерение угловой анизотропии выхода гамма-квантов и эффекта Доплера при неупругом рассеянии нейтронов.

Приводится описание устройств с мечеными нейтронами, особенности проведения и результаты экспериментов. Полученные данные находятся в хорошем соответствии с расчетами и экспериментальными результатами других авторов.

APPLICATION OF TAGGED NEUTRON TECHNOLOGY FOR APPLIED AND FUNDAMENTAL NUCLEAR PROBLEMS

V. F. Batyaev, S. G. Belichenko, M. D. Karetnikov, A. D. Maznitsyn, A. Ju. Presnyakov

FSUE All-Russian Scientific Research Institute of Automation, Moscow,
101000 Russia, Moscow P.O. 918, +7(495) 730-1282, ext. 4-86
MDKaretnikov@vniia.ru

A nanosecond tagged neutron technology (NTNT) is based on the space-time analysis of events produced by the 14 MeV neutron which time of escape, energy, and direction of movement is known by the recording of the accompanying alpha-particle. The development by FSUE VNIIA of the high-intensity generator of tagged neutrons promoted the extension of the applications of tagged neutrons. Currently, the NTNT is used for the neutron activation analysis as well as for applied and fundamental nuclear problems due to the following advancements:

- Measuring the neutron flux with the absolute inaccuracy less than 5 % and relative inaccuracy less than 1 % in the high range of neutron generator intensity.
- Directional reading of the angle of the tagged neutron escape with the accuracy up to 0.02 rad, and measuring the coordinates of nuclear reactions stipulated by tagged neutrons.
- High effect/background ratio provided by the space-time discrimination of events stipulated by interaction of “untagged” neutrons and secondary radiation with the matter.
- Possibility of gamma-detector calibration while measurement by special object-calibrators when tagged neutrons are passing through them, the emitted gamma-lines can be easily interpreted on the TNT spectrum (alpha-gamma coincidences);
- Possibility of gamma-detector calibration while measurement by reference isotope sources, the gamma-lines can be defined by the gamma-spectrum without coincidences and they practically do not affect the TNT spectrum.

The several applications of NTNT are considered in the report:

- Determination of gamma-detectors response to 14 MeV neutrons.
- Measuring the angle distribution and Doppler effect of gamma-rays emitted at the inelastic neutron scattering.

The experimental technique and results are considered. The obtained data are in a good agreement with the numerical calculations and experimental data by other authors.

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ПУЧКОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРНОЙ ЧАСТИ СТАНЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБЛУЧЕНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ ПУЧКАМИ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

**О. А. Васильев, Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, А. А. Курганов,
А. Д. Панов, Д. М. Подорожный, А. Н. Турундаевский**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 2.
Телефон: +7(495)939-18-18, Факс: +7(495)939-08-96
press@sinp.msu.ru

В данной работе представлены результаты обработки банка данных, полученного в ходе первых пучковых испытаний прототипа ДЧС на выведенном пучке ускорителя НУКЛОТРОН 7-8 декабря 2022 г. В ходе сеанса был определен рабочий режим установки, и было набрано более 2 млн. событий, пригодных для обработки. Анализ амплитудных распределений и траекторный анализ позволяют оценить технические характеристики прототипа, предварительно проверить работу методик, разработанных для облучения микросхем, и определить направление работ по разработке опытного образца ДЧС.

FINAL RESULTS OF THE FIRST BEAM TEST OF THE DETECTOR PART OF THE STATION FOR INVESTIGATION AND IRRADIATION OF SEMICONDUCTOR MICRO- AND NANOELECTRONICS USING HIGH ENERGY ION BEAMS

**O. A. Vasiliev, D. E. Karmanov, I. M. Kovalev, A. A. Kurganov, A. D. Panov,
D. M. Podorozhnyy, A. N. Turundaevskiy**

This paper presents the results of processing the databank obtained during the first beam tests of the DPS prototype on the extracted beam of the NUCLOTRON accelerator on December 7-8, 2022. During the session, the operating mode of the prototype was determined, and more than 2 million events were collected for processing. The analysis of amplitude distributions and trajectory analysis make it possible to evaluate the technical characteristics of the prototype, to preliminarily check the operation of the methods developed for irradiating microcircuits, and to determine the direction of work on the development of the DPS preproduction model.

МОДЕЛЬ ПОЛЯ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВБЛИЗИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ НА ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ВИР-2М

**В. А. Кузнецов, С. И. Козырева, Р. О. Банин, Н. Г. Данченко,
А. В. Силаев, А. А. Кубасов, С. О. Табаков**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира 37
otd4@expd.vniief.ru

Предложен расчетно-экспериментальный способ определения параметров поля гамма-нейтронного излучения реактора ВИР-2М вблизи крупногабаритных объектов в развитие подхода, изложенного в [1]. Способ основан на проведении расчетов характеристик поля методом Монте-Карло для системы «источник излучения – объект испытаний» с коррекцией параметров модели объекта испытаний по результатам измерений функционалов поля гамма-нейтронного излучения.

Практическое применение данной модели позволяет проводить количественные оценки влияния крупногабаритного объекта на равномерность поля излучения вблизи его поверхности. По результатам расчетов и анализа экспериментальных данных определена зависимость неравномерности поля гамма-нейтронного излучения ядерного реактора ВИР-2М вблизи поверхности объектов испытаний от их габаритно-массовых характеристик.

Список литературы

1. Кузнецов В. А., Силаев А. В., Козырева С. И., Бартев Н. О., Жирнов А. В., Тесаловский Н. А., Пичугин А. М., Кожевников К. В. Расчетно-экспериментальная оценка распределения поглощённой дозы в объекте при проведении испытаний на исследовательском ядерном реакторе БИГР // ВАИТ Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2022 № 3, С. 38-43.

MODEL OF GAMMA-NEUTRON RADIATION FIELD NEAR LARGE-SCALE OBJECTS UNDER TEST ON VIR-2M NUCLEAR REACTOR

**V. A. Kuznetsov, S. I. Kozyreva, R. O. Banin, N. G. Danchenko, A. V. Silaev,
A. A. Kubasov, S. O. Tabakov**

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics» Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

Here is proposed an experiment-calculated method for determining parameters of a gamma-neutron radiation field of VIR-2M reactor near large-scale objects in development of approach, presented in [1]. The method is based on performance of field characteristic calculations by Monte-Carlo method for system «radiation source – test object» with corrected parameters of object under test model by the results of measurements of field functionals of gamma-neutron radiation.

Practical application of the given model allows performance of quantitative assessments of large-scale object effect on radiation field uniformity near its surface. As a result of experimental data calculations and analysis, determined was a dependence of field inhomogeneity of gamma-neutron radiation of VIR-2M nuclear reactor near the test objects' surface on their overall–mass characteristics.

References

1. Kuznetsov V. A., Silaev A. V., Kozyreva S. I., Bartev N. O., Zhirnov A. V., Tesalovskii N. A., Pichugin A. M., Kozhevnikov K. V. Experiment-calculated estimate of absorbed dose distribution in the object under test on BИGR research nuclear reactor // VANT. Physics of radiation effect on electronic radio equipment, 2022 № 3, P. 38-43.

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ДОЧЕРНИХ ПРОДУКТОВ РАСПАДА РАДОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

В. Н. Кононов, Г. А. Игнатьева, К. А. Петрова, С. Н. Мамаева

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный государственный университет имени М. К. Аммосова», 677000, г. Якутск, ул. Кулаковского, 48, ауд. 118, +79143009258, vladlenkononov@mail.ru

Ранее авторами был разработан и апробирован метод определения объемной активности (ОА) ^{222}Rn в водных средах методами жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии (ЖСС) [1]. В данной работе представляется метод измерения ОА ^{222}Rn с применением гамма-спектрометрии с полупроводниковым детектором (ППД) водного раствора тех же образцов, рассмотренных методом ЖСС. Т.е. для определения ОА ^{222}Rn были подготовлены образцы горных пород с ^{226}Ra , которые настаивались в герметичном сосуде с водой в течение длительного промежутка времени, достаточного для достижения векового равновесия ^{226}Ra и ^{222}Rn . Из подготовленной пробы были отобраны 2 образца объемами 100 и 10 мл, которые одновременно измерялись методами ППД и ЖСС, соответственно. Полученные результаты отражены в таблице.

	GEM-40 (ППД)		Hidex SL-300 (ЖСС)
Радионуклид	Rn-222 (Pb-214)	Rn-222 (Bi-214)	Rn-222
ОА, Бк/л	739,37± 48,8	727,21 ± 49,45	712,56±43,47

ОА ^{222}Rn на ППД определяется по дочерним продуктам распада (ДПР) – ^{214}Pb , ^{214}Bi . Как видно из таблицы, ОА ^{214}Pb и ^{214}Bi равны (в пределах погрешностей), т. е. для рассматриваемого случая соблюдается вековое равновесие.

Результаты, полученные на гамма-спектрометре, совпадают с данными, полученными методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии. Исходя из этого можно утверждать, что эксперименты по определению значения объемной активности ^{222}Rn и его концентрации в пробах воды можно выполнять с применением гамма-спектрометрии с полупроводниковым детектором.

Список литературы

1. LXXII Международная конференция «ЯДРО-2022: Фундаментальные вопросы и приложения» (Москва, 11–16 июля 2022): Сборник тезисов / Под. ред. К. А. Стопани, Н. С. Зеленской. – Саратов: Амирит, 2022. С. 388.

STUDY OF ACTIVITY OF RADON DECAY DAUGHTER PRODUCTS USING SEMICONDUCTOR GAMMA SPECTROMETRY

V. N. Kononov, G. A. Ignateva, K. A. Petrova, S. N. Mamaeva

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "M. K. Ammosov North-Eastern Federal University", 48 Kulakovsky str. Yakutsk, 677000, +79143009258, vladlenkononov@mail.ru

Previously, the authors developed and tested a method for determining the volumetric activity (VA) of ^{222}Rn in aqueous media by liquid scintillation spectrometry (LSS) [1]. This paper presents the method of measuring VA of ^{222}Rn using gamma spectrometry with a semiconductor detector (SCD) of an aqueous solution of the same samples considered by the LSS method. That is, to determine the VA of ^{222}Rn , rock samples with ^{226}Ra were prepared, which were infused in a sealed vessel with water for a long period of time sufficient to achieve an age-old equilibrium of ^{226}Ra and ^{222}Rn . From the prepared sample, two samples were taken in volumes of 100 and 10 mL, then simultaneously measured on SCD and LSS. The results obtained are shown in the table.

	GEM-40 (SCD)		Hidex SL-300 (LSS)
Radionuclide	Rn-222 (Pb-214)	Rn-222 (Bi-214)	Rn-222
VA, Bq/L	739,37± 48,8	727,21 ± 49,45	712,56±43,47

VA of ^{222}Rn on SCD is determined by the decay daughter products - ^{214}Pb , ^{214}Bi . Obviously, VA of ^{214}Pb and ^{214}Bi are equal (within errors), i.e. an age-old equilibrium is maintained for the case in question.

The results obtained on the gamma spectrometer coincide with the data obtained by liquid scintillation spectrometry. Based on this, it can be argued that experiments to determine the value of VA of ^{222}Rn and its concentration in water samples can be carried out using liquid scintillation spectrometry, because the reliability of the results is shown by data obtained by SCD gamma spectrometry.

References

1. LXXII International conference “NUCLEUS-2022: Fundamental problems and applications” (Moscow, July 11–16, 2022): Book of abstracts / Ed. by K. A. Stopani and N. S. Zelenskaya. Saratov: Amirit, 2022. 388 p.

ПРОЦЕССЫ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЯДЕР ДЛЯ ТОЧЕЧНОГО РЕАКТОРА В РАМКАХ МОДЕЛИ РОЖДЕНИЯ И ГИБЕЛИ ЧАСТИЦ

Т. Н. Корбут, С. В. Рыбчак

Государственное научное учреждение

«Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»

223063, Республика Беларусь, Минская обл., Минский р-н, Луговослободской с/с, 47/22,
р-н д. Прилесье, лабораторно-технический корпус, т. +375-29-365-80-17

E-mail: rybchak@sosny.bas-net.by

Теория Марковских ветвящихся процессов часто используется для моделирования процессов, связанных с рассеянием потока нейтронов в активной зоне реактора. Эта теория позволяет описать вероятность поглощения и эмиссии нейтронов, а также вероятность превращения ядер.

Авторами в ранних работах была предложена модель рождения и гибели частиц для описания процесса размножения нейтронов в делящейся среде [1]. Полученный аппарат использовался для получения основных нейтронно-физических характеристик для теплового реактора. Результаты были апробированы для результатов экспериментов на ряде сборок: Ялина-тепловая, KUCA, MASURCA и KURPI [2, 3].

В настоящей работе в рамках модели рождения и гибели частиц описан математический аппарат для описания физического процесса превращения ядер за счет реакций деления и захвата нейтрона в приближении точечного реактора. С помощью модели рождения и гибели определены основные характеристики, связанные с числом делений, такие как энерговыделение и активность продуктов деления.

Список литературы

1. Korbut T. N., Kuz'min A. V. & Rudak, E.A. A thermal nuclear reactor as an analog of ADS systems with internal sources of neutrons. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 79, 461–469 (2015).

2. Korbut, T.N. and et al. Neutron and Neutron-Breeding Medium Interaction Process Description Within the Physical Birth-and-Death Model. Nonlinear Phenomena in Complex Systems, vol.23, no.4(2020), pp.428-434.

3. Korbut T. N., Zubareva M. V. Calculating the Neutronics of a Yalina-Thermal Subcritical Assembly Using the Physical Birth-and-Death Model. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 86, 1115–1118 (2022).

NUCLEAR TRANSFORMATION PROCESSES FOR A POINT REACTOR IN THE FRAMEWORK OF THE PARTICLE BIRTH AND DEATH MODEL

T. N. Korbut, S. V. Rybchak

State scientific institution «Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny»
223063, Republic of Belarus, Minsk region, Minsk district, Lugovoslobodskoy s/s, 47/22,
district of the village of Prilesie, laboratory and technical building, t. +375-29-365-80-17
E-mail: rybchak@sosny.bas-net.by

The theory of Markov branching processes is often used to model the processes associated with neutron flux scattering in the reactor core. This theory makes it possible to describe the probability of absorption and emission of neutrons, as well as the probability of nuclear transformation.

In early works, the authors proposed a model for the birth and death of particles to describe the process of neutron multiplication in a fissile medium [1]. The resulting apparatus was used to obtain the main neutron-physical characteristics for a thermal reactor. The results were tested for the results of experiments on a number of assemblies: Yalina-thermal, KUCA, MASURCA and KURPI [2, 3].

In the present work, within the framework of the particle creation and death model, a mathematical apparatus is described for describing the physical process of nuclear transformation due to fission and neutron capture reactions in the approximation of a point reactor. Using the birth death model, the main characteristics associated with the number of fissions, such as energy release and activity of fission products, are determined.

References

1. Korbut T. N., Kuz'min A.V . & Rudak E. A. A thermal nuclear reactor as an analog of ADS systems with internal sources of neutrons. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 79, 461–469 (2015).
2. Korbut T. N. and et al. Neutron and Neutron-Breeding Medium Interaction Process Description Within the Physical Birth-and-Death Model. Nonlinear Phenomena in Complex Systems, vol. 23, no.4(2020), pp.428-434.
3. Korbut T. N., Zubareva M. V. Calculating the Neutronics of a Yalina-Thermal Subcritical Assembly Using the Physical Birth-and-Death Model. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 86, 1115–1118 (2022).

УЧЕТ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА В МОДЕЛИ РОЖДЕНИЯ И ГИБЕЛИ ЧАСТИЦ

Т. Н. Корбут, С. В. Рыбчак

Государственное научное учреждение
«Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»
223063, Республика Беларусь, Минская обл., Минский р-н, Луговослободской с/с, 47/22,
р-н д. Прилесье, лабораторно-технический корпус, т. +375-29-365-80-17
E-mail: rybchak@sosny.bas-net.by

В работе представлен подход для описания размножения нейтронов и превращения ядер в активной зоне реактора в теории ветвящихся процессов. Физический процесс, состоящий из отдельных взаимодействий нейтронов и ядер, приводит к делению с испусканием нейтронов. В теории ветвящихся процессов размножение нейтронов описывается исходя из независимости эволюции нейтронов и ядер. Процесс размножения нейтронов можно считать независимым, если концентрация нейтронов значительно выше концентрации делящихся ядер и изменением концентрации нейтронов можно пренебречь. В других случаях рассматривается процесс с учетом двух типов частиц, и расчет становится намного сложнее. В настоящей работе предложен альтернативный подход – в рамках модели рождения и гибели частиц, испускаемых при делении нейтронов, рассматриваются как внутренний источник. Представлены результаты оценки выгорания топлива для реакторов типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

ACCOUNT FOR FUEL BURNUP IN A MODEL OF THE BIRTH AND DEATH OF PARTICLES

T.N. Korbut, S.V. Rybchak

State scientific institution «Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny»
223063, Republic of Belarus, Minsk region, Minsk district, Lugovoslobodskoy s/s, 47/22,
district of the village of Prilesie, laboratory and technical building, t. +375-29-365-80-17
E-mail: rybchak@sosny.bas-net.by

The paper presents an approach for describing neutron multiplication and nuclear transformation in the reactor core in the theory of branching processes. The physical process, consisting of separate interactions of neutrons and nuclei, leads to fission with the emission of neutrons. In the theory of branching processes, neutron multiplication is described based on the independence of the evolution of neutrons and nuclei. The process of neutron multiplication can be considered independent if the neutron concentration is much higher than the concentration of fissile nuclei and the change in the neutron concentration can be neglected. In other cases, the process is considered taking into account two types of particles and the calculation becomes much more complicated. In the present work, an alternative approach is proposed: in the framework of the model of the birth and death of particles emitted during neutron fission, they are considered as an internal source. The results of fuel burnup evaluation for VVER-1000 and VVER-1200 reactors are presented.

РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Д. Е. Костомаха, В. М. Вахтель, П. В. Середин

ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет,
394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, Россия,
E-mail: danilkostomaha@gmail.com

Нитрид галлиевые (Далее – GaN) структуры давно стали интересовать как исследователей, так и исполнителей полупроводниковых приборов. Гетероструктуры на основе GaN обеспечивают электронным приборам на их основе оптические, мощностные и частотные характеристики, позволяющие применять их в разных областях полупроводниковой электроники. Так же GaN структуры показали, что они более стойкие к воздействию ионизирующего и нейтронного излучения, в отличие от структур на основе кремния. В данной работе проводится исследование следующих образцов, представленных в таблице.

№	Подложка	Буферный слой	Основной слой	T °C, осаждения	Толщина h
1	Al ₂ O ₃	AlN – h~150 nm	GaN	1050	~ 5 mkm
2	Al ₂ O ₃ (11-20), Al ₂ O ₃ (10-12)	AlN – h~300 nm	GaN	1034	~3 -5 mkm
3	SiC/Si (111)-4 ⁰	-	AlGaIn	1033	~ 6 mkm
4	AlN/Si(111)	-	AlGaIn	1033	~ 6 mkm
5	AlGaIn/ Al ₂ O ₃ (11-20)	-	AlN	982	~ 5 mkm
6	Al ₂ O ₃	AlN/AlGaIn – h~2 mkm	GaN	987	~ 1 mkm
7	Al ₂ O ₃ (11-20)	AlN – h~200 nm	AlGaIn	1036	~5 mkm
8	Al ₂ O ₃ (11-20) Al ₂ O ₃ (10-12)	AlN – h~200 nm	GaN	1034	~ 4 mkm

Проведение испытаний электронных изделий необходимо для контроля их качества, так и для прогнозирования надежности. Как показывают эксперименты с разными видами излучения, GaN структуры могут работать в более тяжелых условиях (ссылки). Задача данной работы – это увидеть фундаментальные закономерности изменений в эпитаксиальных структурах GaN под воздействием тяжелых заряженных частиц и протонов, влияние больших доз облучения рентгеновским и гамма-излучением, так же это влияние потоков нейтронного облучения.

Первый этап: проведение нейтронного облучения образцов, получение вольтамперных характеристик (ВАХ) и зависимости ЭДС Холла в полупроводниках от концентрации и подвижности носителей заряда.

Второй этап: облучение образцов тяжелыми заряженными частицами, получение ВАХ и зависимости ЭДС Холла в полупроводниках от концентрации и подвижности носителей заряда, структурный анализ.

Третий этап: облучение образцов рентгеновским, гамма – излучением, получение ВАХ характеристик и зависимости ЭДС Холла в полупроводниках от концентрации и подвижности носителей заряда, получение зависимости времени релаксации от поглощенной дозы.

Список литературы

1. Hazdra P., et al., Phys. Status Solodi A 1-8 (2016)
2. S. J. Pearton et al 2016 ECS J. Solid State Sci. Technol. 5 Q35

RADIATION EFFECT ON THE CHARACTERISTICS OF EPITAXIAL STRUCTURES BASED ON GALLIUM NITRIDE

Kostomaha D. E., Vakhtel V. M., Seredin P. V.

Voronezh State University, 394018, Voronezh, University square, 1, Russia,
E-mail: danilkostomaha@gmail.com

Gallium nitride (GaN) structures have long been of interest to both researchers and users of semiconductor devices. Heterostructures based on GaN provide electronic devices based on them with optical, power and frequency characteristics that allow them to be used in various fields of semiconductor electronics. GaN structures have also shown to be more resistant to ionizing and neutron radiation, unlike silicon-based structures (Si). In this study, the following specimens are considered, presented in table.

№	Back	Buffer layer	Main layer	Refrigeration temperature, °C	Thickness h
1	Al ₂ O ₃	AlN – h~150 nm	GaN	1050	~ 5 mkm
2	Al ₂ O ₃ (11-20), Al ₂ O ₃ (10-12)	AlN – h~300 nm	GaN	1034	~3 -5 mkm
3	SiC/Si (111) -4 ⁰	-	AlGaN	1033	~ 6 mkm
4	AlN/Si(111)	-	AlGaN	1033	~ 6 mkm
5	AlGaN/ Al ₂ O ₃ (11-20)	-	AlN	982	~ 5 mkm
6	Al ₂ O ₃	AlN/AlGaN – h~2 mkm	GaN	987	~ 1 mkm
7	Al ₂ O ₃ (11-20)	AlN – h~200 nm	AlGaN	1036	~5 mkm
8	Al ₂ O ₃ (11-20) Al ₂ O ₃ (10-12)	AlN – h~200 nm	GaN	1034	~ 4 mkm

Testing of electronic equipment products is necessary to control their quality and to predict reliability. As experiments with different types of radiation show, that GaN structures can work under more severe conditions (references). The objective of this work is to see the fundamental patterns of changes in the epitaxial structures of GaN, to study the formation of defects and their nature, to study

the effects of heavy charged particles, the effect of high doses of X-ray and gamma radiation, to consider the change in structures after irradiation with neutrons and protons.

The first stage: conducting neutron irradiation of specimens, obtaining the VAC characteristics and the dependence of the Hall EMF in semiconductors on the concentration and mobility of charge carriers.

The second stage: irradiation of samples with heavy charged particles, obtaining the VAC characteristics and the dependence of the Hall EMF in semiconductors on the concentration and mobility of charge carriers, structural analysis.

The third stage: irradiation of samples with X-ray, gamma radiation, obtaining the VAC characteristics and the dependence of the EMF Hall in semiconductors on the concentration and mobility of charge carriers, obtaining the dependence of the relaxation time from the absorbed dose.

References

1. Hazdra P., et al., Phys. Status Solodi A 1-8 (2016).
2. S. J. Pearton et al 2016 ECS J. Solid State Sci. Technol. 5 Q35.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ, МАГНИТНУЮ СТРУКТУРУ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

О. Н. Лис*, Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, И. Ю. Зель

141980 Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области,
ул. Жолио-Кюри, д. 6 +79656061008 *e-mail: olis@jinr.ru

Ван-дер-ваальсовы соединения в настоящее время являются одними из самых интересных объектов исследования в области физики конденсированного состояния за счёт недавно открытых магнитных свойств в их двумерных формах. Особенности структуры приводят к значительной чувствительности физических свойств в этих соединениях к внешним воздействиям, которые могут вызвать множество необычных явлений: зарядовое, орбитальное и спиновое упорядочения, сверхпроводимость, различные фазовые переходы, также важные для разработки широкого спектра спинтронных устройств.

Воздействие высокого давления является прямым методом контролируемого изменения магнитных взаимодействий за счет вариации межатомных расстояний и углов. Проведение исследований при высоких давлениях дает уникальную возможность изучения взаимосвязи изменений структурных параметров и магнитной структуры, что необходимо для понимания природы и механизмов физических явлений, наблюдаемых в исследуемых объектах.

Настоящая работа посвящена исследованию кристаллической, магнитной структуры CrBr_3 и Fe_3GeTe_2 в широких диапазонах температур и давлений с помощью нейтронной дифракции на дифрактометре ДН-6 реактора ИБР-2 (ЛНФ, ОИЯИ, Дубна, Россия). Было обнаружено отрицательное тепловое объемное расширение в CrBr_3 ниже $T_C = 37$ К, связанное со спин-решеточной связью. Воздействие высокого давления приводит к подавлению магнитного упорядочения, и переход из исходного ФМ-состояния ожидается при $P \sim 8,4$ ГПа. Наши результаты также демонстрируют изоструктурный фазовый переход в ферромагнетике CrBr_3 (2,5 - 7 ГПа). Также аномалии в поведении частот колебательных мод, обнаруженные при $P \sim 15$ ГПа, указывают на другое фазовое превращение, предположительно связанное с процессом металлизации. Исследования Fe_3GeTe_2 при высоких давлениях также позволили выявить изоструктурный переход при $P \sim 7$ ГПа. Наблюдаемое аномальное поведение параметров элементарной ячейки, межатомных расстояний и углов, и колебательных мод могут свидетельствовать о конкурирующем характере внутрислойных (ab) и внеплоскостных (вдоль c) взаимодействий.

HIGH PRESSURE EFFECT ON CRYSTAL, MAGNETIC STRUCTURE AND VIBRATIONAL SPECTRA OF VAN DER WAALS COMPOUNDS

O. N. Lis*, D. P. Kozlenko, S. E. Kichanov, E. V. Lukin, I. Yu. Zel

Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia
+79656061008 *e-mail: olis@jinr.ru

Van der Waals compounds are currently one of the most interesting objects of research in the field of condensed matter physics due to the recently discovered magnetic properties in their two-dimensional forms. The structural features lead to a significant sensitivity of the physical properties in these compounds to external influences, which can cause many unusual phenomena: charge, orbital and spin ordering, superconductivity, various phase transitions, also important for the development of a wide range of spintronic devices.

High pressure investigation is a direct method of controlled change in magnetic interactions due to variations in interatomic distances and angles. Investigations at high pressures provides a unique opportunity to study the relationship between changes in structural parameters and magnetic structure, which is necessary to understand the nature and mechanisms of physical phenomena observed in the objects under study.

This work is devoted to the study of the crystal and magnetic structure of CrBr_3 and Fe_3GeTe_2 in wide temperature and pressure ranges using neutron diffraction at DN-6 diffractometer of the IBR-2 reactor (FLNP, JINR, Dubna, Russia). A negative thermal volume expansion in CrBr_3 below $T_C = 37$ K was observed, associated with spin-lattice coupling. The effect of high pressure leads to the suppression of magnetic ordering, and the transition from the initial FM state is expected at $P \sim 8.4$ GPa. Our results also demonstrate an isostructural phase transition in a CrBr_3 ferromagnet (2.5–7 GPa). Also, anomalies in the behavior of vibrational mode frequencies detected at $P \sim 15$ GPa indicate another phase transformation, presumably associated with the metallization process. Studies of Fe_3GeTe_2 at high pressures also revealed an isostructural transition at $P \sim 7$ GPa. The observed anomalous behavior of the unit cell parameters, interatomic distances and angles, and vibrational modes may indicate the competing nature of in-plane (ab) and out-of-plane (along c) interactions.

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ 4-Х КАНАЛЬНОГО БЫСТРОГО ДЕТЕКТОРА НА МКП

Ф. Ф. Валиев, Н. И. Калинин, Н. А. Макаров*, Г. А. Феофилов

Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7-9
*E-mail: n.a.makarov@mail.spbu.ru

Создан 4-х каналный детектор на МКП на основе быстродействующих компараторов и FPGA EPM240 фирмы ALTERA.

В рамках программной среды Quartus [1] проведено моделирование временных измерений для быстрого монитора столкновений пучков частиц на основе шевронных сборок микроканальных пластин (МКП) [2]. Алгоритм измерений основан на методе задержанных совпадений с использованием термометрического кода. Проверка тестового прототипа проведена с использованием 4 каналного генератора наносекундных импульсов, с регулируемой задержкой между каналами.

Полученные следующие результаты измерений:

1. Вероятность ложной регистрации по одному из 4-х каналов за счет электромагнитной наводки между каналами не более 0.01 %.

2. При использовании данных компараторов и FPGA установлена возможность определения времени регистрации частиц детектором с погрешностью 100 пс. При этом расчетное быстродействие схемы считывания совпадает с измеренным и составляет для 4 каналной системе не более 6 нс на каждое событие.

Исследование проведено при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (ID: 94031112).

Список литературы

1. Программное обеспечение Altera Quartus Web Edition, http://altera.ru/soft_quartus.html.
2. G. Feofilov, N. Makarov, F. Valiev. Simulation of the fast readout system for mcp based beam beam collisions monitor for nica experiments // Abstract of report at LXXII-th International Conference "Nucleus-2022: Fundamental problems and applications". 2022. P. 326–327.

HARDWARE IMPLEMENTATION AND TESTING 4-CHANNEL FAST DETECTOR ON MCP

F. F. Valiev, N. I. Kalinichenko, N. A. Makarov*, G. A. Feofilov

St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya emb., 7-9

*E-mail: n.a.makarov@mail.spbu.ru

A 4-channel MCP detector based on high-speed comparators and FPGA EPM240 from ALTERA was created.

Simulation of time measurements for fast monitoring of particle beam collisions based on chevron assemblies of microchannel plates (MCPs) was carried out [1] within the framework of the Quartus software environment [2].

The measurement algorithm is based on the delayed coincidence method using a thermometric code. The prototype was tested using a 4-channel nanosecond pulse generator with an adjustable delay between channels.

The obtained results of possible measurements:

1. The probability of false registration in 4 passes due to an electromagnetic wave between flows is not more than 0.01%.

2. When collecting data from comparators and FPGAs, it is possible to determine the time of registration of a sample by a detector with an error of 100 ps.

The study was supported by St. Petersburg State University (ID: 94031112).

References

1. G. Feofilov, N. Makarov, F. Valiev. Simulation of the fast readout system for mcp based beam beam collisions monitor for nica experiments// Abstract of report at LXXII-th International Conference "Nucleus-2022: Fundamental problems and applications". 2022. P.326-327.
2. Altera Quartus Web Edition software, http://altera.ru/soft_quartus.html.

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ СМК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ИОНОВ

А. Н. Иванов, А. Г. Малькин, Е. О. Митянин, Е. В. Артемьева

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г.Саров, пр. Мира 37
staff@vniief.ru

Комплекс программ СМК [1] предназначен для моделирования переноса частиц методом Монте-Карло. В последнее время возможности комплекса существенно расширены,

что позволяет кроме основных четырех типов частиц – нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов моделировать также перенос ионов.

В комплексе реализованы два типа источников ионов – независимые источники, задаваемые пользователем, а также источником легких ионов могут являться столкновения нейтронов с ядрами вещества при совместном моделировании переноса нескольких типов частиц. В последнем случае для розыгрыша параметров рожденных частиц используются табличные данные библиотеки Jeff-3.3.

Моделирование переноса ионов проводится в приближении непрерывного замедления с использованием таблиц потерь энергии, полученных с помощью свободно распространяемой программы SRIM [2]. Реализован ряд моделей учета флуктуации потерь энергии, используемых в комплексе Geant4 [3].

Кроме непрерывного замедления в комплексе CMK реализованы два способа учета процесса упругого рассеяния ионов в среде – аналитическая модель, используемая в комплексе Geant4, и с помощью построения интеграла столкновений Фоккера-Планка.

Также в комплексе CMK расширены возможности задания геометрии. Был введен новый тип геометрического блока – блок-решетка, что позволило задавать в постановках расчетов микросхемы, состоящие из большого числа ячеек.

Приводится сравнение результатов расчетов модельных задач, полученных в комплексах CMK и Geant4.

Список литературы

[1] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011610500 CMK от 11.01.2011 г. Авторы: Житник А. К., Залялов А. Н., Малькин А. Г. и др.

[2] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler. // SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter. SRIM Co. ISBN 978-0-9654207-1-6 (2008).

[3] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, et al // Geant4 developments and applications. IEEE Transactions on Nuclear Science v.53 No. 1 (2006) pp270-278.

EXPANDING POSSIBILITIES OF CMK SOFTWARE PACKAGE TO SIMULATE ION TRANSPORT

A. N. Ivanov, A. G. Malkin, E. O. Mityanin, E. V. Artemyeva

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics» Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
staff@vniief.ru

CMK software package [1] is designed for simulating particle transport with Monte-Carlo method. Possibilities of the package have been expanded considerably, and that allows simulating ion transport in addition to the simulation of the four basic types of particles – neutrons, photons, electrons and positrons.

CMK realizes two types of ion sources – independent sources set by the user and the source of light ions in the form of neutron collisions of neutrons with the nuclei of the material in case of the mixed simulation of the transport of several types of particles. In the last case, we use table data of Jeff-3.3 library to simulate the parameters of the originated particles.

Ion transport simulation is carried out in approximation of continuous stopping using the tables of energy loss produced with freely available SRIM program [2]. A number of models to account for energy loss fluctuations used in Geant4 [3] is realized.

Besides continuous stopping, CMK realizes two ways of accounting for the elastic scattering process for ions in the medium – an analytical model used in Geant4 and the one using the integral construction for Fokker-Planck collisions.

CMK also expands the possibilities of setting the geometry. A new type of the geometric block has been introduced – it is a block-mesh; this allows setting the computations of an integrated circuit comprising a big number of cells.

The computation results of model problems produced in CMK and Geant4 are compared.

References

- [1] Certificate of state registration for the CMK computer program №2011610500 dated 11.01.2011. Authors: Zhitnik A. K., Zalyalov A. N., Malkin A. G. et al.
- [2] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler. // SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter. SRIM Co. ISBN 978-0-9654207-1-6 (2008).
- [3] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, et al // Geant4 developments and applications. IEEE Transactions on Nuclear Science v.53 No. 1 (2006) pp270-278.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ФОРМИРОВАНИЯ p^+ -СЛОЯ В КРЕМНИЕВЫХ ДИФФУЗИОННЫХ СТРУКТУРАХ НА СКОРОСТЬ ВВЕДЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Махкамов Ш.¹, Эрдонов М. Н.¹, Ташметов М. Ю.¹, Саидов Р. П.¹, Холмедов Х. М.²

¹ 100214, Институт ядерной физики АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

² 100084, Ташкентский университет информационных технологий имени аль-Хорезми,

ул. Амира Тимура 10, г. Ташкент, Узбекистан

e-mail: makhkamov@inp.uz

muzaffarerdonov1978@yandex.ru

Управление свойствами полупроводниковых кристаллов и характеристиками изделий на их основе воздействием радиации является одним из перспективных технологических направлений полупроводниковой микроэлектроники. Возможность использования в технологических целях наведенных радиационных дефектов требует изучения эффективности их формирования в зависимости от вида и параметра воздействующих частиц, температуры облучения, степени легирования базового кристалла и конструкционной особенности изготавливаемого изделия. Одним из широко применяемых способов управления быстродействия полупроводниковых диодных структур является введение в базовые области изделий рекомбинационных дефектных центров путем радиационного воздействия. Однако анализ литературных данных показывает, что на эффективность формирования радиационных дефектов (РД) влияют способ и технологические режимы изготовления диодных структур.

Настоящая работа посвящена исследованию глубины залегания p^+ – слоя в диффузионных кремниевых p^+n-n^+ структурах на скорость введения радиационных дефектных центров при облучении электронами с энергией 4 МэВ и определению оптимальных дефектных центров рекомбинации, влияющих на быстродействие диодов. Диффузионные диоды изготавливались из n -Si с удельным сопротивлением 0,3–4,5 $\Omega \cdot \text{см}$ путем легирования Al при температуре 1150 $^{\circ}\text{C}$. Толщина базы всех изготовленных образцов составляла 400 мкм. Глубина формирования p^+ – слоя регулировалась изменением времени диффузии от 0,5 до 10 ч, что позволяло получить p^+ – слой с глубиной залегания от 10 до 60 мкм. Облучение образцов проводилось электронами с энергией 4 МэВ в интервале флюенсов 10^{13} – 10^{15} см^{-2} . Контроль радиационных дефектных центров осуществлялся методом DLTS, а быстродействие – измерением времени восстановления обратного сопротивления диодов.

Установлено, что в образцах после облучения электронами в указанном интервале флюенсов в спектре DLTS появляются пики, связанные с глубокими рекомбинационными уровнями $E_c-0,17$ эВ, $E_c-0,23$ эВ, $E_c-0,39$ эВ и $E_c-0,44$ эВ, которые приписываются к РД (A, V_2 и E центры соответственно). При сопоставлении концентрации указанных центров в зависимости от глубины p^+ – слоя выявлено, что возрастание глубин p^+ – слоя приводит к повышению скорости введения РД и доходит до максимума при глубинах p^+ – слоя 25 мкм. Дальнейшее повышение глубины приводит к понижению скорости введения уровней $E_c-0,23$ эВ и $E_c-0,44$ эВ. В отличие от указанных центров РД, обусловленных уровнем $E_c-0,39$ эВ (дивакансия), при глубинах p^+ – слоя > 30 мкм возрастает и становится больше суммарного значения концентрации уровней $E_c-0,23$ эВ и $E_c-0,44$ эВ. Установлено, что во всех диодных структурах вне зависимости от глубины залегания p^+ – слоя и флюенса электронного облучения основную

концентрацию РД составляет рекомбинационный центр $E_c-0,17$ эВ. Показано, что при глубинах p^+ – слоя > 60 мкм время восстановления обратного сопротивления радиационно-обработанных диффузионных p^+-n-n^+ структур понижается на порядок и определяется концентрацией центров $E_c-0,17$ эВ и $E_c-0,39$ эВ. Предложена квазихимическая реакция с участием Al, O и V на границе раздела p^+ – слоя, позволяющая объяснить изменение скорости введения РД в кремниевых диффузионных диодных структурах.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE DEPTH OF P^+ - LAYER FORMATION IN SILICON DIFFUSION STRUCTURES ON THE INTRODUCTION RATE OF RADIATION DEFECTS UNDER ELECTRON IRRADIATION

Sh. Makhkamov¹, M. Yu. Tashmetov¹, M. N. Erdonov¹, R. P. Saidov¹, Kh. M. Kholmedov²

¹ Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
100214 Tashkent, Uzbekistan

²Tashkent Al-Khwarizmi University of Information Technologies, 10 Amir Timur str.,
100084, Tashkent, Uzbekistan
e-mail: makhkamov@inp.uz
muzaffarerdonov1978@yandex.ru

Controlling the properties of semiconductor crystals and the characteristics of products based on them by exposure to radiation is one of the promising technological areas of semiconductor microelectronics. The possibility of using induced radiation defects for technological purposes requires studying the efficiency of their formation depending on the type and parameter of the acting particles, the irradiation temperature, the degree of doping of the base crystal, and the design features of the manufactured product. One of the widely used methods for controlling the speed of semiconductor diode structures is the introduction of recombination defect centers into the base regions of products by radiation exposure. However, an analysis of the literature data shows that the efficiency of the formation of radiation defects (RD) is affected by the method and technological modes of fabrication of diode structures.

This work is devoted to the study of the depth of the p^+ – layer in diffusion silicon p^+-n-n^+ structures on the rate of introduction of radiation defect centers upon irradiation with electrons with an energy of 4 MeV and to the determination of the optimal defect recombination centers that affect the performance of diodes. Diffusion diodes were made of n -Si with a specific resistance of 0.3-4.5 $\Omega \cdot \text{cm}$ by doping with Al at a temperature of 1150 °C. The base thickness of all fabricated samples was 400 μm . The formation depth of the p^+ layer was controlled by changing the diffusion time from 0.5 to 10 h, which made it possible to obtain a p^+ – layer with a depth of 10 to 60 μm . The samples were irradiated with electrons with an energy of 4 MeV in the fluence range $10^{13} \div 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. The control of radiation defect centers was carried out by the DLTS method, and the speed was measured by measuring the recovery time of the reverse resistance of the diodes.

It has been established that in the samples after irradiation with electrons in the indicated range of fluences, peaks appear in the DLTS spectrum associated with deep recombination levels $E_c-0.17$ eV, $E_c-0.23$ eV, $E_c-0.39$ eV, and $E_c-0.44$ eV, which are attributed to the RD (A, V^2 and E centers, respectively). When comparing the concentration of these centers depending on the depth of the p^+ – layer, it was found that an increase in the depth of the p^+ – layer leads to an increase in the rate of introduction of RD and reaches a maximum at a depth of the p^+ – layer of 25 μm . A further increase in depth leads to a decrease in the rate of introduction of the levels $E_c-0.23$ eV and $E_c-0.44$ eV. In contrast to the indicated centers, the RD, caused by the level of $E_c-0.39$ eV (divacancy), at depths of the p^+ – layer > 30 μm increases and becomes greater than the total concentration of the levels $E_c-0.23$ eV and $E_c-0.44$ eV. It has been established that in all diode structures, regardless of the depth of the p^+ – layer and the electron irradiation fluence, the main concentration of RD is the recombination center $E_c-0.17$ eV. It is shown that at depths of the p^+ -layer > 60 μm , the recovery time of the reverse resistance of radiation-treated diffusion p^+-n-n^+ structures decreases by an order of magnitude and is determined by the concentration of centers $E_c-0.17$ eV and $E_c-0.39$ eV. A quasi-chemical reaction involving Al, O, and V at the interface of the p^+ – layer is proposed, which makes it possible to explain the change in the rate of introduction of RD in silicon diffusion diode structures.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ БОРСОДЕРЖАЩИЕ ПЛАСТМАССОВЫЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ

И. И. Камнев¹, И. Б. Немченко^{1,2}, И. А. Суслов^{1,2}, А. Д. Быстрыков^{1,2}

¹141980 Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области,
ул. Жолио-Кюри, д. 6

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Университет «Дубна» (государственный университет «Дубна»)
ул. Университетская 19, г. Дубна, Московская обл., Россия, 141980
8 (926) 340-90-28, e-mail: potre_@mail.ru

В настоящей работе описывается технология получения композиционных борсодержащих пластмассовых сцинтилляторов на основе сополимеров метакриловой кислоты (МК) и метилметакрилата (ММА) со стиролом (Ст). В качестве борсодержащего соединения использовался порошок нитрида бора (BN), а в качестве сцинтиллирующей добавки – порошок сульфида цинка, допированный серебром (ZnS(Ag)).

В результате работы были получены серии образцов с разным соотношением мономеров в полимерной матрице и с разным соотношением нитрида бора и сульфида цинка. Исследуемые образцы представляли собой диски диаметром 25 мм и толщиной 1 или 2 мм.

Для всех серий образцов была измерена относительная эффективность регистрации тепловых нейтронов.

COMPOSITE BORON-LOADED PLASTIC SCINTILLATORS

I. I. Kamnev¹, I. B. Nemchenok^{1,2}, I. A. Suslov^{1,2}, A. D. Bystryakov^{1,2}

¹Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

²Dubna State University, 19 Universitetskaya St, Dubna, Moscow Region, Russia, 141980
8 (926) 340-90-28, e-mail: potre_@mail.ru

This document presents the technology for producing composite boron-loaded plastic scintillators based on copolymers of methacrylic acid (MA) and methyl methacrylate (MMA) with styrene (St). Boron nitride was used as a boron-containing compound and silver-doped zinc sulfide powder (ZnS(Ag)) was used as a scintillating additive.

As a result, the series of samples were produced with different ratios of monomers in the polymer matrix and with different ratios of boron nitride and zinc sulfide. The experimental samples were 25 mm diameter and 1 or 2 mm thickness.

The relative efficiency of thermal neutron detection was measured for all series of samples.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СТЕРИЛИЗАЦИИ И КОНСЕРВАЦИИ ИСКОПАЕМЫХ БИООБЪЕКТОВ

Н. А. Николаева, В. В. Розанов, И. В. Матвейчук, А. П. Черняев, С. Н. Мамаева

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»,
677013, г. Якутск, ул. Кулаковского, д. 48, СВФУ имени М.К. Аммосова,
Тел. 8(914)2793336, e-mail larsoon696@mail.ru

Рассматривается возможность использования нового метода обработки и стерилизации биологических образцов мамонта и других древних животных с применением озона и облучения электронами высокой энергии для длительного хранения и исследований. В

дополнение к решению вопросов обеспечения безопасности, такая обработка значительно улучшает сохранность образца. На сегодняшний день музеи в основном используют химические методы стерилизации. Исследователи неоднократно отмечали высокую токсичность окиси этилена, его канцерогенные свойства и возможность мутагенного воздействия на растения, бактерии и лабораторных животных. Наиболее эффективным методом стерилизации является лучевая обработка. Однако радиация при величине поглощенной дозы в 20-40 кГр может вызывать серьезные изменения как в структуре, так и в свойствах ископаемых фрагментов, что приводит к потере важной информации при их дальнейшем изучении.

Комбинированное воздействие (озон + радиация) [1] позволяет существенно снизить величину поглощенной дозы при одновременном эффективном уничтожении патогенов даже в споровой форме. Этот метод также позволяет заменить или резко сократить использование химических веществ. Проведены исследования образцов тканей Малоляховского мамонта комплексными методами с использованием сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, инфракрасной спектроскопии и рамановского спектрометра. Результатами исследования являются новые данные о морфологии поверхности, элементном составе ископаемых фрагментов. В будущем планируется разработать общие правила обработки и сохранения найденных костей вымерших животных и сохранения ископаемых древних останков эпохи плейстоцена, а также археологических находок костей.

Список литературы

1. Алимов А. С., Близнюк У. А., Борщеговская П. Ю. и др. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов // Известия Российской академии наук. Серия физическая, том 81, № 6, с. 819-823

ON THE POSSIBILITY OF APPLYING COMBINED RADIATION TECHNOLOGIES FOR STERILIZATION AND PRESERVATION OF FOSSIL BIO-OBJECTS

N. A. Nikolaeva, V. V. Rozanov, I. V. Matveichuk, A. P. Chernyaev, S. N. Mamaeva

M.K.Ammosov North-Eastern Federal University, 677013, Yakutsk, ul. Kulakovskogo, 48,
Phone 89644287516, e-mail larsoon696@mail.ru

The possibility of using a new method of processing and sterilizing biological samples of mammoths and other ancient animals using ozone and high-energy electron irradiation for long-term storage and research is being considered. In addition to addressing safety concerns, this treatment greatly improves sample retention. Today, museums mainly use chemical methods of sterilization. Researchers have repeatedly noted the high toxicity of ethylene oxide, its carcinogenic properties and the possibility of mutagenic effects on plants, bacteria and laboratory animals. The most effective sterilization method is radiation treatment. However, radiation at an absorbed dose of 20–40 kGy can cause serious changes in both the structure and properties of fossil fragments, which leads to the loss of important information during their further study.

Combined exposure (ozone + radiation) [1] can significantly reduce the amount of absorbed dose while effectively destroying pathogens, even in spore form. This method also makes it possible to replace or drastically reduce the use of chemicals. The tissue samples of the Malolyakhov mammoth were studied by complex methods using scanning electron and atomic force microscopy, infrared spectroscopy, and a Raman spectrometer. The results of the study are new data on the surface morphology, elemental composition of fossil fragments. In the future, it is planned to develop general rules for the processing and preservation of the found bones of extinct animals and the preservation of fossil ancient remains of the Pleistocene era, as well as archaeological finds of bones.

References

1. Alimov A. S., Bliznyuk U. A., Borchegovskaya P. U. et al. Using accelerated electron beams for the radiation processing of foodstuffs and biomaterials // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. V. 81. № 6. P. 743-747.

СОСТАВ И ЛИНЕЙНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ $W(p,x)$ И $Ta(p,x)$

Н. В. Новиков, Н. Г. Чеченин, А. А. Широкова

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, тел: +7-495-9392486,
E-mail: nvnovikov65@mail.ru
site@sinp.msu.ru

Эффект сбоя бортовой электроники от одного иона может происходить не только от ионизации материала первичными ионами, но также от взаимодействия заряженных фрагментов ядерной реакции [1, 2] с одним из материалов интегральной схемы. При одном столкновении с ядром образуется сразу несколько вторичных заряженных частиц. Их неупругие потери энергии и заряды значительно больше, чем у первичного протона. Продукты ядерных реакций несут информацию не только о механизмах реакций, но и о динамике образования и распада промежуточных составных ядер [3].

Метод Монте-Карло [4] используется для исследования состава, энергии и линейной передачи энергии продуктов ядерных реакций в столкновениях быстрых протонов с ядрами тантала и вольфрама. Сравниваются результаты, полученные для неупругого взаимодействия протонов с энергией $E \leq 10$ ГэВ.

Список литературы

1. N. V. Novikov, N. G. Chechenin, and A. A. Shirokova. Modern Physics Letters B. 37, 2350041 (2023).
2. N. G. Chechenin, N. V. Novikov, and A. A. Shirokova. Physics of Atomic Nuclei, 86, 188 (2023).
3. N. V. Novikov, N. G. Chechenin, and A.A. Shirokova. Physics of Atomic Nuclei, 86, 198 (2023).
4. J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis et al. NIM A. 835, 186 (2016).

THE COMPOSITION AND LINEAR ENERGY TRANSFER OF $W(p,x)$ AND $Ta(p,x)$ NUCLEAR REACTION PRODUCTS

N. V. Novikov*, N. G. Chechenin, A. A. Shirokova

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Moscow State University,
119991, Moscow, Leninskiye gory, 1, Russia, tel: +7-495-9392486,
E-mail: nvnovikov65@mail.ru
site@sinp.msu.ru

The single event effects on onboard electronics can occur not only from direct medium ionization by primary ions, but also from the effect of charged fragments of the nuclear reactions [1, 2] of one of the materials of an integrated circuit. In one collision with the nucleus, several secondary charged particles are formed at once. Their inelastic energy losses and charges are significantly greater than those of the primary proton. Products of nuclear reactions carry information not only about reaction mechanisms but also about the dynamics of formation and decay of intermediate compound nuclei [3].

Monte Carlo method [4] is used to study the composition, energies and linear energy transfer of products of nuclear reactions induced by collisions of fast protons with tantalum and tungsten nuclei. We compare the results obtained for inelastic proton interaction at energies in the range of $E \leq 10$ GeV.

References

1. N. V. Novikov, N. G. Chechenin, and A. A. Shirokova. Modern Physics Letters B. 37, 2350041 (2023).
2. N. G. Chechenin, N. V. Novikov, and A. A. Shirokova. Physics of Atomic Nuclei, 86, 188 (2023).
3. N. V. Novikov, N. G. Chechenin, and A. A. Shirokova. Physics of Atomic Nuclei, 86, 198 (2023).
4. J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis et al. NIM A. 835, 186 (2016).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ НА ПУЧКЕ 160 МэВ

А. В. Овсянников*, М. В. Желтоножская, С. Р. Адоньев, А. П. Черняев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1с2
* 270560@list.ru, 8 909-946-56-25

В последние годы одним из наиболее перспективных методов лечения злокачественных образований является протонная терапия. По сравнению с традиционной лучевой терапией фотонами, протонная терапия с модулированной интенсивностью может доставлять высокую лечебную дозу к опухолям при минимальной дозе для нормальных тканей. Тем не менее, в результате ядерных взаимодействий высокоэнергетических протонов с воздухом, телом человека и элементами ускорителя может формироваться вторичное излучение. Ввиду высоких энергий пучков протонов, используемых для лечебной терапии (до 250 МэВ) вторичные частицы могут быть представлены протонами, дейтронами, альфа-частицами и нейтронами, которые передают большую часть своей энергии не только опухоли, но и окружающим нормальным тканям.

К настоящему времени исследованию механизмов возбуждения различных ядерных реакций при взаимодействии протонов с энергиями до 250 МэВ с химическими элементами лечебных установок, а также с элементами тела пациента, такими легкими ядрами, как углерод, кальций, кислород, азот и др. и оценке вторичной дозы посвящено единичное число работ.

В представленной работе исследовалось образование радиоактивных нуклидов при облучении мишеней металлического кальция и CaCl_2 естественного состава протонами с энергией 160 МэВ. В гамма-спектрах облученных мишеней выделены активности ^7Be ($T_{1/2}=53$ сут), ^{22}Na ($T_{1/2}=2.6$ г), ^{24}Na ($T_{1/2}=15$ ч), ^{28}Mg ($T_{1/2}=21$ ч) и продуктов активации изотопов кальция в реакциях ($p, \alpha Xn$) и (p, Xn) – ^{42}K ($T_{1/2}=12.4$ ч), ^{43}K ($T_{1/2}=22.3$ ч), ^{43}Sc ($T_{1/2}=3.89$ ч), ^{44}Sc ($T_{1/2}=3.93$ ч). Для реакции расщепления измерены экспериментальные выходы для всех нуклидов с погрешностью не выше 10 %. Полученные результаты сравнивались с имеющимися экспериментальными данными о выходе для ^{22}Na , ранее измеренного для энергии протонов 158 МэВ, расхождение оказалось в рамках погрешности измерений. Полученные результаты обсуждаются.

STUDY OF NUCLEAR REACTIONS DURING PROTON THERAPY AT 160 MeV BEAM

A. V. Ovsyannikov*, M. V. Zheltonozhskaya, S. R. Adoniev, A. P. Chernyaev

Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory 1b2
* 270560@list.ru, +7 (909) 946-56-25

One of the most promising methods for treating malignant tumors in recent years is proton therapy. Compared to traditional photon radiation therapy, intensity modulated proton therapy can deliver a high therapeutic dose to tumors and a minimal dose to normal tissues. Nevertheless, secondary radiation can arise from nuclear interactions of high-energy protons with air, the human body and accelerator elements. Due to the high energies of the proton beams used for therapeutic therapy (up to 250 MeV), secondary particles can be protons, deuterons, alpha particles and neutrons, which transfer most of their energy not only to tumors, but also to surrounding normal tissues.

To date, the study of the mechanisms of excitation of various nuclear reactions during the interaction of protons with energies up to 250 MeV with chemical elements of medical devices, as well as with elements of the patient's body, such as light nuclei such as carbon, calcium, oxygen, nitrogen, etc., has been discussed only in a few work done.

In the present work, nuclear reactions with accelerated protons on natural calcium targets of different compositions were investigated. The targets made of metallic calcium and CaCl_2 were irradiated with proton beams with an energy of 160 MeV. The activities of ^7Be ($T_{1/2}=53$ days), ^{22}Na ($T_{1/2}=2.6$ y), ^{24}Na ($T_{1/2}=15$ h), ^{28}Mg ($T_{1/2}=21$ h) and such activation products calcium isotopes in the reactions $(p, \alpha Xn)$ and (p, Xn) as ^{42}K ($T_{1/2}=12.4$ h), ^{43}K ($T_{1/2}=22.3$ h), ^{43}Sc ($T_{1/2}=3.89$ h), ^{44}Sc ($T_{1/2}=3.93$ h) were identified in the gamma spectra of irradiated targets. For the splitting reaction, the experimental yields were measured for all nuclides with maximum uncertainty of 10%. The results obtained were compared with the available experimental data on the yield for ^{22}Na , previously measured for a proton energy of 158 MeV, and it was found that the deviation was within the measurement uncertainty. The results obtained are discussed.

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В ГРАФИТОВЫХ БЛОКАХ, ИЗВЛЕКАЕМЫХ ПРИ ДЕМОНТАЖЕ ГРАФИТОВОЙ КЛАДКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

А. О. Павлюк, Е. В. Беспала, Е. П. Зеленецкая, И. А. Ушаков

Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, Томская обл., 634050,
сот.тел. +79138288007, e-mail: pavlyuk17@tpu.ru

В настоящее время в РФ для вывода из эксплуатации энергетических уран-графитовых реакторов (УГР) типа РБМК, АМБ и др. приоритетной стратегией является «Немедленный демонтаж». При этом часть графитовых блоков могут содержать просыпи фрагментов ядерного топлива, что требует обнаружения и определения их параметров при извлечении из реактора до контейнеризации. Информация о содержании просыпей ядерного топлива необходима для соблюдения требований ядерной безопасности и выполнения сортировки с учетом существующих ограничений на содержание ядерно-опасных нуклидов в контейнерах. Фрагменты топлива с относительно высоким выгоранием являются источниками интенсивного гамма и нейтронного излучений из-за накопления в них радионуклидов продукта деления ^{137}Cs и актиноида ^{244}Cm , что позволяет выполнить их детектирование и определить основные параметры их локализации на поверхности блока. С этой целью был предложен способ [1], предполагающий в соответствии с разработанным алгоритмом поэтапное выполнение измерений извлеченного графитового блока 1 в ячейке 2 специальной измерительной сборки (см. рис.), состоящей из замедлителя 3 и установленных в нее в определенном порядке детекторов гамма-излучения 4, надтепловых 5 и тепловых 6 нейтронов. Графитовый блок 1 помещается в сборку и извлекается с помощью специального полого захвата 7, также содержащего внутри детекторы гамма 8 и нейтронного 9 излучений, необходимых для предварительного обнаружения топлива.

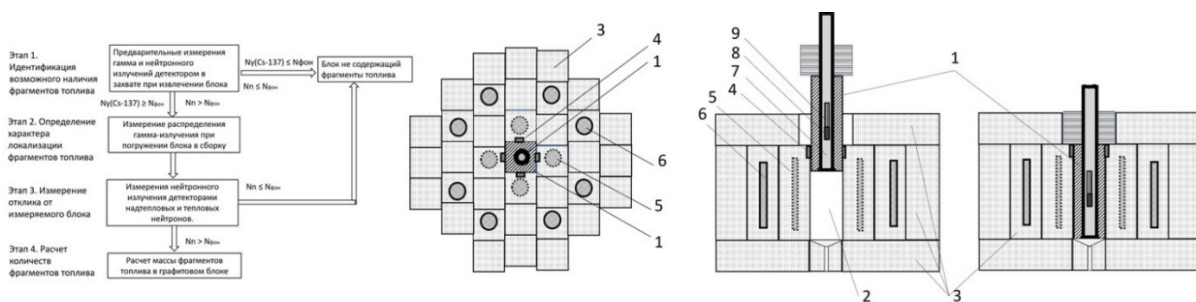


Рисунок. Схема алгоритма (слева) и измерительной сборки (в центре и справа)

Список литературы

1. Способ обнаружения фрагментов ядерного топлива и определения их параметров в графитовых блоках ядерного реактора: заявка на изобретение РФ № 2022135053 от 29.12.2022 / Павлюк А. О. / заявитель и патентообладатель: НИ ТПУ.

METHOD FOR DETECTING NUCLEAR FUEL SPILLS IN GRAPHITE BLOCKS RETRIEVED DURING DISMANTLEMENT OF A NUCLEAR REACTOR GRAPHITE STACK

A. O. Pavlyuk, E. V. Bepala, E. P. Zelenetskata, I. A. Ushakov

National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue, 30, Tomsk, Tomsk region, 634050,
mob. +79138288007, e-mail: pavlyuk17@tpu.ru

At present, the priority strategy in the Russian Federation for the decommissioning of uranium-graphite power reactors (UGRs) such as RBMK, AMB, etc. is «Immediate Dismantlement». At the same time, some graphite units may contain spills of nuclear fuel fragments, which requires detection and determination of their parameters during removal from the reactor prior to containerization. Information on the content of nuclear fuel spills is needed to comply with nuclear safety requirements and to perform sorting, taking into account existing restrictions on the content of nuclear-hazardous nuclides in containers. Fuel fragments with relatively high burn-up are sources of intense gamma and neutron radiation due to accumulation of ^{137}Cs fission product radionuclides and ^{244}Cm actinide radionuclides in them, which allows to perform their detection and determine the main parameters of their localization on the block surface. For this purpose, a method [1] was proposed that implies, in accordance with the developed algorithm, stepwise performing measurements of the extracted graphite block 1 in the cell 2 of a special measuring assembly (see Fig.) consisting of a moderator 3 and installed in it a certain order gamma radiation detector 4, epithermal 5 and thermal 6 neutrons detectors. Graphite block 1 is placed in the assembly and retrieved using a special hollow grab 7, also containing inside the detectors of gamma 8 and neutron 9 radiation, necessary for preliminary fuel detection.

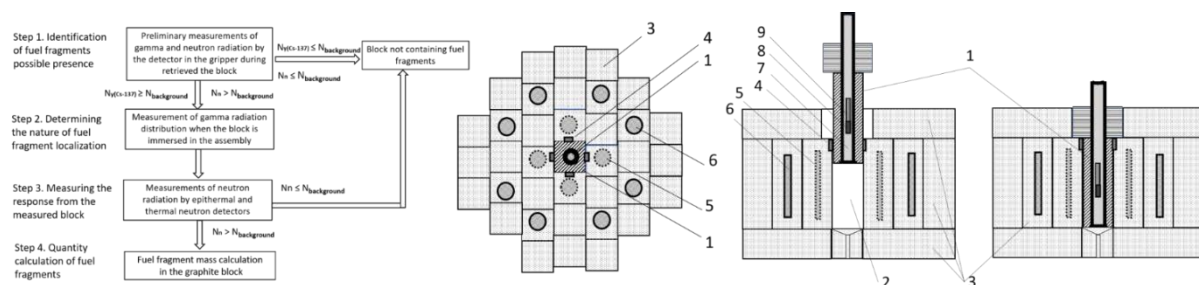


Figure. Schematic of the algorithm (left) and measuring assembly (middle and right)

References

1. Method of nuclear fuel fragments detecting and determine their parameters in nuclear reactor graphite blocks: invention application of Russian Federation № 2022135053 dated 29.12.2022 / Pavlyuk A. O. / applicant and patent holder: TPU.

РОССИЙСКИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ (500-1000 МС/С) МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ДИДЖИТАЙЗЕРЫ

И. С. Бредихин, А. В. Пашков

ООО «Диджитайзер», Новгородская область, г. В. Новгород, ул. Московская, д. 53, оф. 30
+79057650009, ivan@edigitizer.ru

Построение цифровых схем для обработки и управления экспериментальными установками является обязательным атрибутом построения современного научного эксперимента в области ядерной физики или физики частиц. Растущая сложность экспериментов приводит к появлению всё новых требований к цифровой электронике. Они не ограничиваются ростом скоростей оцифровки, или ростом скорости передачи и обработки данных. Растущие объёмы данных делают всё более и более заманчивой идею не переносить данные на компьютер, а обрабатывать их прямо на «железе», непосредственно во время сбора данных. Проблемой тут встаёт либо невозможность изменять встроенную в ПЛИС прошивку, либо требования к написанию сложного низкоуровневого кода для работы с ПЛИС.

В рамках реализации проекта нашей компанией разрабатывается линейка высокоскоростных диджитайзеров с программируемой ПЛИС. Действительно, в мире существует целый ряд международных компаний, специализирующихся на разработке, производстве и коммерческой реализации широкого спектра диджитайзеров. Но в отличие от большинства имеющих на мировом рынке решений, где алгоритмы обработки преобразованного сигнала защиты жестко в диджитайзер (конкретно в ПЛИС) и позволяют каждой отдельной модели диджитайзера решать конкретную задачу, в разрабатываемых нами решениях предусмотрена возможность лёгкого перепрограммирования ПЛИС без необходимости изменять всю внутреннюю архитектуру, что делает возможным менять алгоритм обработки сигнала – так называемый подход «открытый ПЛИС».

Кроме того, вышеупомянутые мировые производители – это компании из Франции, США, Италии, Германии – стран, что ввели санкции против Российской Федерации в 2022 году. Все высокоскоростные диджитайзеры, подпадая под категорию двойного назначения были запрещены к поставкам в Россию и Беларусь [1].

В рамках докладываемой работы будут представлены практические результаты разработки высокоскоростных многоканальных диджитайзеров российского производства, обладающих конкурентными техническими характеристиками и возможностью быстрой смены пользовательской прошивки для лёгкой адаптации приборов под стоящие научные задачи.

Таблица сравнения ключевых параметров и областей применения диджитайзеров

модель	# канал	МВыб/с	# бит	применение
D125-16A	16	125	14	Спектроскопия & работа в режиме МКА Продвинутая обработка (усиление, форма)
D500-4/8	4/8	500	14	Средне-быстрые детекторы, суб-нс времена вместе с хорошим разрешением по энергии
D1000-4	4	1000	14	Сверхбыстрые детекторы (алмазные, MPCs, SiPMs) Изучение процессов с пикосекундным разрешением
GT-01	1 / 2	20 / 40	12	Спектроскопия & работа в режиме МКА

Список литературы

[1] Official Journal of the European Union 25.2.2022 L 49/1 “amending Regulation (EU) No 833/2014 concerning restrictive measures in view of Russia's actions destabilising the situation in Ukraine”.

RUSSIAN HIGH-SPEED (500-1000 MS/S) MULTI-CHANNEL DIGITIZERS

A. V. Pashkov, I. S. Bredikhin

Digitizer LLC, Novgorod region, V. Novgorod, st. Moskovskaya, d. 53, of. Thirty
+79057650009, ivan@edigitizer.ru

Construction of digital circuits for the processing and control of experimental setups is a mandatory attribute of the construction of a modern scientific experiment in the field of nuclear physics or particle physics. The growing complexity of experiments leads to new requirements for digital electronics. These requirements are not limited to the growth in digitization speed, or growth in the speed of data transmission and processing. The growing amount of data makes it more and more tempting to not transfer data to a computer, but to process it right on the hardware, right at the time of data collection. The problem here is either the inability to change the firmware built into the FPGA, or the requirements for writing complex low-level code to work with the FPGA.

As part of the project, our company is developing a line of high-speed digitizers with a programmable FPGA. Indeed, there are several international companies around the world that specialize in the development, production, and commercialization of a wide range of digitizers. But unlike most solutions available on the world market, where the algorithms for processing the converted signal are hardwired into the digitizer (specifically in the FPGA) and allow each individual digitizer model to solve a specific problem, the solutions we develop provide for the possibility of easy reprogramming of the FPGA without the need to change the entire internal architecture, which makes it possible to change the signal processing algorithm – the so-called "open FPGA" approach.

In addition, the global manufacturers are companies from countries (France, USA, Italy, Germany) that imposed sanctions against the Russian Federation in 2022. All high-speed digitizers falling under the dual-use category were banned from deliveries to Russia and Belarus [1].

As part of the report, practical results of the development of Russian-made high-speed multi-channel digitizers with competitive technical characteristics and the ability to quickly change user firmware for easy adaptation of devices to scientific tasks will be presented.

Comparison table of key parameters and areas of application of digitizers

model	# channel	MS/s	# bit	applications
D125-16A	16	125	14	Spectroscopy & MCA operation Advanced processing (gain, shape)
D500-4/8	4/8	500	14	Medium-fast detectors, sub-ns times along with good energy resolution
D1000-4	4	1000	14	Ultrafast detectors (Diamond, MPCs, SiPMs) Study processes with picosecond resolution
GT-01	1 / 2	20 / 40	12	Spectroscopy & MCA operation

References

[1] Official Journal of the European Union 25.2.2022 L 49/1 “amending Regulation (EU) No 833/2014 concerning restrictive measures in view of Russia's actions destabilising the situation in Ukraine”.

СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

**А. Р. Ахметов¹, И. А. Журавлев¹, О. И. Мешков², И. В. Пензин¹,
А. В. Петренко², Р. В. Протас¹, С. Д. Хренков¹**

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
vniitf@vniitf.ru

Необходимость получения качественных изображений оптически непрозрачных объектов из материалов с высокой плотностью предъявляет высокие требования к качеству электронного пучка источника тормозного излучения.

Опытная эксплуатация линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20 показала, что настройка режимов работы установки требует наличия разнообразных средств диагностики электронного пучка. Применяются разрушающие и неразрушающие способы диагностики. Диагностируются такие параметры пучка, как положение пучка относительно центральной орбиты, интенсивность, энергия, продольный и поперечный профили в различных точках ускорителя, размер фокусного пятна.

DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM

**A. R. Akhmetov¹, I. A. Zhuravlev¹, O. I. Meshkov², I. V. Penzin¹, A. V. Petrenko²,
R. V. Protas¹, S. D. Khrenkov¹**

¹Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia, vniitf@vniitf.ru

²Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

The high-quality images of optically nontransparent objects made of high-density materials require high-quality electron beam from bremsstrahlung radiation source.

The experimental operation of the LIA-20 linear induction accelerator facility has shown that various means for electron beam diagnostics are required to adjust the facility operation modes. Destructive and nondestructive diagnostics are applied to diagnose such beam parameters as beam position relative to the central orbit, beam intensity, beam energy, longitudinal and transverse profiles in different accelerator points, and focal spot size.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИКСЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКОВ ПРОТОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

**В. В. Петров¹, В. И. Жеребчевский, В. П. Кондратьев, В. В. Вечернин, Н. А. Мальцев,
С. Ю. Торилов, Н. А. Прокофьев, С. Н. Белокурова, Е. О. Землин, И. И. Ерыгин**

Санкт-Петербургский государственный университет

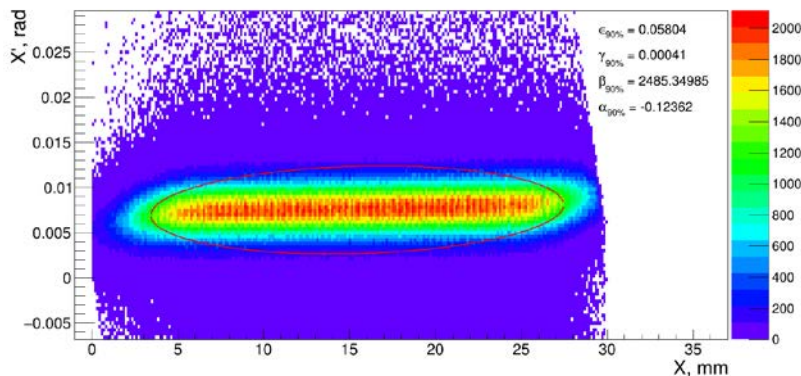
¹vitalii17@bk.ru

На сегодняшний день пучки заряженных частиц широко применяются как для фундаментальных исследований в ядерной физике и физике высоких энергий, так и для решения прикладных задач в ядерной медицине, радиационном материаловедении, ядерно-физических технологий. В используемых для этих целей ускорителях создаются специальные

системы контроля и измерения характеристик пучков. Такие системы играют важную роль при настройке, тестировании и последующей эксплуатации соответствующих детекторных комплексов, необходимых для проведения экспериментальных исследований. В настоящей работе предлагается использование кремниевых пиксельных детекторов для прецизионного определения характеристик пучков протонов высоких энергий.

Пиксельные детекторы хорошо зарекомендовали себя в экспериментах с элементарными частицами [1, 2]. Их основные преимущества – высокое пространственное разрешение и быстродействие. По этой причине их использование обеспечит крайне высокую точность для определения характеристик пучков заряженных частиц.

В работе приведено описание новой экспериментальной установки с использованием пиксельных детекторов в телескопном варианте и даны результаты измеренных характеристик пучка протонов в диапазоне от 200 МэВ до 1 ГэВ. Определение характеристик пучка производилось по реконструированным трекам протонов. Из распределения параметров (координата, угол) от каждого трека вычислены такие величины, как эмиттанс и параметры Твисса (см. рисунок). Получено изображение профиля пучка. Оценена разрешающая способность установки в заданной геометрии. Исследована зависимость параметров пучка от его интенсивности, энергии, а также от наличия различных поглотителей на пути пучка.



Распределение треков протонов 1 ГэВ по координате X и углу в плоскости XZ. В верхней части показаны вычисленные с помощью данной методики эмиттанс и параметры Твисса пучка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00042, <https://rscf.ru/project/23-12-00042/>

Список литературы

1. The ALICE Collaboration Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2014. V. 41. P. 087002.
2. V. Zhrebchevsky et al., “Silicon Pixel Detectors for the Inner Tracking System of the MPD Experiment at the NICA Collider,” Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics., vol. 85, no. 5, p. 541–547, 2021.

EXPERIMENTAL SETUP USING PIXEL DETECTORS FOR PRECISION DETERMINATION OF HIGH ENERGY PROTON BEAMS CHARACTERISTICS

V. Petrov¹, V. Zhrebchevsky, V. Kondratiev, V. Vechernin, N. Maltsev, S. Torilov, N. Prokofiev, S. Belokurova, E. Zemlin, I. Erygin

Saint-Petersburg State University

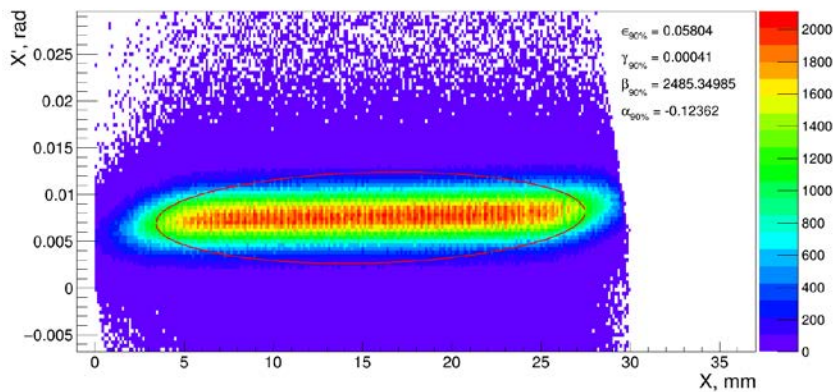
¹vitalii17@bk.ru

Today, charged particle beams are widely used both for fundamental research in nuclear physics and high energy physics, and for solving applied problems in nuclear medicine, radiation

materials science, and nuclear physics technologies. In the accelerators used for these purposes, special systems for monitoring and measuring beam characteristics are created. Such systems play an important role in setting up, testing, and subsequent operation of the corresponding detector systems required for experimental studies. In this paper, we propose the use of silicon pixel detectors for the precise characterization of high-energy proton beams.

Pixel detectors have proven themselves well in experiments with elementary particles [1, 2]. Their main advantages are high spatial resolution and high speed. This is the reason, why their use will provide extremely high accuracy for characterizing charged particle beams.

This paper describes a new experimental setup using pixel detectors in a telescopic version and shows the results of the measured characteristics of the proton beam in the energy range from 200 MeV to 1 GeV. The beam characteristics were determined from the reconstructed proton tracks. From the distribution of parameters (coordinate, angle) for each track, such quantities as emittance and Twiss parameters were calculated (see figure). An image of the beam profile has been obtained. The resolution of the setup in a given geometry is estimated. The dependence of the beam parameters on its intensity, energy, and also on the presence of various absorbers in the beam path is studied.



Distribution of 1 GeV proton tracks along the X coordinate and angle in the XZ plane. The upper part shows the emittance and Twiss parameters of the beam calculated using this technique.

The reported study was supported by the Russian Science Foundation, project no. № 23-12-00042, <https://rscf.ru/project/23-12-00042/>

References

1. The ALICE Collaboration Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2014. V. 41. P. 087002.
2. V. Zherebchevsky et al., “Silicon Pixel Detectors for the Inner Tracking System of the MPD Experiment at the NICA Collider,” Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics., vol. 85, no. 5, p. 541–547, 2021.

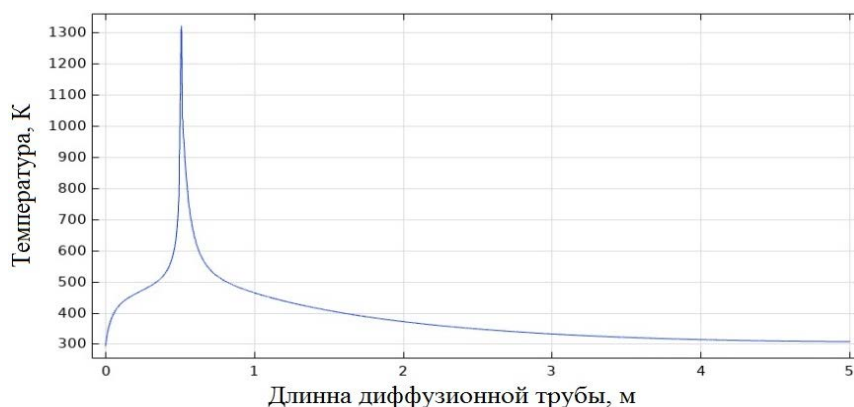
РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А. С. Петровская¹, А. Б. Цыганов¹, С. В. Суров², Д. А. Блохин²

¹ Общество с ограниченной ответственностью «ИнноПлазмаТех», 199034, г. Санкт-Петербург, Линия 17-я В. О., дом 4-6, Литер В, офис К-202, тел.: +7(904)613-85-11

² Акционерное общество «Наука и Инновации», научный дивизион ГК «Росатом», 115035, Москва, Кадашевская набережная, д. 32/2, стр. 1, тел.: +7(499) 558-10-25 aonii@rosatom.ru anita3425@yandex.ru

Одной из ключевых задач ядерной энергетики является разработка новых технологий для переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и замыкания ядерного топливного цикла. Известные на сегодня радиохимические технологии переработки ОЯТ сложны в реализации, так как состоят из множества реакций и стадий, а также приводят к накоплению больших объемов ЖРО. Для решения проблемы переработки ОЯТ нами разрабатывается одностадийная, принципиально новая ионно-термическая технология разделения (ИТ-ТР), основанная на применении «укороченного» микроплазменного разряда высокого давления в потоке инертного газа-носителя для атомизации таблеток ТВЭЛ ОЯТ и разделения расплывленных атомов по элементному составу за счет дифференциации по температурам насыщенных паров [1]. Реализация технологии осуществляется в диффузионной вольфрамовой трубе с термоизоляцией (керамика HfC). Осаждение расплывленных атомов происходит из потока газа-носителя на систему сменных вкладышей-коллекторов, имеющих заданные распределения температуры. Производительность одной разделительной трубы может составлять – 100 кг ОЯТ в год, а установки 30*30 – 100 тонн/год. Нами выполнены расчеты распределения температурного поля в диффузионной вольфрамовой разделительной трубе длиной 5 м при мощности, вкладываемой в разряд, ($6 \cdot 10^6$ – $7 \cdot 10^7$) Вт/м² и скорости потока газа-носителя (0.1–20) м/с.



Распределение температуры вдоль внутренней поверхности разделительной трубы при мощности $4 \cdot 10^7$ Вт/м² и скорости потока газа-носителя 10 м/с

Список литературы

[1] A. S. Petrovskaya, et al., Nuclear Engineering and Design, vol. 386, art. 111561, 2022.

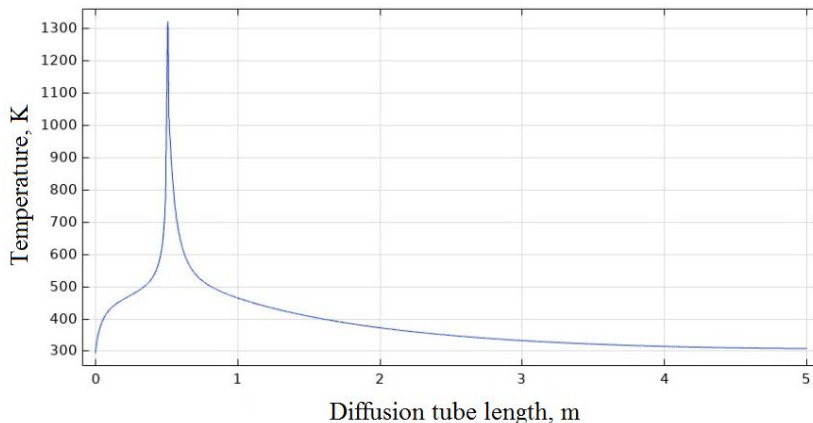
THE CALCULATION OF TEMPERATURE PARAMETERS OF ION SPUTTERING – THERMAL SEPARATION TECHNOLOGY FOR SPENT NUCLEAR FUEL PROCESSING

A. S. Petrovskaya¹, A. B. Tsyganov¹, S. V. Surov², D. A. Blokhin²

¹ InnoPlasmaTech Limited Liability Company, 199034, St. Petersburg, 17th Line V.O., building 4-6, liter B, office K-202, tel.: +7 (904) 613-85-11,

² "Science and Innovations" Joint Stock Company, scientific division of the State Corporation "Rosatom", 115035, Moscow, Kadashevskaya embankment, 32/2, building 1, tel.: +7(499) 558-10-25, aonii@rosatom.ru anita3425@yandex.ru

The nuclear power industry challenge task is the development of new technologies for reprocessing spent nuclear fuel (SNF) and closing the nuclear fuel cycle. Today known radiochemical technologies for SNF reprocessing are too much complicated due to multistage character and also lead to the accumulation of large volumes of LRW. To solve the SNF reprocessing problem, we are developing a one-stage, new ion sputtering – thermal separation technology (IT-TS) based on a "shortened" high-pressure micro-plasma discharge in inert carrier gas flow for the SNF pellets atomization and further sputtered atoms separation by elemental composition due to differentiation via saturated vapor temperatures [1]. The technology implementation is carried out in the diffusion tungsten tube with thermal insulation (HfC ceramics). The sputtered atoms are condensed from the carrier gas flow on the removable collector-liners having along the prescribed temperature distributions. The productivity of the single diffusion tube can be 100 kg of SNF per year, and for 30*30 installation – 100 ton/year. We calculated the temperature distribution field in the diffusion tungsten separating tube of 5 m length in the discharge power range ($6 \cdot 10^6$ – $7 \cdot 10^7$) W/m² and the carrier gas flow rate range (0.1–20) m/s.



Temperature distribution along the separation tube inner surface at the power level of $4 \cdot 10^7$ W/m² and the carrier gas flow rate of 10 m/s

References

[1] A. S. Petrovskaya, et al., Nuclear Engineering and Design, vol. 386, art. 111561, 2022.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВТОРОЙ СТАДИИ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ БР-К1М

**И. М. Пискорский, А. В. Арапов, А. В. Данилов, А. А. Девяткин, И. А. Кирилин,
А. В. Жирнов, Н. А. Красавин, А. Е. Никифоров, К. А. Савасичев, Г. Н. Пикулина,
А. Б. Соколов, В. А. Юхневич**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
607188, Нижегородская обл., г.Саров, пр. Мира 37
otd4@expd.vniief.ru

Работы по модернизации установки БР-К1 были начаты в 2011 году. Целью модернизации являлось приближение параметров установки к проектным (предельно допустимое энерговыделение в активной зоне (АЗ) при генерировании импульса на мгновенных нейтронах (ИМН) или при генерировании импульса на запаздывающих нейтронах (ИЗН) – 91 МДж, предельно допустимая мощность в статическом режиме – 30 кВт).

Модернизация установки БР-К1 включала в себя: изменение конструкции и материала герметичных чехлов АЗ, введение в состав модернизируемой установки БР-К1 (БР-К1М) нового органа регулирования реактивности (ОРР) – быстрого импульсного блока (БИБ), графитового отражателя, системы охлаждения и модернизацию системы управления защиты реактора.

Ввиду большого объема и сложности работ, физический пуск (ФП) был разделён на две стадии. Работы второй стадии ФП установки БР-К1М были завершены в 2022 г. Во время ФП были определены параметры АЗ при работе установки в статическом режиме, в режиме генерирования ИЗН и в режиме генерирования ИМН.

В рамках проведенных работ были определены физические характеристики АЗ: температурный и мощностной коэффициенты реактивности, квазистатический коэффициент гашения реактивности, полный вклад ОРР в реактивность АЗ и полный «запас реактивности» АЗ, деформации торцевой поверхности одного из структурных блоков АЗ, температура нагрева поверхности чехлов АЗ. Определено влияние на «запас реактивности» предельных загрузок внутризонной полости АЗ. Определены оптимальные параметры БИБ для генерирования ИМН. Для каждого режима работы установки БР-К1М определены предельно-допустимые параметры и пределы безопасной эксплуатации по мощности и энерговыделению.

В докладе приведены результаты исследований, описаны используемые методы измерений, состав и схемы используемого экспериментального оборудования.

RESULTS OF PHYSICAL START-UP SECOND STAGE FOR RESEARCH NUCLEAR INSTALLATION BR-K1M

**I. M. Piskorskii, A. V. Arapov, A. V. Danilov, A. A. Devyatkin, I. A. Kirilin,
A. V. Zhirnov, N. A. Krasavin, A. Ye. Nikiforov, K. A. Savasichev, G. N. Pikulina,
A. B. Sokolov, V. A. Yukhnevich**

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics» Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

Works on updating of installation BR-K1 started in 2011. The goal of modernization was approximation of installation parameters to design ones (maximum acceptable energy release in the core when generating a prompt neutron pulse (PNP) or generating a delayed neutron pulse (DNP) – 91 MJ, maximum permissible power in static mode – 30 kW).

Updating of installation BR-K1 involved: change of a structure and material of core sealed jackets, introduction (into updated installation BR-K1 (BR-K1M)) of a new absorption control member (ACM) – a fast pulsed unit (FPU), a graphite reflector, cooling systems and updating of reactor control system.

Due to large volume and complexity of works, physical start-up (PhS) was divided into two stages. Works of the PhS second stage of installation BR-K1 were finished in 2022. During PhS the core parameters were specified, related to installation operation in the static mode, in modes of generating DNP and PNP.

Within the limits of conducted works determined were core physical characteristics: a temperature and power coefficient of reactivity, a quasi-static reactivity extinction coefficient, total contribution of ACM into the core reactivity and the total core «reactivity margin», deformations of a butt end of one of the core structural units, heating temperature of core surface jackets. An effect of ultimate loads of an in-core cavity on the «reactivity margin» was specified. Optimal FPU parameters for generating PNP were determined. Maximum permissible parameters and safe use limits by power and energy release were specified for each operation mode of installation BR-K1.

The report presents an analysis, describes used measurement methods, content and circuits of used experimental equipment.

ГЕНЕРАТОР ИОНОВ ИЗОМЕРА ТОРИЯ-229

Ю. И. Гусев¹, Ф. Ф. Карпешин², Ю. Н. Новиков^{1,3}, А. В. Попов^{1*}

¹ ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова»
НИЦ «Курчатовский институт», 188300, Орлова Роща 1, г. Гатчина, Ленинградская обл.,
Россия. Тел.: +7(81371)4-60-25, факс: +7(81371)46025

² ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии
им. Д. И. Менделеева», 190005, Московский пр. 19, Санкт-Петербург, Россия.
Тел.: +7(812)2517601, факс: +7(812)7130114

³ ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9. Тел.: +7(812)3636633;
факс: +7(812)3636633
popov_av@pnpi.nrcki.ru
dir@pnpi.nrcki.ru
info@vniim.ru
spbu@spbu.ru

Изомерное состояние $^{229\text{m}}\text{Th}$ имеет энергию 8.338(24) эВ [1]. Небольшая собственная ширина и расположение перехода в оптическом диапазоне дают надежду на использование этого состояния в качестве генератора с добротностью, на несколько порядков превышающей добротность и стабильность электромагнитных осцилляторов.

Электронная оболочка оказывает критическое влияние на процессы как гашения, так и заселения изомера $^{229\text{m}}\text{Th}$. «Настройка» электронной оболочки может повысить вероятность перехода на несколько порядков [2]. Для оценки роли резонансной конверсии и реализации механизма электронного моста необходима методика с задержкой между моментом формирования и регистрации однозарядных ионов не более миллисекунды. Для этого используется частичная нейтрализация 2х- и 3х-зарядных ионов вблизи выходного отверстия газовой ячейки, что существенно уменьшает время эвакуации однозарядных ионов и дает шанс наблюдения распада изомера с участием электронной оболочки. В презентации будет рассмотрен метод [3, 4] формирования пучка ионов изомера тория, схема банчирувания, схема переноса ионов, приготовления тонкого источника и регистрации конверсионных электронов.

Список литературы

1. S. Kraemer J. Moens et al <https://doi.org/10/48550/arXiv2209.10276>.
2. F. F. Karpeshin, M. B. Trzhaskovskaya Nucl. Phys. A 1010 (2021) 122173.
3. V. Sonnenschein, et al., Eur. Phys. J. A, 2012, vol. 48, p. 52.
4. Y. I. Gusev, et al., Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., 2016, vol. 80, no.8, p. 875.

ION GENERATOR OF THE THORIUM-229 ISOMER

Yu. I. Gusev¹, F. F. Karpeshin², Yu. N. Novikov^{1,3}, A. V. Popov^{1*}

¹Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center Kurchatov Institute, Gatchina, Orlova rosha, 188300 Russia; Phone: +7(81371)46025, Fax: +7(81371)46025,

²Mendeleev Institute of Metrology, St. Petersburg, Moskovsky 19, 190005, Russia. Phone: +7(812)2517601, Fax: +7(812)7130114

³ St.Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Embankment, St Petersburg, 199034, Russia, Phone: +7(812)3636633; Fax: +7(812)3636633

popov_av@pnpi.nrcki.ru

dir@pnpi.nrcki.ru

info@vniim.ru

spbu@spbu.ru

The isomeric state of ^{229m}Th has an energy of 8.338(24) eV [1]. The small intrinsic width and location of the transition in the optical range give hope for using this state as a generator with a quality-factor several orders of magnitude higher than the quality and stability of electromagnetic oscillators.

The electron shell has a critical effect on the processes of both quenching and settling the ^{229m}Th isomer. The “tuning” of the electronic shell can increase the probability of transition by several orders of magnitude [2]. To assess the role of resonance conversion and the implementation of the electronic bridge mechanism, a technique with a delay between the moment of formation and registration of single-charged ions of no more than a millisecond is necessary. For this purpose, partial neutralization of doubly- and triply-charged ions is used near the outlet of the gas cell, which significantly reduces the evacuation time of single-charged ions and gives a chance to observe the decay of the isomer, with the participation of the electron shell. The presentation will consider the method [3, 4] of ion beam formation of the thorium isomer, together with the bunching procedure and ion optics to be used in the experiment, the preparation of a thin source and registration of conversion electrons.

References

1. S. Kraemer J. Moens et al <https://doi.org/10/48550/arXiv2209.10276>.
2. F. F. Karpeshin, M. B. Trzhaskovskaya Nucl. Phys. A 1010 (2021) 122173.
3. V. Sonnenschein, et al., Eur. Phys. J. A, 2012, vol. 48, p. 52.
4. Y. I. Gusev, et al., Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., 2016, vol. 80, no.8, p. 875.

ЗАМЕТКИ ОБ ОБРАТНОМ КОМПТОНОВСКОМ РАССЕЙЯНИИ

К. А. Борников, Ю. В. Попов*, И. П. Волобуев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

site@sinp.msu.ru

popov@srd.sinp.msu.ru

Рассматриваются некоторые кинематические условия обратного комптоновского рассеяния фотонов на релятивистских электронах и поляризации сталкивающихся частиц, которые влияют на величину дифференциального сечения процесса в зависимости от угла рассеянного фотона. Обнаружено сильное влияние на величину сечения спиральностей электрона и фотона. В ультрарелятивистском случае обнаружен также удивительный эффект почти двукратного роста сечения при рассеянии фотона в направлении импульса начального электрона, когда начальный импульс фотона перпендикулярен этому импульсу. При этом рост энергии фотона практически такой же, как при столкновении встречных пучков.

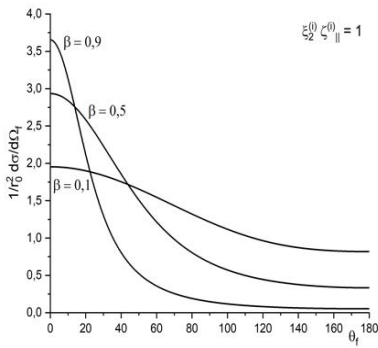


Рис. 1

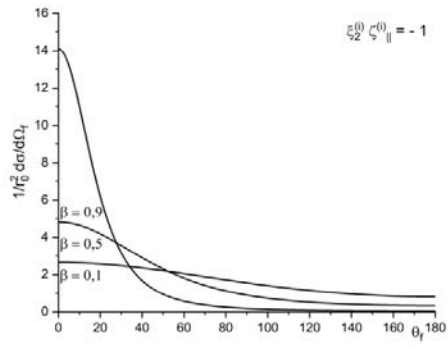


Рис. 2

В качестве иллюстрации на Рис. 1 представлены сечения, когда спиральности электрона и фотона одинаковы, а на Рис. 2 спиральности отличаются знаком. Энергия фотона 150 кэВ, столкновение лобовое. На рисунках параметр $\beta = v/c < 1$ обозначает отношение скорости электрона к скорости света. Разница сечений в пике при больших β практически четырехкратная.

NOTES ON INVERSE COMPTON SCATTERING

К. А. Bornikov, Yu. V. Popov*, I. P. Volobuev

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University,
119991, Moscow, Leninskiye gory, 1, Russia
site@sinp.msu.ru
popov@srd.sinp.msu.ru

Kinematic conditions of the inverse Compton scattering of photons at relativistic electrons and the polarizations of colliding particles are considered, which affect the value of the differential cross section of the process depending on the angle of the scattered photon. A strong effect on the cross section of the helicities of the electron and photon is found. In the ultrarelativistic limit, a surprising effect of an almost twofold increase in the cross section has been also found, when a photon is scattered in the direction of the momentum of the initial electron in the case, where the initial momentum of the photon is transverse to the electron momentum. In this case, the growth of the photon energy is practically the same as in the case of the head-on collision of beams.

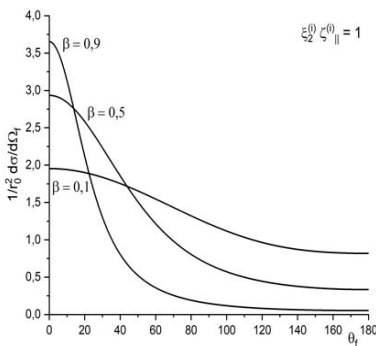


Fig. 1

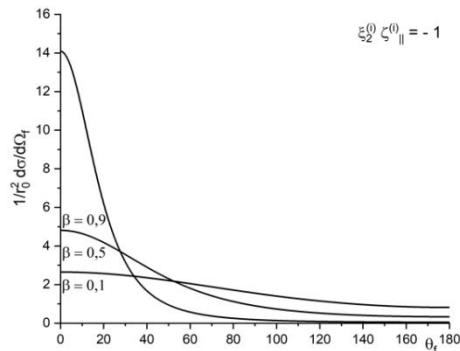


Fig. 2

As an illustration, in Fig. 1 cross sections are shown in the case, where the helicities of the electron and photon are the same, and in Fig. 2 the helicities differ in sign. The photon energy is 150 keV and the head-on collision. In the figures, the parameter $\beta = v/c < 1$ denotes the ratio of the electron speed to the speed of light. At large β , the cross section difference at the peak is almost fourfold.

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР-МИШЕНЬ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИЙ С ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ

**С. И. Поташев*, А. А. Афонин, Ю. М. Бурмистров, А. И. Драчев, А. А. Каспаров,
С. Х. Караевский, В. Н. Пономарев, В. И. Разин**

ФГБУН Институт ядерных исследований РАН, Москва,
117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а.
Тел.: (+7)4991357760 (Москва), (+7)4958504201 (Троицк),
Факс: (+7)4991352268 (Москва), (+7)4958504228 (Троицк)
E-mail: potashev@inr.ru

Для исследования реакций взаимодействия быстрых нейтронов с энергией свыше 1 МэВ с легкими ядрами, в частности, с ядром ^{10}B был разработан позиционно-чувствительный детектор, являющийся одновременно мишенью нейтронов [1]. Данный детектор содержит катод со слоем ^{10}B и систему из проволочных катодов, сеток и анода, которые позволяют определить потери энергии и угол вылета вторичного ядра, в частности, ядра ^3H . Это позволяет определить энергию быстрого нейтрона [2]. Данный детектор является развитием созданного нами ранее детектора, с помощью которого определялось не только пространственное распределение, но и максимальная энергия нейтронного потока [3].

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика”.

Список литературы

1. Поташев С. И., Драчев А. И., Каспаров А. А., Бурмистров Ю. М. Позиционно-чувствительный детектор медленных и быстрых нейтронов. Патент Российской Федерации на изобретение №2788834. Дата гос. регистрации в государственном реестре изобретений 24.01.2023. Заявка № 2022111299. Приоритет изобретения 26.04.2022.

2. Каспаров А. А., Поташев С. И., Афонин А. А., Бурмистров Ю. М., Драчев А. И. Расчет эффективности и энергетического разрешения при разработке детектора быстрых нейтронов с 10В-конвертером // Известия РАН, Серия физическая, 2021, Т.85, № 5, С. 694–697.

3. Поташев С. И., Афонин А. А., Бурмистров Ю. М., Драчев А. И., Конобеевский Е. С., Марин В. Н., Мешков И. В., Караевский С. Х., Каспаров А. А. и др. О возможности контроля максимальной энергии быстрых нейтронов по амплитудным спектрам от 10В-детектора. // Известия РАН. Серия физическая, 2021, Т. 85, № 10, С. 1385–1388.

POSITION-SENSITIVE FAST NEUTRON TARGET DETECTOR FOR STUDYING REACTIONS WITH LIGHT NUCLEI

**S. I. Potashev*, A. A. Afonin, Yu. M. Burmistrov, A. I. Drachev, A. A. Kasparov,
S. Kh. Karaevsky, V. N. Ponomarev, V. I. Razin**

Institute for Nuclear Research of Russian academy of sciences, Moscow,
prospekt 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow 117312.
Phone: (+7)4991357760 (Moscow), (+7)4958504201 (Troitsk),
Fax: (+7)4991352268 (Moscow), (+7)4958504228 (Troitsk)
E-mail: potashev@inr.ru

Position-sensitive detector was developed for studying interaction of fast neutrons at above 1 MeV on light nuclei, in particular, on ^{10}B nucleus. It is a both of neutron target and detector [1]. The detector contains cathode with ^{10}B layer and system of wire cathodes, grids, and anode. It gives a possibility to determine energy loss and emission angle of secondary nucleus, in particular, ^3H nucleus and determine fast neutron energy [2]. It is development of the detector which has been created earlier

and was applied for not only the spatial distribution, but also the maximum energy of the neutron flux determination [3].

The work was carried out within framework of scientific program of National Center for Physics and Mathematics on the direction No. 6 “Nuclear and radiation physics”.

References

1. Поташев С. И., Драчев А. И., Каспаров А. А., Бурмистров Ю. М. Позиционно-чувствительный детектор медленных и быстрых нейтронов. Патент Российской Федерации на изобретение №2788834. Дата гос. регистрации в государственном реестре изобретений 24.01.2023. Заявка №2022111299. Приоритет изобретения 26.04.2022.

2. Каспаров А. А., Поташев С. И., Афонин А. А., Бурмистров Ю. М., Драчев А. И. Расчет эффективности и энергетического разрешения при разработке детектора быстрых нейтронов с ^{10}B -конвертером // Известия РАН, сер. физическая, 2021, Т. 85, № 5, С. 694–697; Efficiency and energy resolution calculation under developing of fast neutron detector with ^{10}B -converter A. A. Kasparov, S. I. Potashev, A. A. Afonin, Yu. M. Burmistrov, A. I. Drachev

3. Potashev S. I., Afonin A. A., Burmistrov Yu. M., et al. Feasibility of monitoring the maximum energy of fast neutrons using pulse-height spectra from a ^{10}B detector. Bull. Russian Academy of Sci.: Physics, V. 85, No. 10, P. 1068–1071, 2021.

АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ НАРАСТАНИЯ ДЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА CLYC

П. С. Прусаченко, Т. Л. Бобровский

Физико-энергетический институт им. Лейпунского (ФЭИ), пл. Бондаренко 1,
г. Обнинск, 249033, Россия;
E-mail: pprusachenko@ippe.ru

Сцинтилляционные детекторы на основе кристаллов $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6(\text{Ce})$, используемые для регистрации нейтронов, обладают рядом преимуществ перед другими литий-содержащими кристаллами. Вместе с тем, в настоящий момент плохо изучены его временные характеристики, которые могут повлиять на применения данного типа детекторов для время-пролетных приложений. В настоящей работе выполнено исследование времени нарастания для сигналов от CLYC, полученных при регистрации заряженных частиц разных типов. Показано, что существует систематическая разница во времени нарастания для сигналов, соответствующих γ -квантам и продуктам ядерных реакций под действием нейтронов. Было показано, что данная разница оказывает существенное влияние на точность измерений при определении временной отметки методом следящего порога.

ANALYSIS OF THE RISE TIME FOR THE CLYC-BASED SCINTILLATION DETECTOR

P. S. Prusachenko, T. L. Bobrovskiy

I.I. Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering (IPPE), Bondarenko sq. 1,
Obninsk, 249033, Russia
E-mail: pprusachenko@ippe.ru

Scintillation detectors based on $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6(\text{Ce})$ crystals used for the neutron detection have a number advantages in comparison with other Li-contained crystals. At the same time, the timing properties of this scintillator, which can affect using this type of scintillators to the time-of-flight

application, are poorly known. In this work, the rise time of the signals corresponding to the different types of the charged particles was studied. It was shown that there is systematic difference of the rise times between the signals corresponding to the γ -rays and the products of the neutron-induced reaction in the scintillator. It was shown that this difference significantly affect the accuracy of the measurements at the time mark determination by the constant fraction timing method.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗА ИЗОТОПА УГЛЕРОД-11 ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНИ АТОМАМИ ДЕЙТЕРИЯ

А. И. Пушкарев, Ю. И. Егорова, С. С Полисадов

Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30, aipush@mail.ru

Короткоживущие изотопы широко используются в позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ). ПЭТ позволяет отслеживать распределение в организме биологически активных соединений, меченных позитрон-излучающими изотопами. В ПЭТ применяют изотопы фтор-18, кислород-15, азот-13 и углерод-11. Использование изотопа углерод-11 с периодом полураспада 20 минут вместо изотопа фтор-18 ($T_{1/2} \approx 110$ минут) позволяет значительно снизить дозовую нагрузку на пациента. Короткоживущий изотоп углерод-11 перспективен для приготовления различных радиофармпрепаратов, поскольку им можно заместить стабильный изотоп углерод-12 в любой биомолекуле. Однако вследствие короткого периода полураспада применение изотопа углерод-11 требует территориального объединения процессов получения изотопа, приготовления радиофармпрепарата и проведения диагностики. Как следствие, использование короткоживущих изотопов ограничивается местами их производства. Разработка компактных и недорогих генераторов позволила бы осуществлять синтез изотопов с очень коротким периодом полураспада, расширяя использование радиофармпрепаратов. Поэтому разработка новых и эффективных методов синтеза изотопов в настоящее время становится ключевой задачей ядерной медицины.

В работе представлены результаты моделирования синтеза изотопа углерод-11 при облучении мишени, содержащей бор-10, дейтронами и атомами дейтерия. Выполнен расчет интегрального выхода изотопа углерод-11 при облучении мишени на ускорителе ТЕМП-6 (0.2–0.3 МэВ, 150 нс). Получено, что повышение эффективности упругого столкновения и снижение электронных потерь энергии при облучении атомами дейтерия мишени из природного бора могут увеличить интегральный выход атомов углерод-11 за импульс с $1.5 \cdot 10^6$ до $2.5 \cdot 10^{11}$. При работе ускорителя ТЕМП-6 достаточно несколько импульсов (менее 1 минуты) для синтеза изотопа, необходимого для наработки радиофармпрепарата для одного пациента. Энергия атомов дейтерия, равная 0.2–0.3 МэВ, является оптимальной для инициирования ядерной реакции синтеза изотопа углерод-11 при облучении мишени, содержащей бор-10.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00016, <https://rscf.ru/project/23-29-00016>

MODELING OF CARBON-11 ISOTOPE SYNTHESIS UNDER IRRADIATION OF A TARGET WITH DEUTERIUM ATOMS

A. Pushkarev, Yu. Egorova, S. Polisadov

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Lenin Ave. 30
aipush@mail.ru

Short-lived isotopes are widely used in positron emission tomography (PET). PET allows tracking the distribution of biologically active compounds labeled with positron-emitting isotopes in the body. Fluorine-18, oxygen-15, nitrogen-13 and carbon-11 isotopes are used in PET. The use of the

carbon-11 isotope with a half-life of 20 minutes instead of the fluorine-18 isotope ($T_{1/2} \approx 110$ minutes) can significantly reduce the dose burden on the patient. The short-lived carbon-11 isotope is promising for the preparation of various radiopharmaceuticals, since it can replace the stable carbon-12 isotope in any biomolecule. However, due to the short half-life, the use of the carbon-11 isotope requires territorial unity of the isotope production processes, preparation of radiopharmaceuticals and diagnostics. Consequently, the use of short-lived isotopes is limited to their production sites. The development of compact and inexpensive generators would allow the synthesis of isotopes with a very short half-life, expanding the use of radiopharmaceuticals. Therefore, the development of new and effective methods of isotope synthesis is currently becoming a key task of nuclear medicine.

The paper presents the results of modeling the synthesis of the carbon-11 isotope under irradiation of a boron-10 target with deuterium and deuterium atoms. The integral yield of the carbon-11 isotope was calculated when the target was irradiated with a TEMP-6 accelerator (0.2–0.3 MeV, 150 ns). It is found that increasing the efficiency of elastic collision and reducing electronic energy losses when irradiated with deuterium atoms of a target from natural boron can increase the integral yield of carbon-11 atoms per pulse from $1.5 \cdot 10^6$ to $2.5 \cdot 10^{11}$. When the TEMP-6 accelerator is operating, several pulses (less than 1 minute) are sufficient for the synthesis of an isotope necessary for the development of a radiopharmaceutical for one patient. The energy of deuterium atoms equal to 0.2-0.3 MeV is optimal for initiating a nuclear reaction of carbon-11 isotope synthesis when irradiating a target containing boron-10.

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 23-29-00016, <https://rscf.ru/project/23-29-00016>

МЕТОД АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СЛУЧАЙНЫХ ВЕКТОРОВ

Н. М. Близняков, В. М. Вахтель, Д. Е. Костомаха, В. А. Работкин

ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет,
394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, Россия
E-mail: vakhtel@phys.vsu.ru

Показано, что случайные последовательности выборок (k_1, \dots, k_n) объемом n из отсчетов $0 \leq k < l$ зарегистрированных частиц преобразованные в последовательности случайных векторов $(CBP) = v(\cdot) = (v_0, \dots, v_l)_j$, $n = \sum_{i=0}^l v_i$, находящиеся во взаимно однозначном соответствии с их идентификаторами $I(v(\cdot)_j)$ после ранжирования по I_j представляют многомодальные распределения сгруппированных локальных пиков [1] позволяют прогнозировать характеристики как отдельных CBP , так и образованных ими пиков в условиях малой статистики $n \leq 10$, $\bar{k} < 5$. Предложенный метод позволяет обосновывать реализацию больших уклонений одиночных $k_i \gg \bar{k}$ и их упорядоченных совокупностей. Метод эффективен в условиях измерений больших последовательностей из $M \gg 1$, однородных, близких и неоднородных CBP .

Список литературы

1. Метод дискретного функционала и проекций функций дробного порядка центральных моментов для анализа однородностей дискретных случайных векторов / Н. М. Близняков, В. М. Вахтель, Д. Е. Костомаха, В. А. Работкин // : Воронежская зимняя математическая школа С. Г. Крейна - 2022: материалы Международной конференции. Воронеж, 2022 . С. 27–33.

METHOD OF ANALYSIS AND PREDICTION OF RANDOM VECTOR SEQUENCES CHARACTERISTICS

N. M. Blizniakov, V. M. Vahtel, D. E. Kostomakha, V. A. Rabotkin

Voronezh State University, 394018, Voronezh, University square, 1, Russia, E-mail:
vakhtel@phys.vsu.ru

It is demonstrated that random sequences of samples (k_1, \dots, k_n) of volume n from counts $0 \leq k < l$ of registered particles transformed into sequences of random vectors $(RV) = v(\cdot) = (v_0, \dots, v_l)_j$ $n = \sum_{i=0}^l v_i$, which are in mutual univocal correspondence with their identifiers after ranking according to represent multimodal distributions of grouped local peaks [1] enable us to predict characteristics of both individual RV and peaks formed by them in conditions of small statistics $n \leq 10$, $\bar{k} < 5$.

The proposed method makes it possible to justify the implementation of large deviations of single $k_i \gg \bar{k}$ and their ordered populations. The method is effective under conditions of measuring large sequences of $M \gg 1$ of homogeneous, close and inhomogeneous RVs .

References

1. Method of discrete functional and projections of fractional order functions of central moments for the analysis of homogeneities of discrete random vectors / N. M. Blizniakov, V. M. Vahtel, D. E. Kostomakha, V. A. Rabotkin // : Voronezh Winter Mathematical School of S. G. Krein – 2022: proceedings of the International Conference. Voronezh, 2022. pp. 27–33.

ФОТОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ С ВЫЛЕТОМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ РАДИОИЗОТОПОВ

П. Д. Ремизов*, М. В. Желтоножская, А. П. Черняев, Д. А. Юсюк

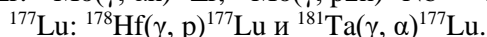
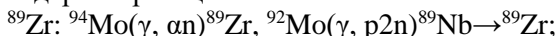
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
*pd.remizov@physics.msu.ru, 89175069070

Традиционно радиоизотопы для медицины нарабатываются на исследовательских ядерных реакторах и на ускорителях тяжёлых заряженных частиц. Тем не менее, в последние годы появился целый ряд исследований, посвященный разработке методов получения медицинских изотопов в фотоядерных реакциях на ускорителях электронов. Так как в фотоядерных реакциях с вылетом заряженных частиц образуются изотопы химических элементов, отличных от материалов мишени, то возможно получение продукта с высокой радионуклидной чистотой и удельной активностью.

Нами проводятся исследования получения перспективных медицинских радиоизотопов ^{89}Zr и ^{177}Lu на ускорителях электронов. Для этого была проведена серия облучений мишеней молибдена, гафния и тантала, как естественного изотопного состава, так и обогащенные по изотопам на ускорителях электронов с энергиями 20, 40 и 55 МэВ. Облученные мишени исследовались на гамма-спектрометрах с детекторами из сверхчистого германия.

В результате были получены средневзвешенные по потоку тормозного излучения сечения образования целевых радионуклидов ^{89}Zr и ^{177}Lu . Экспериментальные данные сравнивались с результатами теоретических расчётов в рамках программного кода TALYS1.96. Кроме того, был проанализированы другие образующиеся радиоактивные и стабильные

изотопы. В итоге, как наиболее перспективные для промышленного производства, были выделены следующие фотоядерные реакции:



Полученные результаты обсуждаются. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-22-20119).

PHOTONUCLEAR REACTIONS WITH THE EMISSION OF CHARGED PARTICLES FOR THE PRODUCTION OF MEDICAL RADIOISOTOPES

P. D. Remizov*, M. V. Zheltonozhskaya, A. P. Chernyaev, D. A. Iusiuk

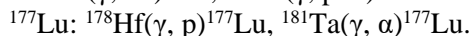
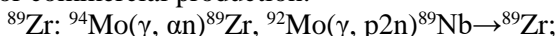
Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory

*pd.remizov@physics.msu.ru, 89175069070

Traditionally, medical radioisotopes are produced in research reactors and heavy particle accelerators. Nevertheless, a number of studies dealing with the production of medicinal isotopes in photonuclear reactions at electron accelerators have been published in recent years. Photonuclear reactions involving the emission of charged particles produce isotopes of chemical elements that are different from the target substance, so it is possible to obtain products with high radionuclide purity and specific radioactivity.

We are studying the production of promising medical radioisotopes ^{89}Zr and ^{177}Lu at electron accelerators. For this purpose, a series of irradiations of targets of molybdenum, hafnium and tantalum, both of natural isotopic composition and enriched in isotopes, was carried out at electron accelerators with energies of 20, 40, and 55 MeV. Irradiated targets were analyzed with a gamma spectrometer equipped with a high-purity germanium detector.

The production cross sections of the promising radionuclides ^{89}Zr and ^{177}Lu were determined weighted by bremsstrahlung flux. Experimental data were compared with the results of theoretical calculations gained using the program code TALYS1.96. In addition, we analyzed the radioisotope and stable isotope compositions obtained. As a result, the following photonuclear reactions were chosen as most promising for commercial production:



The results are discussed. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project number 22-22-20119).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ УРАНА НА ГРАНИЦЕ ПОЛЯРНОЙ И НЕПОЛЯРНОЙ СРЕДЫ

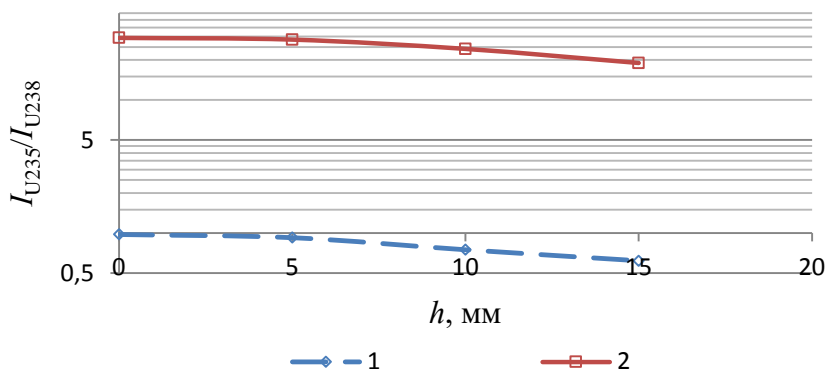
Д. А. Румянцева, В. Г. Зиновьев, И. А. Митропольский

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, г. Гатчина, Россия

E-mail: rumyantseva_da@npi.nrcki.ru

Для увеличения чувствительности гамма-спектрометрического метода исследования состава урансодержащих растворов использовалась адсорбция комплекса $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}$ на поверхности полипропилена $(\text{C}_3\text{H}_6)_n$ в экстракционной системе на основе раствора азотной кислоты и экстрагента трибутилфосфата (ТБФ). Дифильные молекулы ТБФ являются полярными и поверхностно активными [1]. Взаимодействуя одновременно с полярными и неполярными средами, они накапливаются на границе раздела фаз.

Содержание изотопов урана определялось по отношению площадей пиков полного поглощения гамма-излучения из равновесных цепочек распада урана с атомными номерами 234, 235, 238. Экспериментальная зависимость отношения интенсивностей аналитических линий $I_{185\text{кэВ}}/I_{92\text{кэВ}}$ (линия 1) и $I_{185\text{кэВ}}/I_{1001\text{кэВ}}$ (линия 2) от расстояния h между точкой отбора образца и поверхностью жидкой фазы представлена на рисунке.



Полипропилен (неполярный компонент) прочно удерживает комплекс $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TБФ$ в верхней части на границе раздела полярной и неполярной фаз. При этом более легкие изотопы урана собираются в верхних слоях пленки состоящей из молекул комплекса $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TБФ$. Концентрация увеличилась: по ^{234}U с 0.0016 ± 0.0003 ат.% в исходном растворе до 0.017 ± 0.002 ат.%, по ^{235}U с 0.471 ± 0.007 ат.% в исходном растворе до 1.49 ± 0.02 ат.% [2].

Список литературы

1. Крамаренко Е. Ю., Гордиевская Ю. Д. Принципы самоорганизации в растворах амфифильных молекул. // Москва: Российская академия наук, с. 27, 2017.
2. Зиновьев В. Г., Румянцева Д. А., Митропольский И. А. и др. Способ химического обогащения урана легкими изотопами. // пат. G21C 19/42. RU 2756277 C1, 2021.

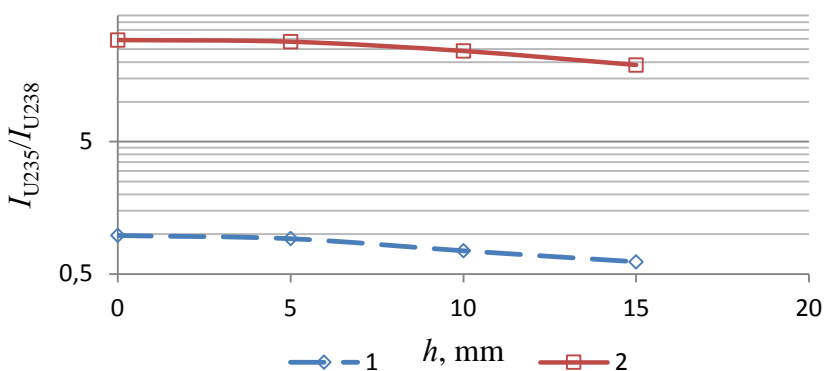
STUDY OF THE DISTRIBUTION OF URANIUM ISOTOPES AT THE BOUNDARY OF POLAR AND NONPOLAR ENVIRONMENTS

D. A. Rumyantseva, V. G. Zinovyev, I. A. Mitropolsky

Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia
E-mail: rumyantseva_da@pnpi.nrcki.ru

To increase the sensitivity of the gamma-spectrometric method for studying the composition of uranium-containing solutions, the adsorption of the $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TBP$ complex was used on the surface of polypropylene $(C_3H_6)_n$ in an extraction system based on a solution of nitric acid and tributyl phosphate (TBP) as the extractant. Diphilic TBP molecules are polar and surface active [1]. Interacting simultaneously with polar and non-polar media, they accumulate at the phase interface.

The content of uranium isotopes was determined by the ratio of the peak areas of total absorption of gamma radiation from the equilibrium decay chains of uranium with atomic numbers 234, 235, 238. The experimental dependence of the ratios $I(185 \text{ keV}, ^{235}U)/I(92 \text{ keV}, ^{238}U)$ (line 1) and $I(185 \text{ keV}, ^{235}U)/I(1001 \text{ keV}, ^{238}U)$ (line 2) of the intensities of the uranium analytical lines on the distance h between the sampling point and the surface of the liquid phase is presented on the figure.



Polypropylene (non-polar component) strongly holds the $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{TBP}$ complex in the upper part at the interface of the polar and non-polar phases. At the same time, lighter isotopes of uranium are collected in the upper layers of a film consisting of molecules of the $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{TBP}$ complex. The concentration increased: by ^{234}U from 0.0016 ± 0.0003 at.% in the initial solution to 0.017 ± 0.002 at.%, according to ^{235}U from 0.471 ± 0.007 at.% in the initial solution to 1.49 ± 0.02 at.% [2].

References

1. Kramarenko E. Yu., Gordievskaya Yu. D. Principles of self-organization in solutions of amphiphilic molecules. // Moscow: Russian Academy of Sciences, p. 27, 2017.
2. Zinovyev V. G., Rumyantseva D. A., Mitropolsky I. A. et al. A method of chemical enrichment of uranium with light isotopes. // Patent G21C 19/42. RU 2756277 C1, 2021.

РАССМОТРЕНИЕ НЕЙТРИННОГО КАНАЛА НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70 С ОТКЛОНЕНИЕМ ПУЧКА РОДИТЕЛЬСКИХ ЧАСТИЦ

Ф. Н. Новоскольцев¹, Р. Ю. Синюков^{1*}, А. А. Соколов^{1}**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ» имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1, тел. +7 (4967) 71-36-23, факс +7 (4967) 74-28-24, e-mail: fgbu@ihep.ru
*e-mail: roman.sinyukov@ihep.ru, **e-mail: sokolov_a@ihep.ru

Рассмотрена принципиальная оптическая схема канала для формирования нейтринного пучка на базе ускорительного комплекса У-70. Для выделения требуемого импульсного интервала π -мезонов предлагается использовать двухмагнитную систему с «полевой» линзой с отклонением пучка родительских частиц в одну сторону и полной компенсацией дисперсии. В данной схеме распадная часть канала повернута относительно направления наведения первичного протонного пучка на мишень. Обсуждаются основные расчётные характеристики пучка нейтрино на дальнем детекторе на расстоянии 2595 км от конца распадного участка канала, а также параметры родительских π -мезонов в начале распадного участка.

CONSIDERATION OF THE NEUTRINO CHANNEL AT THE U-70 ACCELERATOR COMPLEX WITH A DEFLECTED PARENT PARTICLE BEAM

F. N. Novoskoltsev, R. Yu. Sinyukov^{1*}, A. A. Sokolov^{1}**

¹National Research Centre "Kurchatov Institute" – IHEP, 1, Nauki Sq., Protvino, Moscow Region, 142281, Russia, +7 (4967) 71-36-23, fax +7 (4967) 74-28-24, e-mail: fgbu@ihep.ru
*e-mail: roman.sinyukov@ihep.ru, **e-mail: sokolov_a@ihep.ru

Principle optical scheme of the neutrino beam production channel based on the accelerator complex U-70 is considered. In order to extract the required pulse interval of π -mesons, a two-magnetic system with a "field" lens with a one-way deflection of the parent particle beam and full compensation of the dispersion is proposed. In this scheme the decay part of the channel is deflected with respect to the direction of the primary proton beam aiming at the target. The main computational characteristics of the neutrino beam at the far detector at a distance of 2595 km from the end of the decaying part of the channel as well as the parameters of the parent π mesons at the beginning of the decaying part are discussed.

ЯДЕРНО-СКАНИРУЮЩИЙ МИКРОЗОНД В ИССЛЕДОВАНИИ ЭПИСЛОЕВ КАРБИДА КРЕМНИЯ

И. А. Карпов¹, М. Э. Бузоверя¹, Д. А. Скворцов^{2,3}, Р. И. Сидоров^{2,3}, В. А. Неверов^{2,3}

¹ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ»;

²ФБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева»;

³НИЛ «Синтез и обработка монокристаллов карбида кремния»

Эффективность радиоэлектронных устройств, особенно работающих в экстремальных условиях (высокие температуры, радиация и др.), существенно зависит от повышения быстродействия, энергосбережения и надежности твердотельной элементной базы. Одним из материалов, отвечающим столь жестким требованиям, является карбид кремния 4H-политипа (4H-SiC). Отработка технологии воспроизводимого роста эпитаксиальных слоев (ЭС) SiC является индивидуальной задачей для установок конкретного типа и требует детального учета факторов, определяющих достижимые параметры ЭС SiC [1]. В этой связи весьма актуальным является применение современных высокоразрешающих методов характеристики ЭС SiC. Цель работы – исследование возможности использования установки «Ядерно-сканирующий микронзонд – ЭПП-10» (ЯСМЗ) в оценке качества гомоэпитаксиальных слоев, полученных сублимационным сэндвич-методом (ССМ) в вакууме на монокристаллической подложке 4H-SiC. В работе приведены результаты ЯСМЗ-исследования методом RBS (обратного резерфордского рассеяния) поверхностей образцов ЭС 4H-SiC, полученных в установке высокотемпературного роста с индукционным нагревателем Basic-T. Получен элементный состав и элементные карты серии образцов (рис.). Выявлены и описаны закономерности распределения основных элементов по толщине ЭС 4H-SiC.

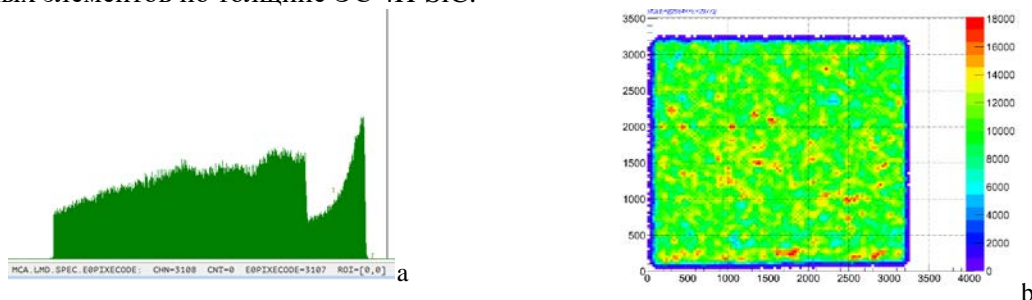


Рисунок: а-RBS -спектр образца SiC; б- элементная карта кремния

Анализ состояния поверхностей образцов, поперечных шлифов ЭС-подложка и режимов синтеза показал, что увеличение содержания кремния (Si) в верхних слоях некоторых образцов предшествует формированию высокодефектных слоев 4H-SiC. Внедрение избыточного Si, в первую очередь, может быть связано с динамикой изменения стехиометрии молекулярных компонентов в паровой фазе при сублимирующем источнике SiC в сторону обогащения кремнием (система SiC-Si). Согласно литературе [2], при температурах 1700 – 2100 °С в газовой фазе, соответствующей SiC-Si системе, могут формироваться кластеры Si, которые могут выпадать на ЭС в виде капель или образовывать агрегаты на поверхности растущего слоя. Через некоторое время кластеры Si испаряются, оставляя следы в виде ямок на поверхности ЭС или формируя характерные микропоровые дефекты в толщине слоев.

Список литературы

[1] Афанасьев А. В. и др. Анализ эпитаксии карбида кремния из газовой фазы как базового процесса в технологии силовой электроники // Известия вузов. 2020. 25(6). с 483–496.

[2] Vasiliauskas R. et. al. Nucleation Control of Cubic Silicon Carbide on 6H- Substrates // Cryst. Growth Des. 2012. Vol. 12. p. 197–204.

NUCLEAR-SCANNING MICROPROBE IN THE STUDY OF SILICON CARBIDE EPITAXIAL LAYERS

I. A. Karpov¹, M. E. Buzoverya¹, D. A. Skvortsov², R. I. Sidorov², V. A. Neverov^{2,3}

(1) Federal State Unitary Enterprise RFNC VNIIEF;

(2) National Research Mordovia State University,

(3) Research Laboratory “Synthesis and Processing of Silicon Carbide Single Crystals”

The efficiency of electronic equipments, especially those operating in extreme conditions (high temperatures, radiation, etc.), significantly depends on the switching speed, energy saving and reliability of solid-state electronic devices. One of the materials that meet such stringent requirements is silicon carbide 4H polytype (4H-SiC). Development of the technology for the reproducible growth of SiC epitaxial layers (EL) is an individual task for growth setups of a particular type and requires detailed consideration of the factors that determine the achievable parameters of EL SiC [1]. In this regard, the use of modern high-resolution methods for characterizing of the EL SiC is very actual. The purpose of this work is to study the possibility of using the Nuclear Scanning Microprobe - EGP-10 (NSMP) facility in assessing the quality of homoepitaxial layers obtained by the sublimation sandwich method (SSM) in vacuum on a single-crystal 4H-SiC substrate. The paper presents the results of the NSMP study using the RBS (Rutherford backscattering) method of the surfaces EL 4H-SiC samples obtained in a high-temperature growth setup (Basic-T) with induction heater. The elemental composition and elemental maps of a series of samples were obtained (Fig. 1). Regularities in the distribution of the main elements over the thickness of the EL 4H-SiC are revealed and described.

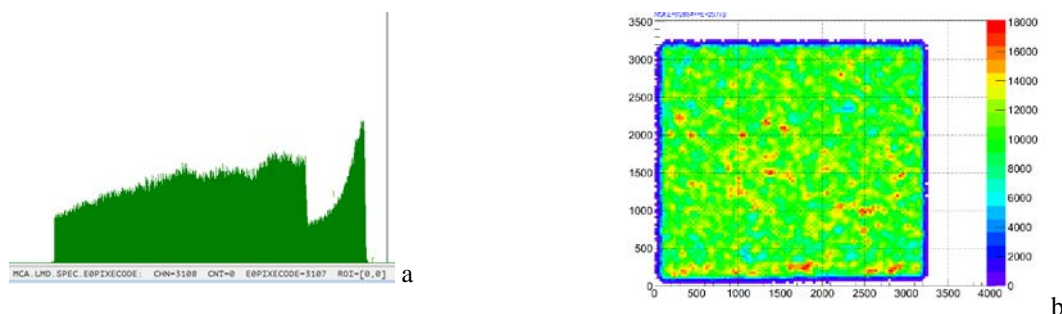


Fig. a-RBS spectrum of the SiC sample; b- silicon element map of the SiC sample

An analysis of the state EL surfaces, cross sections of the EL–substrate compositions, and growth modes showed that an increase in the silicon (Si) content in the upper layers of some samples precedes the formation of highly defective 4H-SiC layers. The introduction of excess Si, first of all, can be associated with the dynamics of changes in the stoichiometry of molecular components in the vapor phase with a subliming source of SiC towards enrichment with silicon (SiC-Si system). According to the literature [2], at temperatures of 1700–2100 °C, Si clusters can form in the gas phase of the corresponding SiC–Si system, which can precipitate on the EL in the form of drops or form aggregates on the surface of the growing layer. After some time, the Si clusters evaporate, leaving traces in the form of pits on the EL surface or forming characteristic micropore defects in the thickness of the layers.

References

1. Afanasiev A. V. and other Analysis of the epitaxy of silicon carbide from the gas phase as a basic process in the technology of power electronics / *Izvestiya vuzov*. 2020, 25(6), pp. 483–496.
2. Vasiliauskas R. et. al. Nucleation Control of Cubic Silicon Carbide on 6H-Substrates / *Cryst. Growth Des.* 2012, Vol.12, p. 197–204.

АКТИВАЦИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ НЕЙТРОНОВ С МОНИТОРИНГОМ ПУЧКА

В. М. Скоркин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований
Российской академии наук,
117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, дом 7а,
тел.: +74991354043, факс: +74991352268, e-mail: skorkin@inr.ru

На импульсном источнике нейтронов проведено облучение композитных материалов, используемых в ядерной медицине и в производстве радиационно-защитной одежды [1, 2]. Композитные материалы со слоистой структурой содержали иттербиевые и свинцовые компоненты для преобразования внешнего радиационного облучения во вторичное низкоэнергетическое излучение. Поток нейтронов в облучательном канале источника РАДЭКС создавался импульсным пучком линейного ускорителя протонов с энергией 209 МэВ при среднем токе 30 мкА. Захват тепловых нейтронов в 1 мг ^{168}Yb образца создавал ^{169}Yb гамма источник для исследования радиобиологической эффективности излучения композита в локальной брахитерапии. После активации свинцового композита проводилось изучение его состава и измерение радиационно-защитных свойств. В процессе облучения поток нейтронов в облучательном канале контролировался в режиме реального времени двумя мониторами импульсного пучка на основе детектора быстрых нейтронов УДБН-02 и радиометра МКС-01Р. Спектр фотонов иттербиевого источника был измерен с помощью HPGe детектора. Дозовое распределение гамма излучения в водном фантоме исследовался с использованием пленки MD-55. Активированные образцы свинцового композита измерялись на радиометре МКС-01Р.

Список литературы

1. Piermattei A., Azario L., and Montemaggi P. Implantation guidelines for ^{169}Yb seed interstitial treatments // *Phys. Med. Biol.* 1995. Vol. 40. P. 1331 – 1338.
2. Барбулев С. Я., Перцовский Г. А., Логинов В. И. и др. Радиационно-защитный полукомбинезон. Патент Российской Федерации на полезную модель № 53113. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 10.05.2006 г.

ACTIVATION OF COMPOSITE MATERIALS ON A PULSED NEUTRON SOURCE WITH BEAM MONITORING

V. M. Skorkin

Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences,
60-letiya Oktyabrya prospekt 7a, Moscow 117312, Russia.
Phone: +74991354043, fax: +74991352268, e-mail: skorkin@inr.ru

A pulsed neutron source was used to irradiate composite materials used in nuclear medicine and in the production of radiation-protective clothing [1, 2]. Composite materials with a layered structure contained the ytterbium and lead components to convert external radiation exposure into secondary low-energy radiation. The neutron flux in the irradiation channel of RADEX source was created by a pulsed beam of a linear proton accelerator with an energy of 209 MeV at an average current of 30 μA . The capture of thermal neutrons in 1 mg ^{168}Yb sample created ^{169}Yb gamma source for studying the radiobiological efficiency of composite radiation in local brachytherapy. After activation of the lead composite, its composition and radiation-protective properties were studied. During irradiation, the neutron flux in the irradiation channel was monitored in real time by two pulsed beam monitors based on the UDBN-02 fast neutron detector and the MKS-01R radiometer. The photon spectrum of the ytterbium source was measured using HPGe detector. The dose distribution of gamma radiation in the water phantom was studied using MD-55 film. The lead composite activation was measured on MKS-01R radiometer.

References

1. Piermattei A., Azario L., and Montemaggi P. Implantation guidelines for ^{169}Yb seed interstitial treatments // Phys. Med. Biol. 1995. Vol. 40. P. 1331 – 1338.
2. Barbulev S. Ya., Pertsovsky G. A., Loginov V. I. etc. Radiation-protective semi-overalls. Patent of the Russian Federation for utility model No. 53113. Registered in the State Register of Utility Models of the Russian Federation on May 10, 2006.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАСТЕРНОГО РАСПАДА БЕРИЛЛИЯ В ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ

С. И. Поташев, В. М. Скоркин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук,
117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, дом 7а,
тел.: +74991354043, факс: +74991352268, e-mail: skorkin@inr.ru

Для исследования кластерной структуры ^9Be проведено моделирование неупругого рассеяния быстрых нейтронов на бериллии с регистрацией двухслойной ионизационной камерой продуктов реакций $n, p, \alpha, ^6\text{He}, ^7\text{Li}$. В настоящее время разрабатывается двухслойный позиционно-чувствительный детектор на основе многопроволочного детектора медленных и быстрых нейтронов с активным борным слоем [1]. Проектируемый детектор должен содержать две кремниевые подложки с бериллиевым слоем-мишенью и слоем бора-10 для регистрации быстрых нейтронов. Конструкция обеспечивает поглощение заряженных фрагментов реакций в первой половине детектора и позволяет измерять потери энергии и угол вылета частиц. Результаты моделирования показывают, что регистрация рассеянных нейтронов в совпадении с частицами распада возбужденных состояний позволяет определить вклады различных конфигураций в структуру состояний.

Список литературы

1. Поташев С. И., Драчев А. И., Каспаров А. А., Бурмистров Ю. М. Позиционно-чувствительный детектор медленных и быстрых нейтронов. Патент Российской Федерации на изобретение №2788834. Дата гос. Регистрации в государственном реестре изобретений 24.01.2023. Заявка №2022111299. Приоритет изобретения 26.04.2022.

SIMULATION OF BERYLLIUM CLUSTER DECAY IN IONIZATION CHAMBER UNDER FAST NEUTRON IRRADIATION

S. I. Potashev, V. M. Skorkin

Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences,
60-letiya Oktyabrya prospekt 7a, Moscow 117312, Russia.
Phone: +74991354043, fax: +74991352268, e-mail: skorkin@inr.ru

To study ^9Be cluster structure the inelastic scattering of fast neutrons on beryllium was simulated with the registration of $n, p, \alpha, ^6\text{He}, ^7\text{Li}$ the reaction products by a two-layer ionization chamber. At present, a two-layer position-sensitive detector based on a multiwire detector of slow and fast neutrons with an active boron layer is being developed [1]. The designed detector should contain two silicon substrates with a beryllium target layer and a boron-10 layer for detecting fast neutrons. The design ensures the absorption of charged reaction fragments in the first half of the detector and

makes it possible to measure the energy loss and the angle of emission of particles. The simulation results show that the registration of scattered neutrons in coincidence with particles of the decay of excited states makes it possible to determine the contributions of various configurations to the structure of states.

References

1. Potashev S. I., Drachev A. I., Kasparov A. A., Burmistrov Yu. M. Position-sensitive detector of slow and fast neutrons. Patent of the Russian Federation for the invention No. 2788834. State date Registration in the state register of inventions 01/24/2023. Application No. 2022111299. Invention priority 04/26/2022.

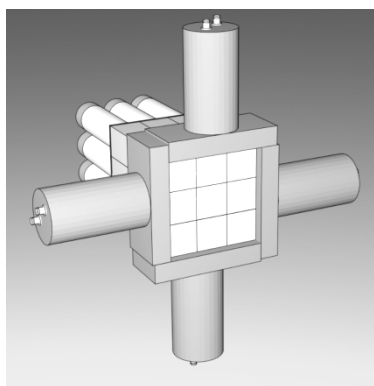
КЛАСТЕР $\text{CeBr}_3\text{-NaI(Tl)}$ ФОСВИЧ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЙТРОНОВ И ГАММА-КВАНТОВ

Ю. Г. Соболев, С. С. Стукалов, Ю. Э. Пенионжкевич, Ж. Зейнулла

141980 Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области,
ул. Жолио-Кюри, д. 6
+7 (49621)6-50-59/6-51-46, post@jinr.ru;
E-mail: sobolev@jinr.ru

Сцинтилляционный спектрометр из $\text{CeBr}_3\text{-NaI(Tl)}$ фосвич-детекторов является одним из элементов установки MULTI [1], созданной в ЛЯР ОИЯИ (Дубна) для измерения полных сечений реакций, сечений групп каналов реакций с ядрами, расположенными вблизи границы нуклонной стабильности, а также изучения процессов их распада.

Спектрометр представляет собой кластер из 9 плотноупакованных $\text{CeBr}_3\text{-NaI(Tl)}$ фосвич детекторов [2], см. Рис. Внешние стороны кристаллов CeBr_3 закрыты пластинами CsI(Tl) , которые вместе с NaI(Tl) компонентами фосвич-детекторов могут работать как детекторы комптоновской защиты.



Кластер 9 $\text{CeBr}_3\text{-NaI(Tl)}$ фосвич-детекторов

В работе представлены характеристики γ -спектрометра (энергетическое разрешение, эффективность регистрации и эффективность в пике полного поглощения, а также коэффициенты подавления комптоновской части энергетического спектра γ -квантов $E_\gamma = 1.17$ и 1.32 МэВ. Измерения параметров регистрации γ -излучения проведены методом меченых γ -квантов и источника ^{60}Co .

В работе представлены результаты измерения эффективности регистрации нейтронов в диапазоне энергий $E_n = 1,0 \div 5,5$ МэВ. Измерения энергетической зависимости эффективности регистрации нейтронов проведены методом меченых нейтронов из источника $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$.

Список литературы

1. I. Siváček, Yu. E. Penionzhkevich, Yu.G. Sobolev, S.S. Stukalov, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 976, 164255, (2020);
2. Zh. Zeinulla, Yu. G. Sobolev, S.S. Stukalov, I. Siváček, Yu.E. Penionzhkevich, Acta Physica Polonica B 14 (4), pp..755-760, (2021).

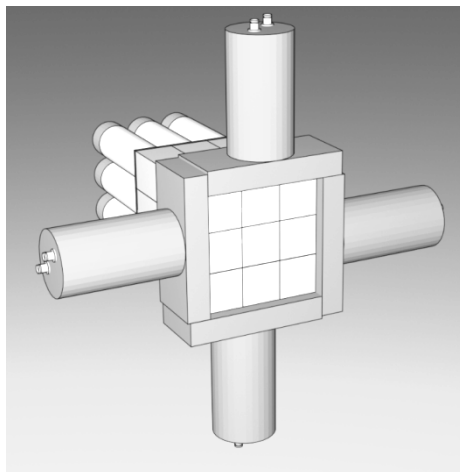
CLUSTER OF CeBr₃-NaI(Tl) PHOSWICH DETECTORS FOR NEUTRONS AND GAMMA QUANTA MEASURING

Yu.G. Sobolev, S.S. Stukalov, Yu.E. Penionzhkevich, Zh. Zeinulla

Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia
+7 (49621)6-50-59/6-51-46, post@jinr.ru;
E-mail: sobolev@jinr.ru

The scintillation spectrometer based on CeBr₃-NaI(Tl) phoswich-detectors is one of the elements of the MULTI setup [1] designed at the FLNR JINR (Dubna) for measuring the total reaction cross sections, cross sections of group reaction channels in the reaction with nuclei located at the boundary of nucleon stability, as well as studying the processes of their decay.

The spectrometer is a cluster assembled of 9 CeBr₃-NaI(Tl) scintillation phoswich-detectors [2] (see Fig). The outer CeBr₃ sides of the cluster are covered by the CsI(Tl) plates which can operate together with NaI(Tl) components of phoswich-detectors as Compton shield detectors.



Cluster of 9 CeBr₃-NaI(Tl) phoswich detectors

The characteristics of the γ -spectrometer (energy resolution, detection efficiency and peak efficiency, as well as the suppression coefficients for the Compton component of the energy spectra of γ -quanta $E_\gamma = 1.17$ and 1.32 MeV are presented. The measurements were carried out by tagged γ -ray method with ^{60}Co γ -source.

Some results of measurements of neutron detection efficiency at $E_n = 1,0 \div 5,5$ MeV are presented. The measurements of neutron detection efficiency were carried out by method of tagged neutron and $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$ neutron source.

References

1. I. Siváček, Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev, S. S. Stukalov, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 976, 164255, (2020);
2. Zh. Zeinulla, Yu. G. Sobolev, S.S. Stukalov, I. Siváček, Yu. E. Penionzhkevich, Acta Physica Polonica B 14 (4), pp..755-760, (2021).

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ БИООБЪЕКТОВ И МАТЕРИАЛОВ

Студеникин Ф. Р.^{1,2}, Черняев А. П.^{1,2}, Близнюк У. А.^{1,2}, Золотов С. А.^{1,2},
Борщеговская П. Ю.^{1,2}, Ипатова В. С.², Соколов С. А.¹, Кречетов Н. Д.¹

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2, Россия; +74959394946

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
E-mail: f.studenikin@gmail.com

В настоящее время значение радиационных технологий существенно возрастает не только в науке, но и в различных отраслях народного хозяйства и медицинской практике. Радиоизотопы и ускорители заряженных частиц, помимо применения в фундаментальных исследованиях в области атомной и ядерной физики, радиобиологии и радиохимии, широко используются в медицине для лучевой терапии и диагностики, стерилизации объектов трансплантологии, фармацевтических препаратов и медицинских изделий; в экологии для очистки сточных вод, твердых отходов и выбросных газов; в промышленности и сельском хозяйстве для радиационной обработки материалов и пищевых продуктов.

Более чем в 70 странах мира действуют центры промышленной радиационной обработки продуктов питания и медицинских изделий. При обработке ускоренными электронами неизбежна неоднородность облучения объектов, обусловленная характером распределения поглощенной дозы излучения по глубине объекта. Критерием однородности облучения принято считать отношение минимального значения поглощенной дозы D_{min} к максимальному значению поглощенной дозы D_{max} в объеме объекта. Достижение степени однородности облучения более 80 % является сложной технологической задачей, при решении которой необходимо учитывать неравномерность заполнения упаковки облучаемых объектов, их геометрию, структуру, химический состав, плотность и другие факторы.

Цель работы заключалась в разработке методов повышения эффективности радиационной обработки биообъектов и материалов. Были разработаны метод модификации пучка ускоренных электронов для повышения равномерности облучения, система быстрого расчета распределения поглощенной дозы по глубине и система расчета параметров ускорителя, обеспечивающих наибольшую равномерность облучения.

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

METHODS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF RADIATION PROCESSING OF BIOOBJECTS AND MATERIALS

Studenikin F. R.^{1,2}, Chernyaev A. P.^{1,2}, Bliznyuk U. A.^{1,2}, Zolotov S. A.^{1,2},
Borshchegovskaya P. Yu.^{1,2}, Ipatova V. S.², Sokolov S. A.¹, Krechetov N. D.¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, GSP-1, Moscow, Leninskie gory, house 1, building 2, Russia; +74959394946

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation.
E-mail: f.studenikin@gmail.com

At present, the importance of radiation technologies is increasing significantly not only in science, but also in various sectors of the national economy and medical practice. Radioisotopes and charged particle accelerators, in addition to being used in fundamental research in the field of atomic

and nuclear physics, radiobiology and radiochemistry, are widely used in medicine for radiation therapy and diagnostics, sterilization of transplantation objects, pharmaceuticals and medical devices; in ecology for the treatment of wastewater, solid waste and exhaust gases; in industry and agriculture for radiation treatment of materials and food products.

In more than 70 countries around the world there are centers for industrial radiation processing of food and medical devices. When processing with accelerated electrons, the inhomogeneity of irradiation of objects is inevitable, due to the nature of the distribution of the absorbed radiation dose over the depth of the object. The ratio of the minimum value of the absorbed dose D_{\min} to the maximum value of the absorbed dose D_{\max} in the volume of the object is considered to be the criterion for the uniformity of irradiation. Achieving a degree of irradiation uniformity of more than 80 % is a complex technological task, in solving which it is necessary to take into account the uneven filling of the package of irradiated objects, their geometry, structure, chemical composition, density and other factors.

The aim of the work was to develop methods for increasing the efficiency of radiation treatment of biological objects and materials. A method was developed for modifying an accelerated electron beam to improve the uniformity of irradiation, a system for quickly calculating the distribution of the absorbed dose over depth, and a system for calculating the accelerator parameters that ensure the greatest uniformity of irradiation.

The study was carried out within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow University "Photonic and Quantum Technologies. Digital Medicine.

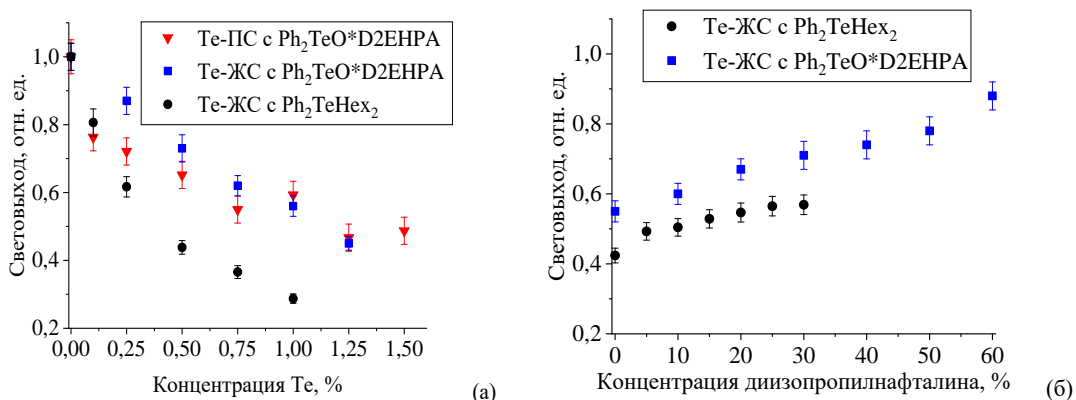
ТЕЛЛУРСОДЕРЖАЩИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ

И. А. Суслов^{а, б}, И. Б. Немченко^{а, б}, А. А. Клименко^{а, б}, А. Д. Быстрыков^{а, б}, И. И. Камнев^а

^аОбъединенный Институт Ядерных Исследований, ул. Жолио-Кюри, д.6,
141980, Московская область, г. Дубна, Россия

^бГосударственный университет «Дубна», ул. Университетская, д. 19,
141980, Московская область, г. Дубна, Россия
телефон: 89154182225, e-mail: ivsuslov@jinr.ru

В работе описаны новые теллурсодержащие жидкие (Те-ЖС) и пластмассовые сцинтилляторы (Те-ПС) для экспериментов по поиску двойного безнейтринного бета-распада. В качестве основы для Те-ЖС использованы смеси линейного алкилбензола с диизопропилнафталином, для Те-ПС – полистирол, в качестве теллурсодержащих добавок – ди-2-этилгексаноат дифенилтеллура ($\text{Ph}_2\text{TeHex}_2$) и комплексное соединение оксида дифенилтеллура и ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты ($\text{Ph}_2\text{TeO}^*\text{D2ENPA}$). Измерены световыход и прозрачность сцинтилляторов, исследована их временная устойчивость.



Зависимость световыхода теллурсодержащих органических сцинтилляторов от концентрации (а) теллура, (б) диизопропилнафталина (относительно световыхода образцов ЖС или ПС, не содержащих теллур)

В результате получены Те-ЖС с содержанием теллура до 1,25%_{масс} и световыходом до 88 % в зависимости от содержания диизопропилнафталина и первые в мире Те-ПС с хорошими прозрачностью и световыходом.

Работа поддержана грантом РФФИ на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми научными группами (проект № 23-22-00214).

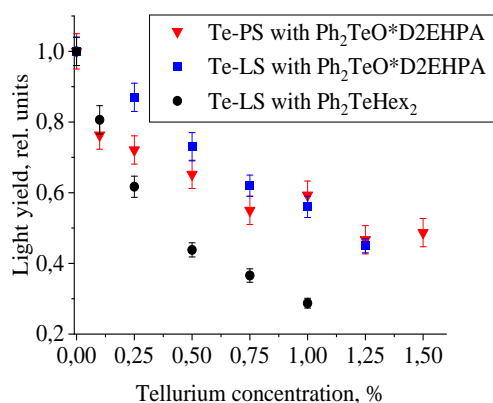
TELLURIUM-LOADED ORGANIC SCINTILLATORS

I. A. Suslov^{a, b}, I. B. Nemchenok^{a, b}, A. A. Klimenko^{a, b}, A. D. Bystryakov^{a, b}, I. I. Kamnev^a

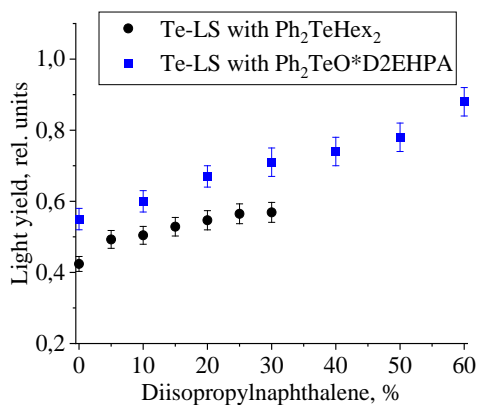
^aJoint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie St, Dubna, Moscow Region, 141980, Russia

^bDubna State University, Universitetskaya 19, Dubna, Moscow region, 141980, Russia
telephone: 89154182225, e-mail: ivsuslov@jinr.ru

The paper describes new tellurium-loaded liquid (Te-LS) and plastic scintillators (Te-PS) for experiments on the search for neutrinoless double beta-decay. Mixtures of linear alkylbenzene with diisopropylnaphthalene were used as the scintillation base for Te-LS, polystyrene was used for Te-PS. Diphenyltellurium di-2-ethylhexanoate ($\text{Ph}_2\text{TeHex}_2$) and a complex compound of diphenyltellurium oxide with di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid ($\text{Ph}_2\text{TeO}^*\text{D2EHPA}$) were used as tellurium-containing additives. The light yield and transparency of the scintillators were measured and their long-term stability was studied.



(a)



(b)

Light yield as a function of (a) tellurium concentration, (b) diisopropylnaphthalene concentration for tellurium-loaded organic scintillators (relative to the light yield of unloaded LS and PS)

As a result, Te-LS with a tellurium content of up to 1.25 wt.% and a light yield of up to 88% depending on the content of diisopropylnaphthalene were obtained and the world's first Te-PS with good transparency and light yield were produced.

This work is supported by a grant from the Russian Science Foundation for fundamental research and exploratory research by small individual research groups (project no. 23-22-00214).

САПФИРОВЫЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

**К. В. Сухарев¹, А. П. Воробьев¹, С. Н. Головня¹, О. П. Толбанов², А. В. Тяжев²,
А. Е. Винник², М. С. Скакунов², А. Н. Зарубин²**

¹) Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1; телефон: +7 (4967) 71-36-23;

²) Томский государственный университет, г. Томск
Email: Kirill.Sukharev@ihep.ru

Целесообразность исследования возможности использования детекторов из монокристаллического искусственного сапфира в дистанционной лучевой терапии следует из сравнения параметров медицинских пучков протонов и ионов углерода, используемых в адронной терапии онкологических заболеваний, с имеющимися мировыми исследованиями транспорта носителей заряда в искусственных сапфирах и характеристик сенсоров при облучении бета-частицами и тяжелыми ионами [1,2].

В настоящей работе представлены результаты первых испытаний сапфировых сенсоров на пучке ионов углерода с энергией 175 и 380 МэВ/нуклон. Измерены зависимости сигналов сенсоров от приложенного высокого напряжения от 50 до 500В, зависимости сигналов от интенсивности пучка ионов углерода. Используя радиохромную плёнку ЕВТ-3, установленную перед сапфировыми сенсорами, измерено соотношение между поглощённой дозой в плёнке и суммарным зарядом, зарегистрированным сенсорами. Измерена зависимость величины сигналов сенсоров при напряжении на них 500В при постоянной интенсивности пучка после облучения дозой, регистрируемой относительным дозиметром. Впервые для сапфировых сенсоров измерена зависимость дифференциальной поглощённой дозы в водном фантоме (кривая Брэгга). Сигналы с детекторов измерялись при напряжении на детекторах 500В и времени интегрирования 900мс в интервале интенсивностей $7,0 \cdot 10^7 \div 4,5 \cdot 10^8$ ионов/импульс.

Список литературы

1. F. Wang et al., Electronic Charge Transport in Sapphire Studied by Optical-Pump/THz-Probe Spectrometer, SPIE Proceedings, 2004

2. А. В. Ефимов, Наноразмерные эффекты на поверхности монокристаллов Al₂O₃ и MgO, вызванные тяжёлыми ионами высоких энергий, Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Дубна – 2004 г

SAPPHIRE DOSIMETRIC SENSORS FOR ION BEAM THERAPY

**K. V. Sukharev¹, A. P. Vorobiev¹, S. N. Golovnya¹, O. P. Tolbanov², A. V. Tyzhev²,
A. E. Vinnik², M. S. Skakunov², A. N. Zarubin²**

¹) A.A. Logunov Institute for High Energy Physics of the National Reserch Centre «Kurchatov Institute», 142281, Moscow region, Protvino, Science Square, 1;
phone number: +7 (4967) 71-36-23;

²)Toms State University, Tomsk
Email: Kirill.Sukharev@ihep.ru

The expediency of investigating the possibility of using detectors made of monocrystalline artificial sapphire in remote radiation therapy follows from comparing the parameters of medical beams of protons and carbon ions used in hadron therapy of oncological diseases with existing world studies of charge carrier transport in artificial sapphires and sensor characteristics when irradiated with beta particles and heavy ions [1, 2].

This paper presents the results of the first tests of sapphire sensors in a beam of carbon ions with energies of 175 and 380 MeV/nucleon. The dependences of the sensor signals on the applied high voltage from 50 to 500 V, the dependences of the signals on the intensity of the carbon ion beam were measured. Using the EBT-3 radiochromic film installed in front of the sapphire sensors, the ratio between the absorbed dose in the film and the total charge recorded by the sensors was measured. The dependence of the magnitude of the sensor signals at a voltage of 500 V and at a constant beam intensity after irradiation with a dose recorded by a relative dosimeter was measured. For the first time for sapphire sensors, the dependence of the differential absorbed dose in an aqueous phantom (Bragg curve) was measured, the signals from the detectors were measured at a voltage of 500V and an integration time of 900ms in the intensity range of $7.0 \cdot 10^7 \div 4.5 \cdot 10^8$ ions/pulse.

References

1. F. Wang et al., Electronic Charge Transport in Sapphire Studied by Optical-Pump/THz-Probe Spectrometer, SPIE Proceedings, 2004.
2. A. V. Efimov, Thesis. Dubna – 2004, RF.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОЦЕНОК ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИАЦИОННОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ БИОИМПЛАНТАТОВ

А. О. Хуцистова, С. А. Золотов, В. В. Розанов, И. В. Матвейчук, А. П. Черняев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, тел.: 8(495)-939-13-44
E-mail: vrozanov@mail.ru

Радиационная обработка биоимплантатов в последние годы составляет всё более значительную долю на рынке стерилизации объектов биологического и медицинского назначения. При этом самую существенную роль играет величина и равномерность распределения поглощенной дозы в обрабатываемых материалах. Особую роль это играет при стерилизации костных имплантатов, в процессе которой необходимо, с одной стороны, обеспечить высокий уровень стерильности, а с другой – не внести существенные изменения в структуру, механические и остеointegrативные свойства и характеристики имплантата. Расчетные и контактные методы не всегда могут обеспечить достоверную информацию о величине поглощенной дозы. Новые возможности обеспечивают модельные подходы.

В настоящей работе с применением программного пакета GEANT4 выполнен цикл модельных расчетов пространственного распределения величины поглощенной дозы в прямоугольном образце с характеристиками кортикальной костной ткани (параметры взяты из библиотеки GEANT4) при радиационном воздействии гамма-квантами, ускоренными электронами и потоком рентгеновского излучения при варьировании энергетических параметров излучения, толщины мишени и геометрии воздействия. Исходные условия соответствовали параметрам реального эксперимента, осуществленного ранее в НИИЯФ МГУ при разработке комбинированной (озон + радиация) технологии стерилизации биообъектов [1]. Проведенные расчеты показали высокую эффективность радиационного воздействия и равномерность распределения дозы при обработке костного фрагмента гамма-квантами. Именно поэтому такая технология сегодня находит наиболее широкое применение. Однако результаты, полученные для случая использования потока ускоренных электронов, позволили выработать ряд практических рекомендаций, оптимизирующих процесс радиационной обработки. Это может открывать новые возможности для более широкого использования ускоренных электронов для стерилизации костных имплантатов.

Список литературы

1. Розанов В. В., Матвейчук И. В., Черняев А. П. и др. Современное состояние и направления дальнейшего развития высокотехнологичных методов радиационной стерилизации // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – т. 84. – № 4. – С. 521–524.

USE OF MODEL ESTIMATES FOR OPTIMIZATION OF TECHNOLOGIES FOR RADIATION STERILIZATION OF BIOIMPLANTS

A. O. Khutsistova, S. A. Zolotov, V. V. Rozanov, I. V. Matveychuk, A. P. Chernyaev

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskie gory, 1,
phone: +74959394946, e-mail: vrozanov@mail.ru

In recent years, radiation treatment of bioimplants has become an increasingly significant share of the sterilization market for biological and medical objects. In this case, the most significant role is played by the magnitude and uniformity of the distribution of the absorbed dose in the processed materials. This plays a special role in the sterilization of bone implants, during which it is necessary, on the one hand, to ensure a high level of sterility, and on the other hand, not to make significant changes in the structure, mechanical and osteointegrative properties and characteristics of the implant. Calculation and contact methods cannot always provide reliable information about the absorbed dose. Model approaches provide new opportunities in this regard.

In this work, using the GEANT4 software package, a cycle of model calculations of the spatial distribution of the absorbed dose in a rectangular sample with the characteristics of cortical bone tissue (parameters taken from the GEANT4 library) was performed under radiation exposure to gamma quanta, accelerated electrons, and X-ray flux at varying the energy parameters of the radiation, the thickness of the target and the geometry of the impact. The initial conditions corresponded to the parameters of a real experiment carried out earlier at the SINP MSU in the development of a combined (ozone + radiation) technology for sterilizing biological objects [1]. The calculations performed showed high efficiency of radiation exposure and uniformity of dose distribution during the treatment of a bone fragment with gamma quanta. That is why this technology is widely used today. However, the results obtained for the case of using a stream of accelerated electrons made it possible to develop a number of practical recommendations that optimize the radiation treatment process. This may open up new possibilities for the wider use of accelerated electrons for the sterilization of bone implants.

References

1. Rozanov V. V., Matveichuk I. V., Chernyaev A. P., Nikolaeva N. A., Krasnov S. A. Current State and Lines of the Further Development of High-Tech Means of Radiation Sterilization // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2020. – V.84. – № 4. – P. 403-405.

ФИЗИЧЕСКОЕ ЯДРО СИСТЕМЫ ДОЗНО-АНАТОМИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ПАЦИЕНТА С ИСТОЧНИКОМ ИОНОВ УГЛЕРОДА

**И. И. Дегтярев, Ф. Н. Новоскольцев, О. А. Ляшенко,
Р. Ю. Синюков, Д. А. Цветков, А. Р. Селезнева**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1, Тел.: (4967) 71-36-23, Факс: (4967) 74-28-24, e-mail: fgbu@ihep.ru, Igor.Degtyarev@ihep.ru

Дистанционная лучевая терапия злокачественных новообразований является одним из наиболее востребованных и быстроразвивающихся высокотехнологичных методов лечения онкологических заболеваний. На базе НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ планируется создание новейшего отечественного научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины, включающего комплекс ионно (углеродной) – лучевой дистанционной терапии (ЦИЛТ У70). Неотъемлемой частью ЦИЛТ У70 является автоматизированная система дозно-анатомического планирования облучения пациента. В докладе представлено описание прецизионной и полуаналитических математических моделей [1, 2] физического ядра разрабатываемой автоматизированной системы дозно-анатомического планирования комплекса ионно-лучевой терапии НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

[1] I. I. Degtyarev, F. N. Novoskoltsev, O. A. Liashenko, E. V. Gulina, L. V. Morozova // RTS&T-2014 code status, Nuclear Energy and Technology, Volume 1, Issue 3, November 2015, Pages 222-225.

[2] И. И. Дегтярев, Ф. Н. Новоскольцев, О. А. Ляшенко, Р. Ю. Синюков, Е. В. Алтухова, А. И. Блохин, П. А. Блохин, А. А. Пряничников // RTS&T-2021 – Обновленный комплекс программ статистического моделирования связанного переноса многокомпонентного излучения в гетерогенных пространственно-неоднородных средах, Сборник трудов XI Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Москва, 26–29 октября 2021 года, т. 3, с. 148.

PHYSICAL CORE OF CARBON ION RADIATION THERAPY TREATMENT PLANNING SYSTEM

I. I. Degtyarev, F. N. Novoskoltsev, O. A. Liashenko, R. Yu. Sinyukov, D. A. Tzvetkov, A. R. Selezneva

Institute for High Energy Physics named by A.A. Logunov of NRC “Kurchatov Institute”, 142281, Moscow reg., Protvino, Nauki sq. 1, E-mail: fgbu@ihep.ru, Igor.Degtyarev@ihep.ru

Radiotherapy is one of the most widely used and rapidly developing high-tech methods for the treatment. On the basis of the National Research Center "Kurchatov Institute" – IHEP, it is planned to create the latest domestic scientific and educational medical center for nuclear medicine, including a complex of carbon-ion therapy. An integral part of this complex is an automated system for dose-anatomical planning of patient exposure. The report presents a description of precision and semi-analytical mathematical models [1, 2] of the physical core of the automated system for dose-anatomical planning of the ion-beam therapy complex at the National Research Center "Kurchatov Institute"-IHEP.

References

[1] I. I. Degtyarev, F. N. Novoskoltsev, O. A. Liashenko, E. V. Gulina, L. V. Morozova // RTS&T-2014 code status, Nuclear Energy and Technology, Volume 1, Issue 3, November 2015, Pages 222-225.

[2] I. I. Degtyarev, F. N. Novoskoltsev, O. A. Lyashenko, R. Yu. Sinyukov, E. V. Altukhova, A. I. Blokhin, P. A. Blokhin, A. A. Pryanichnikov // The RTS&T-2021 – updated code for statistical modeling of coupled transport of multicomponent radiation in heterogeneous spatially inhomogeneous media, Proceedings of the XI Russian Scientific Conference "Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies", Moscow, October 26-29, 2021, vol. 3, p. 148.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

**А. О. Черница¹, П. А. Колесников¹, И. А. Карачинский¹,
Д. А. Старостенко², П. А. Бак², Д. А. Никифоров², Я. В. Куленко².**

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В РФЯЦ-ВНИИТФ в 2011 году введена в эксплуатацию рентгенографическая установка на базе линейного индукционного ускорителя (ЛИУ). ЛИУ используется для исследования динамически развивающихся объектов при взрывном нагружении. В ЛИУ формируется

электронный пучок для получения точечного источника гамма-излучения при помощи конверсионной мишени. Источником электронов служит инжектор, способный генерировать импульсы длительностью от десятков наносекунд до нескольких микросекунд и током в несколько килоампер. Задача транспортировки и фокусировки такого пучка в диаметр порядка 1 мм является весьма сложной [1].

В докладе рассматривается исследование динамики электронного пучка в ускорителе ЛИУ. Приводятся результаты численного моделирования пучка, с помощью разработанных кодов. Результаты моделирования демонстрируют хорошее соответствие между собой. Предложена новая конфигурация транспортного канала с новыми элементами диагностики для измерения поперечного профиля, расчета коррекции орбиты и других параметров пучка.

Общая схема ЛИУ представлена на рис.

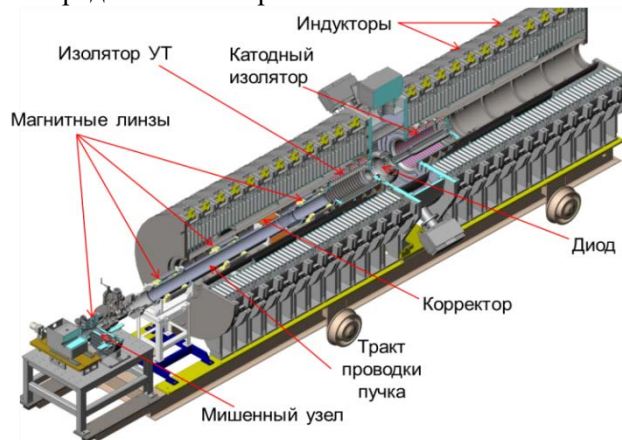


Рис. Схема линейного индукционного ускорителя

Список литературы

1. Д. Старостенко, П. Бак, Д. Никифоров, Я. Куленко, А. Черница, П. Колесников, Динамика пучка линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2, - Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т.19, №4 (243). С.319-325.

THE LINEAR INDUCTION ACCELERATOR LIA-2 ELECTRON BEAM DYNAMICS INVESTIGATION

A. O. Chernitsa¹, P. A. Kolesnikov¹, I. A. Karachinskiy¹, D. A. Starostenko²,
P. A. Bak², D. N. Nikiforov², Ya. V. Kulenko²

¹FSUE "RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin", Snezhinsk, Russian Federation

²BINP, the SB of the RAS, Novosibirsk, Russian Federation

In 2011, RFNC-VNIITF put into operation a radiography facility based on linear-induction accelerator (LIA). The LIA is applied to study dynamically evolving objects under explosive loading. LIA generate electron beam to obtain a small spot and bright X-ray source using a conversion target. The electrons source is injectors capable of generating pulses with a duration from tens of nanoseconds to several microseconds and a current of several kA. The transportation and focusing of high-current beams into diameter about 1 mm is extremely difficult [1].

The work considers the research of electron beam dynamics in the accelerator LIA. The computational results of the electron beam with the help of developed cods are presented. The computational results show a good equivalent between each other. The new configuration of the LIA transport channel with new measuring diametrical profile diagnostic elements, orbit correction calculation and others electron beam parameters are presented. The common LIA scheme is presented in Figure.

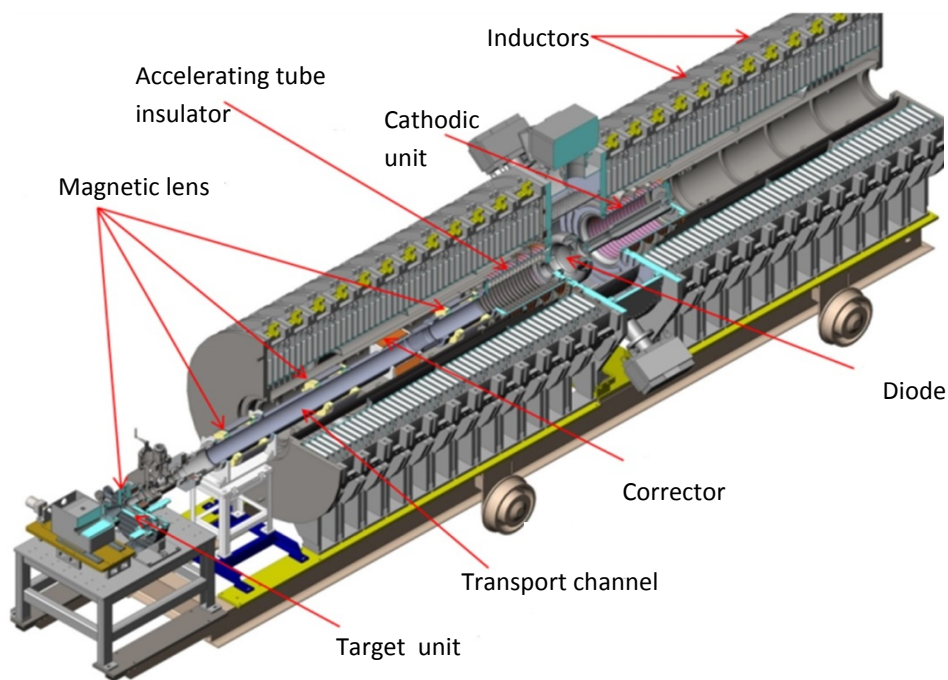


Fig. The common LIA scheme

References

1. D. Starostenko, P. Bak, D. Nikiforov, Ya. Kulenko, A. Chernitsa, P. Kolesnikov, The linear induction accelerator LIA-2 electron beam dynamics// EPAN mails – 2022 – Vol 4 – P 319–325

МНОГОБИТОВЫЕ СБОИ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н. Г. Чеченин*, **Н. В. Новиков**, **А. А. Широкова**

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
 Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
 119991, Москва, Ленинские горы, 1/2, Россия,
 * тел: +7-495-9392348, e-mail: nchechenin@yandex.ru

С уменьшением размера и увеличением плотности элементов, переходом от микроэлектроники к наноэлектронике растет вероятность генерации ложного сигнала не только в одном, но и в нескольких битах при прохождении одиночной частицы космического ионизирующего излучения через элемент бортовой электроники космического аппарата. В данной работе вероятность многобитового сбоя (МБС) изучается на базе упрощенного аналитического подхода и сопоставляется с результатами расчетов на основе метода Монте-Карло. Анализируется увеличение вероятности МБС с ростом ионизационных потерь падающей частицы и плотности битов в чипе.

MULTIBIT FAILURES OF THE SPACECRAFT ON-BOARD ELECTRONICS CAUSED BY A SINGLE PARTICLE OF SPACE RADIATION

N. G. Chechenin*, N. V. Novikov, A. A. Shirokova

Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1/2, Russia,
* tel: +7-495-9392348, e-mail: nchechenin@yandex.ru

With a decrease in the size and an increase in the density of elements, the probability increases of generating a false signal not only in one, but also in several bits, when a single particle of space radiation passes through an element of the onboard electronics of a spacecraft. In this paper, the probability of a multibit upset (MBU) is analyzed based on a simplified analytical approach and compared with the results of calculations based on the Monte Carlo method. An analysis is made of the growth of the MBUs with an increase in the ionizing power of the incident particle and in the bit density in the chip.

ПРИМЕНЕНИЕ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО РЕГИСТРАЦИИ ФОТОНЕЙТРОНОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ИМПУЛЬСА γ -КВАНТОВ

О. А. Никитин, И. В. Пензин, Е. И. Чухаев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»
ул. Васильева, 13, г. Снежинск, Челябинская область, 456770
факс: (351-46) 5-22-33, 5-55-66
тел: (351-46) 5-51-20, 5-43-67
E-mail: vniitf@vniitf.ru

В РФЯЦ-ВНИИТФ создан импульсный фотонейтронный источник на основе линейного индукционного ускорителя с энергией электронов в пучке 20 МэВ (ЛИУ-20) и импульсной мощностью до 40 ГВт.

Отличительной чертой созданного фотонейтронного источника служит фактор комплексного воздействия нейтронного и тормозного излучений. При этом применение различных конверторов позволяет варьировать количество тормозных квантов и нейтронов в потоке излучения.

Для решения задачи по определению числа и спектра фотонейтронов в генерируемом гамма-нейтронном потоке излучения в реальном времени на основе Монте-Карло метода построена численная модель быстродействующего измерительного канала на основе сцинтилляционного детектора, предназначенного для регистрации импульсов длительностью 60 нс с интервалом до 1 минуты между ними.

В докладе обоснован выбор детектора, представлен принцип построения численной модели измерительного канала, проведено сравнение результатов моделирования с данными, полученными в эксперименте.

MONTE-CARLO MODEL OF THE MEASURING CHANNEL USED IN THE EXPERIMENT TO RECORD PHOTONEUTRONS INDUCED BY HIGH-INTENSITY γ -QUANUM PULSE

O. A. Nikitin, I. V. Penzin, E. I. Chukhaev

FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin"
Russia, 456770, Chelyabinsk region, Snezhinsk, Vasilieva str., 13

Fax: (351-46) 5-22-33, 5-55-66

Tel: (351-46) 5-51-20, 5-43-67

E-mail: vniitf@vniitf.ru

RFNC-VNIITF has developed a pulsed photoneutron source based on the linear induction accelerator with the electron beam energy of 20 MeV (LIA-20) and pulsed power up to 40 GW.

The integrated effect of neutron and deceleration radiation is a specific characteristic of the developed photoneutron source. The number of decelerated quanta and neutrons in the radiation flow can be varied using different converters.

Numerical model of the high-speed measuring channel based on the scintillation detector designed to record 60 ns pulses at 1-minute intervals was developed to determine in real-time mode the number and spectrum of photoneutrons in the generated neutron radiation flow using Monte-Carlo method.

The present paper justifies selection of the detector and describes numerical modelling for the measuring channel. The simulation results have been compared with the experimental data.

САМОСОГЛАСОВАННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗАРЯЖЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ИНЖЕКЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

А. В. Грунин, А. Н. Залялов, С. А. Лазарев, И. В. Пенягин, П. А. Шанина

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

607188, Нижегородская обл., г.Саров, пр. Мира 37

otd4@expd.vniief.ru

Интерес к явлению заряжения диэлектрических материалов [1] потоками высокоэнергетических электронов обусловлен их практическими применениями в различных областях физики и техники, в экспериментах на физических установках, в аналитических методах с применением электронных пучков, микроэлектронике, а также в обеспечении устойчивости аппаратуры космических аппаратов (КА) к воздействию радиационных поясов Земли. Возникновение поля объемного электрического заряда (ОЗ) влияет на пробег электронов и распределение поглощенной энергии в облучаемом диэлектрике, эмиссию вторичных электронов с поверхности диэлектрика, генерацию тормозного излучения (ТИ).

Проблеме зарядки диэлектрических мишеней посвящено значительное число методических и экспериментальных работ, однако на сегодня отсутствует модель влияния динамики сильноточных пучков электронов на процессы формирования ОЗ и возможное решение данной проблемы – это самосогласованное решение переноса излучений в поле формируемого ОЗ.

Предлагаемое последовательное решение задачи содержит самосогласованный расчет переноса высокоэнергетических электронов по методу Монте-Карло в электрическом поле ОЗ, расчет концентрации захваченных на ловушки инжектированных электронов после их термализации, релаксацию ОЗ, описываемую радиационно-наведенной электропроводностью (РНЭ). В процессе движения электронов в слое диэлектрика, учитывается влияние электрического поля с предыдущего шага, а также ТИ, которое приводит к появлению вторичных электронов и вне зоны воздействия инжектируемых электронов. Траектории электронов и гамма-квантов моделируются методом Монте-Карло в программе СМК.

Новые возможности программы СМК позволяют в одномерном приближении проводить расчеты по оценке заряжения диэлектрического слоя потоками высокоэнергетических электронов с учетом потери энергии электронов в поле создаваемого ОЗ, с учетом его релаксации.

Список литературы

1 С. Г. Боев, В. Я. Ушаков. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики. М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.

SELF-CONSISTENT APPROACH TO ESTIMATION OF DIELECTRIC MATERIALS CHARGING AT PULSED INJECTION OF HIGH-ENERGY ELECTRONS

A. V. Grunin, A. N. Zalyalov, S. A. Lazarev, I. V. Penyagin, P. A. Shanina

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics» Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave 37
otd4@expd.vniief.ru

An interest to phenomenon for dielectric materials [1] charging by high-energy electron flows is conditioned by their applications in different areas of physics and engineering, experiments on physical installations, analytical methods using electron beams, microelectronics, as well as in providing spacecraft equipment resistance to effect of the Earth radiation belts. Birth of volume electric charge (VCh) field affects a range of electrons and absorbed energy distribution in irradiated dielectric, secondary electron emission from the dielectric surface, bremsstrahlung generation.

A significant number of methodical and experimental works is devoted to dielectric targets' charging problem, however, today there is no contagion model of high-current electron beams dynamics on VCh formation processes and possible solution of the given problem is a self-consistent solution of radiation transfer into the field of formed VCh.

Proposed sequential task solving contains a self-consistent calculation of high-energy electron transport by Monte-Carlo method in an electric VCh field, calculation of concentration of trapped injected electrons after their thermalization, VCh relaxation, described by radiation-induced electrical conduction (RIEC). During electron motion process in a dielectric layer, the electric field effect from the previous step is taken into account, as well as bremsstrahlung radiation, leading to appearance of secondary electrons outside the area affected by injected electrons as well. Electron trajectories and gamma-quanta are simulated by Monte-Carlo method in program SMK/ СМК.

In one-dimensional approximation new capabilities of program СМК allow calculations on estimation of charging the dielectric layer by high-energy electron flows, taking into account the loss of electron energy in the field of developed VCh with regard to its relaxation.

References

1 S. G. Boev, V. Ya. Ushakov. Charge accumulation in hard dielectrics and methods of its diagnostics. M.: Energoatomizdat, 1991. 240 p.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ В НИЗКОФОНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

К. В. Шахов, Е. А. Якушев, А. В. Лубашевский, С. В. Розов, Д. В. Пономарев, С. А. Евсеев

141980 Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6
+7 (49621) 6-50-59/6-51-46, post@jinr.ru

Низкофоновые эксперименты постоянно выдвигают новые требования как к радиоактивной чистоте, так и к физическим свойствам различных применяемых материалов в конструкциях детекторов или установок. Данные требования объясняются растущей точностью

современных экспериментов, в которых необходимо учитывать примеси радиоактивных изотопов во всех элементах установки на уровнях ниже 10^{-9} г/г.

Одним из таких материалов является изученный в ЛЯП ОИЯИ нейлон для 3D-печати. Из данного полимера в ЛЯП ОИЯИ были изготовлены различные конструкционные элементы для нескольких экспериментов с низким уровнем фона. Так, для эксперимента ν GeN (КАЭС, Россия), направленного на поиск когерентного рассеяния нейтрино на ядрах германия и измерение магнитного момента нейтрино, была изготовлена низкофоновая полимерная антирадоновая защита детектора с применением аддитивных технологий (FDM-печать). Для эксперимента LEGEND (Гран-Сассо, Италия), направленного на поиск безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu 2\beta$), были изготовлены различные конструкционные элементы установки, а именно: оправы германиевых детекторов установки, формы для изготовления и транспортировки кожухов детекторов, направляющие для калибровочных источников.

В данной работе представлены преимущества низкофоновой 3D-печати, варианты применения аддитивных технологий в низкофоновых экспериментах и экспериментальные данные об уровнях радиоактивных примесей изученного нейлона для 3D-печати. Таким образом, оценена возможность и перспектива применения аддитивных технологий для изготовления различных конструкционных элементов установок в низкофоновых экспериментах.

APPLICATION OF 3D PRINTING TECHNOLOGY IN LOW-BACKGROUND EXPERIMENTS

K. V. Shakhov, E. A. Yakushev, A. V. Lubashevsky, S. V. Rozov, D. V. Ponomarev, S. A. Evseev

Joint Institute for Nuclear Research Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia
+7 (49621) 6-50-59/6-51-46, post@jinr.ru

Low-background experiments constantly put new demands on both radioactive purity and physical properties of various materials used in detector facilities. These requirements are explained by growing precision of modern experiments in which radioactive isotope impurities at the levels below 10^{-9} g/g have to be taken into account in all construction elements.

One of such materials is nylon for 3D printing which was previously studied at DLNP JINR. Here, various structural elements for several low-background experiments were made from this polymer. As a result, for the ν GeN experiment (KNPP, Russia) aimed at searching for coherent neutrino scattering off germanium nuclei and measuring the neutrino magnetic moment, a low-background polymeric antiradon detector protection has been made using an additive technology, FDM printing. For the LEGEND experiment (Gran Sasso, Italy) which searches for the ^{76}Ge neutrinoless double beta decay ($0\nu\beta\beta$), various construction elements of the facility – germanium detector frames, molds for manufacture and transportation of detector shrouds and rails for calibration sources – were manufactured in the same way.

This work presents the advantages of low-background 3D printing, possible applications of additive technologies in low-background experiments and the experimental data concerning the levels of radioactive impurities in the nylon as a 3D printing material. Thus, the possibility of and prospects for using additive technologies for the manufacture of various structural elements of facilities in low-background experiments are evaluated.

СОЗДАНИЕ ЭТАЛОННОГО ПОЛЯ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРОВ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ ФОТОНОВ ОТ 0,06 ДО 10 МэВ

М. С. Эпов, Н. Н. Моисеев

Федеральное государственное унитарное предприятие

“Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева” –
ФГУП “ВНИИМ им. Д. И. Менделеева”. 190005, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 19,
Тел: +7 812 251-7601, Факс: +7 812 713-0114, E-mail: info@vniim.ru

Современные тенденции в ядерном приборостроении требуют расширения энергетического диапазона регистрируемого гамма-излучения. Традиционно для калибровки спектрометров используются источники моноэнергетического гамма-излучения. Основной проблемой является отсутствие радионуклидов, распад которых сопровождается испусканием гамма-квантов с энергиями выше 3 МэВ.

В представляемой работе предлагается модель источника гамма-излучения в диапазоне энергий до 10 МэВ. Конструктивно источник представляет собой источник тепловых нейтронов и радиатор, в котором при взаимодействии с тепловыми нейтронами рождаются гамма-кванты. Для формирования пучка тепловых нейтронов использовалась установка УЭППН из состава ГЭТ-10-2023, в качестве радиатора – стальной диск диаметром 300 мм толщиной 15 мм.

Для оптимизации геометрии эксперимента с целью получения максимального выхода гамма-квантов было проведено моделирование с использованием программного пакета GEANT4. Построение геометрической модели производилось в программе FreeCAD с расширением GDML.

В результате моделирования получено оптимальное соотношение «дополнительный замедлитель-радиатор». Разработанная конструкция позволила максимизировать поток гамма-излучения. Приводятся результаты расчёта в сравнении с экспериментальными данными.

REFERENCE FIELD FOR CALIBRATION OF GAMMA SPECTROMETERS IN 0.06–10 MeV ENERGY RANGE

M. S. Epov, N. N. Moiseev

D. I. Mendeleev Institute for Metrology, VNIIM, 190005, Russia, St. Petersburg,
Moskovsky pr., 19, phone: +7 812 251-7601, fax: +7 812 713-0114

Modern trends in nuclear instrumentation require the expansion of the energy range of the detected gamma radiation. Monoenergetic gamma radiation sources are used to calibrate spectrometers. The main problem is the absence of radionuclides, the decay of which is accompanied by the emission of gamma-rays with energies above 3 MeV.

This work presents a model of a gamma-ray source in the energy range up to 10 MeV. Thermal neutron capture on iron target was used to produce gamma rays with energy up to 10 MeV. Thermal neutron beam was generated by UEPPN (GET-10-2023) and a steel disk diameter 300 mm and thickness 15 mm was used as a target.

To optimize the geometry and obtaining the maximum yield of gamma rays the experiment was simulated by using the GEANT4 software package. The geometry was created in the FreeCAD program with the GDML extension.

As a result of the simulation, the optimal ratio "additional moderator-target" was obtained. The calculation results are presented in comparison with experimental data.