

Имитационное моделирование работы алмазного детектора ионизирующих излучений

А.А. Алтухов, К.В. Захарченко, В.А. Колюбин

ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест»,
г. Москва, nanophys@mail.ru

Аннотация — Представлена физико-математическая модель алмазного детектора ионизирующих излучений. Экспериментально определены параметры модели, необходимые для расчёта выходного сигнала детектора. Выполнено имитационное моделирование выходного сигнала алмазного детектора при воздействии изотропных потоков электронов и протонов.

Ключевые слова — алмазный детектор, ионизирующее излучение, математическое моделирование, электроны, протоны.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день отказы бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов в значительной степени обусловлены дозовыми и одиночными эффектами, вызываемыми космическим излучением. Современные программные продукты позволяют с высокой точностью рассчитать локальные условия функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры и оценить вероятность возникновения радиационно обусловленных отказов [1], однако для расчёта необходим мониторинг радиационной обстановки снаружи космического аппарата. Алмазные детекторы ионизирующих излучений обладают высокой радиационной стойкостью [2] и могут использоваться для работы на внешней поверхности космического аппарата без дополнительной защиты. Это определяет перспективность использования алмазных детекторов для мониторинга космических излучений в задачах обеспечения радиационной безопасности космических полётов.

Задача восстановления спектров космических излучений по выходному сигналу детектора сводится к решению математически переопределённой системы уравнений. Один из эффективных методов решения подобных систем основан на использовании нейронных сетей [2]. Обучение нейронных сетей требует набора максимально полных массивов информации о соответствии входных и выходных сигналов. Входными сигналами алмазного детектора являются подлежащие восстановлению спектры космических излучений. В связи с отсутствием калиброванных источников космического излучения, а также из-за сильной вариативности спектров космических частиц в качестве входных данных используются расчётные спектры для различных уровней солнечной активности и различных орбит космических аппаратов. При таком подходе для

определения соответствующих выходных сигналов алмазного детектора требуется физико-математическая модель, описывающая преобразование информации о космическом излучении в различных узлах детектора.

В данной работе разработана физико-математическая модель алмазного детектора, позволяющая рассчитать параметры его выходного сигнала по спектрам регистрируемых ионизирующих излучений. Экспериментально определены подгоночные параметры модели. Выполнено имитационное моделирование выходного сигнала детектора при воздействии потоков космических частиц для различных орбит при разных уровнях солнечной активности.

II. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА

A. Принцип работы алмазного детектора

Функциональная схема алмазного детектора ионизирующих излучений показана на рис. 1.

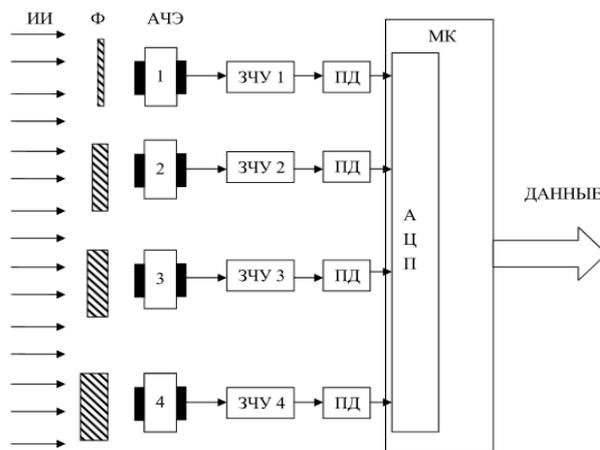


Рис. 1. Функциональная схема алмазного детектора ионизирующих излучений

Ионизирующее излучение (ИИ) после прохождения фильтров (Ф) регистрируется в алмазном чувствительном элементе (АЧЭ). Под действием ионизирующей частицы в АЧЭ возникают свободные носители заряда, и во внешней цепи протекает импульс тока. Суммарный заряд Q , прошедший через внешнюю цепь,

пропорционален энергии W , переданной ионизирующей частицей алмазному чувствительному элементу:

$$Q = e \cdot \frac{W}{W_0} \cdot CCE, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд; W_0 – средняя энергия, необходимая для образования электронно-дырочной пары под действием ионизирующего излучения, для алмаза $W_0 = 0.0135$ МэВ; CCE – эффективность собирания заряда АЧЭ.

Выходной сигнал АЧЭ поступает на зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ), где преобразуется в импульс напряжения, амплитуда которого пропорциональна заряду Q . Выходной сигнал ЗЧУ подаётся на пиковый детектор (ПД), после чего преобразуется с помощью АЦП в цифровые коды амплитуды и подаётся в микроконтроллер (МК) для обработки. Таким образом, выходной сигнал алмазного детектора представляет собой спектр амплитуд напряжения, пропорциональных энергии, переданной ионизирующей частицей алмазному чувствительному элементу.

Каналы регистрации алмазного детектора отличаются друг от друга материалом и толщиной входных фильтров. Фильтры служат для смещения спектров энерговыделения ионизирующих частиц в алмазе (предварительной селекции падающих ионизирующих частиц по энергии).

В. Модель преобразования сигнала в алмазном детекторе

Рассмотрим формирование выходного сигнала алмазного детектора при воздействии моноэнергетических частиц одного вида. В силу стохастического характера взаимодействия ионизирующего излучения с твёрдым телом энергия W , переданная алмазному чувствительному элементу, будет случайной величиной. Пусть $g(W, E)$ – плотность распределения энергии, переданной АЧЭ попавшей в него ионизирующей частицей с кинетической энергией E . Тогда, с учётом (1), плотность распределения выходного заряда $h(Q, E)$ можно рассчитать по формуле:

$$h(Q, E) = g\left(\frac{W_0 \cdot Q}{e \cdot CCE}, E\right) \cdot \frac{W_0}{e \cdot CCE}. \quad (2)$$

В предположении о прямой пропорциональности между амплитудой выходного напряжения ЗЧУ U и зарядом Q , плотность распределения амплитуд $A(U, E)$ рассчитывается по формуле:

$$A(U, E) = h(C_{eff} \cdot U, E) \cdot C_{eff}, \quad (3)$$

где C_{eff} – эффективная ёмкость ЗЧУ:

$$U = \frac{Q}{C_{eff}}. \quad (4)$$

При воздействии ионизирующего излучения одного вида с энергетическим спектром $f(E)$ (МэВ⁻¹·см⁻²·с⁻¹) среднее количество отсчётов в спектре выходного

сигнала алмазного детектора $dN(U)$ будет определяться выражением:

$$dN(U) = t \cdot dU \cdot \int_0^{\infty} f(E) \sigma(E) A(U, E) dE, \quad (5)$$

где t – длительность регистрации ИИ; dU – спектральный интервал выходного сигнала; $\sigma(E)$ – эффективное сечение регистрации алмазным чувствительным элементом ионизирующего излучения с энергией E . Эффективное сечение учитывает взаимное расположение АЧЭ и других составных частей детектора, в первую очередь входных фильтров и компонентов корпуса.

Объединяя выражения (2) – (5), получаем

$$dN(U) = t \cdot dU \cdot \int_0^{\infty} f(E) B(U, E) dE, \quad (6)$$

где $B(U, E)$ – функция, зависящая от параметров алмазного детектора и не зависящая от спектра регистрируемых ионизирующих частиц:

$$B(U, E) = \sigma(E) \cdot g\left(\frac{W_0 C_{eff} U}{e \cdot CCE}, E\right) \cdot \frac{W_0 C_{eff}}{e \cdot CCE}. \quad (7)$$

Выражение (6) можно рассматривать как интегральное уравнение относительно функции $f(E)$, для решения которого необходимо знать ядро уравнения $B(U, E)$.

С. Методы определения параметров модели

Для нахождения функции $B(U, E)$ необходимо вычислить следующие параметры модели:

- 1) зависимость эффективного сечения регистрации ионизирующих частиц алмазным чувствительным элементом от кинетической энергии частиц $\sigma(E)$;
- 2) плотности распределения энергии, переданной АЧЭ моноэнергетичным ионизирующим излучением $g(W, E)$;
- 3) эффективность собирания заряда алмазного чувствительного элемента CCE ;
- 4) эффективную ёмкость зарядочувствительного усилителя C_{eff} .

Параметры модели, подлежащие определению, вычисляются расчётными и экспериментальными методами. Движение ионизирующих частиц и передача энергии алмазному чувствительному элементу моделируется методом Монте-Карло в среде Geant4. Связь выходного сигнала алмазного детектора и энергии, переданной АЧЭ, устанавливается путём анализа спектров выходного сигнала ЗЧУ, экспериментально полученных при воздействии моноэнергетичных ионизирующих излучений различных видов.

Моделирование в среде Geant4 проводится следующим образом. Модель алмазного детектора помещается внутрь полусферы, с поверхности которой вылетают моноэнергетичные ионизирующие частицы с кинетической энергией E_0 . Задаётся общее количество первичных частиц $N_0(E_0)$ и определяется спектр энергии,

переданной АЧЭ $dN(W, E_0)/dW$. Потоки частиц считаются однородными и изотропными:

$$f(E) = \frac{N_0(E_0)}{S \cdot t} \cdot \delta(E - E_0), \quad (8)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, S – площадь полушария. Тогда, аналогично (5), получаем формулу для спектра переданной энергии $dN(W, E_0)/dW$:

$$\frac{dN(W, E_0)}{dW} = \frac{N_0(E_0)}{S} \sigma(E_0) g(W, E_0). \quad (9)$$

Таким образом, моделирование взаимодействия потоков моноэнергетических ионизирующих частиц с алмазным чувствительным элементом позволяет определить произведение $\sigma(E_0) \cdot g(W, E_0)$. Связь между энергией W , переданной алмазному чувствительному элементу ионизирующей частицей, и амплитудой выходного напряжения ЗЧУ U выражается формулой:

$$U = \frac{e \cdot CCE}{W_0 \cdot C_{eff}} \cdot W. \quad (10)$$

Измерение эффективности сбора заряда алмазного чувствительного элемента CCE представляет достаточно сложную задачу. В связи с этим проводилось экспериментальная калибровка спектров выходного сигнала алмазного детектора по энергии.

Калибровка проводилась путём измерения спектров выходного сигнала ЗЧУ алмазного детектора при воздействии нейтронного излучения D-T генератора (энергия нейтронов 14,1 МэВ). Спектры измерялись при помощи процессора импульсных сигналов GreenStar. Энерговыведение нейтронов в алмазе хорошо изучено [3, 4], что даёт возможность идентифицировать пики экспериментальных спектров и определить значения поглощённой энергии. Экспериментально полученный спектр выходного сигнала ЗЧУ показан на рис. 2. На рисунке стрелкой показан высокоэнергетичный пик, соответствующий реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ (энерговыведение в алмазе 8,4 МэВ). Положение данного пика позволяет откалибровать шкалу процессора GreenStar в единицах энергии, поглощённой АЧЭ.

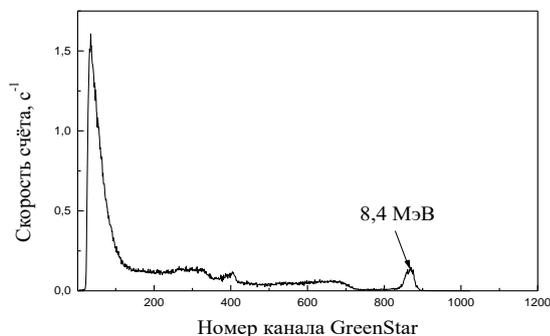


Рис. 2. Спектр энерговыведения нейтронов в АЧЭ

Сравнение спектров выходного сигнала алмазного детектора и спектров сигнала ЗЧУ, зарегистрированных

с помощью GreenStar, позволяет откалибровать спектры алмазного детектора в единицах поглощённой энергии. Также возможно проведение калибровки с использованием электронного и протонного излучения.

D. Спектры энерговыведения электронов и протонов в АЧЭ

На рис. 3 и 4 приведены спектры энерговыведения электронов и протонов, рассчитанные для АЧЭ первого канала регистрации в среде Geant4.

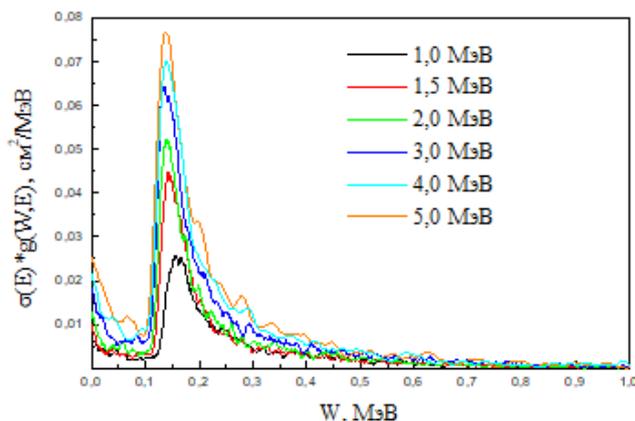


Рис. 3. Спектры энерговыведения электронов с различными исходными энергиями в АЧЭ первого канала регистрации алмазного детектора.

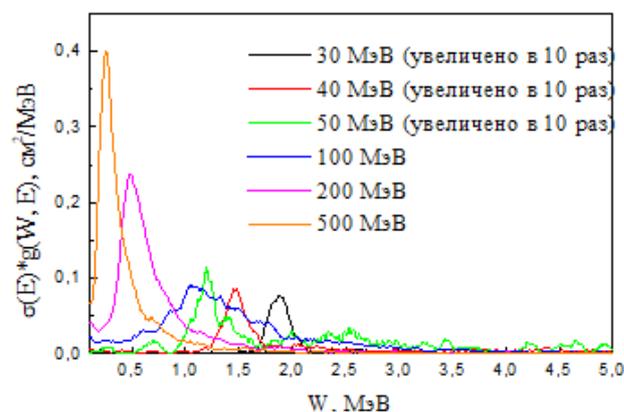


Рис. 4. Спектры энерговыведения протонов с различными исходными энергиями в АЧЭ первого канала регистрации алмазного детектора.

Рассмотрим основные особенности полученных спектров энерговыведения. Во-первых, спектры электронов и протонов существенно различаются по энерговыведению. Энерговыведение протонов превышает энерговыведение электронов в три – пять раз. Это позволяет эффективно разделять вклад протонов и электронов в выходной сигнал алмазного детектора. Во-вторых, положения максимумов энерговыведения для протонов сильно зависят от их энергии. Это упрощает процедуру восстановления спектров протонов. Для электронов форма спектров энерговыведения практически не зависит от исходной энергии.

III. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА

Цель имитационного моделирования работы алмазного детектора – получение совокупности выходных сигналов детектора при воздействии космических излучений различного спектрального состава. Полученные результаты будут использованы при обучении нейронных сетей для восстановления спектров регистрируемых детектором космических излучений.

A. Спектры космических излучений, используемые при имитационном моделировании

В данной работе проводилось имитационное моделирование работы алмазного детектора при воздействии электронов и протонов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), а также протонов солнечных космических лучей (СКЛ). В качестве исходных данных для моделирования использовались спектры из открытых источников [5]-[6]. Спектры электронов и протонов ЕРПЗ аппроксимировались степенными функциями кинетической энергии:

$$f_{e,p}^{ЕРПЗ}(E) = C_{e,p} \cdot E^{-\alpha_{e,p}}, \quad (11)$$

где множители $C_{e,p}$ определялись из условия нормировки спектров на интегральную плотность потока $1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Показатели степени принимали значения от минус 5 до минус 1.

Спектры протонов СКЛ задавались формулой:

$$f_p^{СКЛ}(E) = D_p \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-\gamma} \cdot \frac{1}{\beta}, \quad (12)$$

где p – импульс протона, МэВ/с:

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E \cdot (2E_0 + E)}; \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{E \cdot (2E_0 + E)}}{E_0 + E}; \quad (14)$$

c – скорость света, E_0 – энергия покоя протона, p_0 – характеристический импульс, $p_0 = 239 \text{ МэВ/с}$; D_p – нормировочный множитель;

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^\delta, \quad (15)$$

где γ_0 может принимать значения от минус 6,8 до минус 3,4, δ может принимать значения от 0,06 до 0,20.

Спектры космических излучений, использованные при моделировании, приведены на рис. 5, 6, 7.

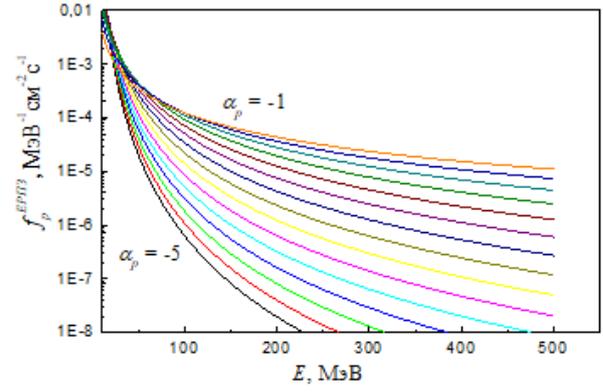


Рис. 5. Спектры электронов ЕРПЗ

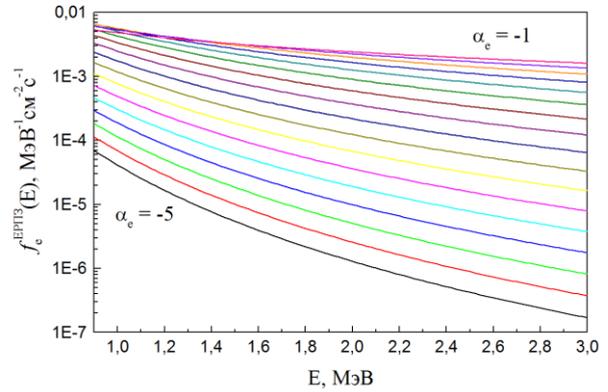


Рис. 6. Спектры протонов ЕРПЗ

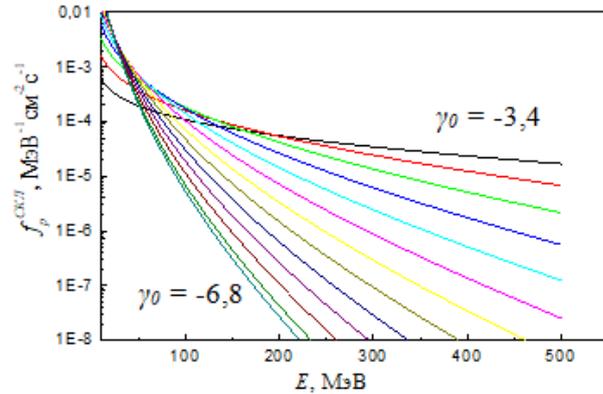


Рис. 7. Спектры протонов СКЛ

B. Выходной сигнал алмазного детектора

При имитационном моделировании работы алмазного детектора рассчитывались спектры выходного сигнала в единицах энергии, переданной алмазному детектору. Расчёт проводился аналогично расчёту по формуле (5):

$$\frac{dN(W)}{dWdt} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} f(E) \sigma(E) g(W, E) dE, \quad (16)$$

где E_{\min} и E_{\max} – минимальная и максимальная энергия регистрируемых ионизирующих частиц.

Результаты моделирования выходного сигнала алмазного детектора при воздействии электронов ЕРПЗ приведены на рис. 8.

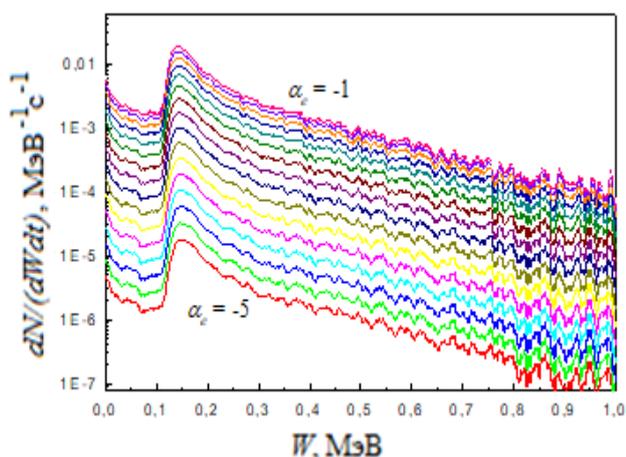


Рис. 8. Спектры выходного сигнала алмазного детектора при воздействии электронов ЕРПЗ

Из рис. 8 видно, что форма спектров выходного сигнала алмазного детектора практически не изменяется при изменении жёсткости энергетических спектров электронов ЕРПЗ – меняется только амплитуда спектров. Это означает, что с помощью одного канала регистрации невозможно восстановить исходный энергетический спектр электронов. Для корректного восстановления спектров космического излучения в алмазном детекторе используется четыре канала регистрации, отличающихся толщиной входных фильтров. Входные фильтры отсекают низкоэнергичное космическое излучение, осуществляя физическое разделение частиц по энергии.

На рис. 9 и 10 приведены спектры выходного сигнала алмазного детектора при воздействии протонов ЕРПЗ и СКЛ. Следует отметить две важные особенности полученных спектров:

- 1) энергия, передаваемая протонами алмазному чувствительному элементу, в три – четыре раза выше, чем энергия, передаваемая электронами (в среднем по спектрам);
- 2) спектры выходного сигнала алмазного детектора сильно различаются при изменении жёсткости энергетического спектра протонов. Высокоэнергичные протоны дают сигнал с меньшей амплитудой, чем низкоэнергичные.

Указанные особенности позволяют эффектно разделить выходные сигналы, полученные при воздействии электронов и протонов, а также получить информацию о форме энергетического спектра протонов. Тем не менее, для повышения точности при восстановлении спектров будут использованы сигналы четырёх каналов регистрации.

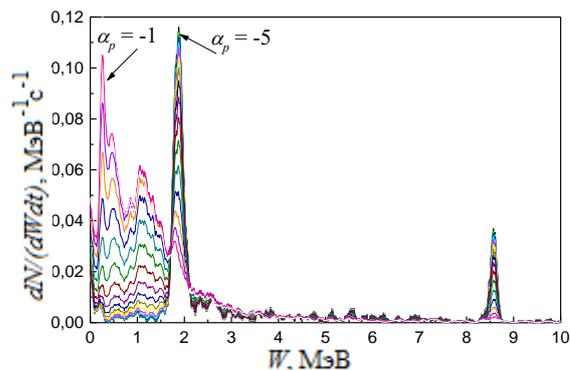


Рис. 9. Спектры выходного сигнала алмазного детектора при воздействии протонов ЕРПЗ

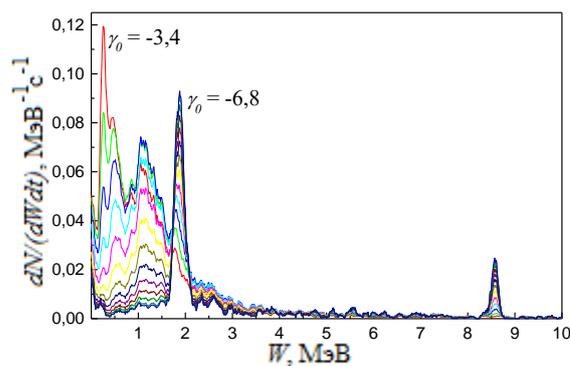


Рис. 10. Спектры выходного сигнала алмазного детектора при воздействии протонов СКЛ

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена физико-математическая модель алмазного детектора ионизирующих излучений, экспериментально определены её параметры. Проведено имитационное моделирование работы алмазного детектора, рассчитаны спектры выходного сигнала при воздействии электронов и протонов ЕРПЗ, а также протонов СКЛ. Показано, что анализ выходного сигнала алмазного детектора позволяет разделить вклад электронов и протонов, а также вклад протонов высоких и низких энергий. Для восстановления энергетических спектров электронов необходимо использование нескольких каналов регистрации. Полученные результаты будут использованы при обучении нейронных сетей для решения задач восстановления спектров регистрируемых космических излучений.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при частичной поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям), проект № 61893.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Анашин В.С., Григорьева С.Б., Козюкова О.С., Ляхов И.А., Протопопов Г.А. Анализ современного программного обеспечения для оценки локальных условий функционирования СБИС на борту космических аппаратов в части ионизирующих излучений космического пространства // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2014. Сб. трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2014. Ч. 3. С. 189–192.
- [2] Kania D.R., Landstrass M.I., Plano M.A., Pan L.S., Han S. Diamond radiation detectors// Diamond and Related Materials. 1993. V. 2. P. 1012–1019.
- [3] Истратов А.Ю., Захарченко К.В., Каперко А.Ф., Колубин В.А., Кулагин В.П., Курочкин Р.И. Применение нейросетевого подхода к измерениям потоков космического излучения // Измерительная техника. 2016. №3. С. 49–54.
- [4] Shimaoka T., Kaneko J.H., Ochiai K., Tsubota M., Shimmyo H., Chayahara A., Umezawa H., Watanabe H., Shikata Sh., Isobe M., Osakabe M. A diamond 14 MeV neutron energy spectrometer with high energy resolution // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 023503.
- [5] Алтухов А.А., Захарченко К.В., Ибрагимов Р.Ф., Колубин В.А., Львов С.А., Тюрин Е.М. Калибровка энергетической шкалы блока регистрации космических частиц на основе алмазных чувствительных элементов с использованием нейтронного излучения // Сб. трудов 22 Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость 2019». 2019. С. 79–80.
- [6] Безродных И.П., Тютнев А.П., Семёнов В.Т. Радиационные эффекты в космосе. Ч. 1. Радиация в околоземном космическом пространстве. М.: ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», 2014. 106 с.
- [7] URL: <http://swx.sinp.msu.ru/models/index.php?gcm=1> (дата обращения: 30.08.2021)

Simulation of the Operation of a Diamond Detector of Ionizing Radiation

A.A. Altukhov, K.V. Zakharchenko, V.A. Kolyubin

Industrial Technological Center “UralAlmazInvest”, Ltd, nanophys@mail.ru

Abstract – Purpose. Diamond ionizing radiation detectors are highly resistant to radiation and might be used on the outer surface of the spacecraft. This determines the prospects for their application as space radiation monitors. To recover the spectra of cosmic radiation from the output of the detector, a mathematical model has been developed that describes the transformation of information in a diamond detector.

Methods. The output of the detector is the spectrum of signal amplitude which is proportional to the energy transferred to diamond sensitive element by ionizing radiation. The proportionality coefficient is determined experimentally analyzing the detector output under action of neutron radiation. So the simulation of the detector output means the simulation of transferred energy spectra. We use Geant4 simulation to obtain these spectra for electron and proton radiation. Simulation of the detector output has been carried out using the spectra of space radiation approximated by power functions.

Results and discussion. The spectra of energy transferred to diamond sensitive element have been obtained. The energy transferred by the electrons is from 3 to 10 times less than that transferred by protons so the signals of electrons and protons are distinguished easily. The output spectra of the detector under action of hard and soft electrons are similar so additional registration channels are required. The output of detector under action of hard proton radiation differs from that for soft proton radiation so the initial energy spectra might be recovered. The data obtained are to be used in neural network learning for processing the detector output.

Keywords — diamond detector, ionizing radiation, mathematical modeling, electrons, protons.

REFERENCES

- [1] Anashin V.S., Grigoryeva S.B., Kozyukova O.S., Lyakhov I.A., Protopopov G.A. Recent software for VLSI operating in space radiation environment estimation analysis // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2014. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2014. Part 3. P. 189–192. (in Russian).
- [2] Kania D.R., Landstrass M.I., Plano M.A., Pan L.S., Han S. Diamond radiation detectors// Diamond and Related Materials. 1993, no. 2, pp. 1012–1019.
- [3] Istratov A.Yu., Zakharchenko K.V., Kaperko A.F., Kolyubin V.A., Kulagin V.P., Kurochkin R.I. Application of a neural network approach to measurements of cosmic ray fluxes // Measurement techniques. 2016, vol. 59, no. 3, pp. 293–302.
- [4] Shimaoka T., Kaneko J.H., Ochiai K., Tsubota M., Shimmyo H., Chayahara A., Umezawa H., Watanabe H., Shikata Sh., Isobe M., Osakabe M. A diamond 14 MeV neutron energy spectrometer with high energy resolution // Rev. Sci. Instrum. 2016, vol. 87, p. 023503.
- [5] Altukhov A.A., Zakharchenko K.V., Ibragimov R.F., Kolyubin V.A., L'vov S.A., Tyurin E.M. Calibration of energy scale of the instrumentation of cosmic particles registration based on diamond sensitive elements using neutron radiation // Sb. trudov 22 Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Radiatsionnaya stoikost; radioelektronnykh sistem» - «Stoikost' 2019». – Proc. 22th All-Russian scientific and technical conference «Radiation stability of radioelectronic systems» - «Stability 2019». Lytkarino, 2019, pp. 79–80. (in Russian).
- [6] Bezrodnyh I.P., Tyutnev A.P., Semyonov V.T. Radiatsionnye effecty v kosmose. CH 1. Radiatsiya v okolozemnom kosmicheskom prostranstve – Radiation effects in the space. Part 1. Radiation in near-Earth space environment. M.: ОАО «VNIIEEM corporation» Publ., 2014. 106 p. (in Russian)
- [7] URL: <http://swx.sinp.msu.ru/models/index.php?gcm=1> (access date: 30.08.2021)