

Влияние изотопного состава особо чистого германия на характеристики процессов взаимодействия с потоком нейтронов

В. Е. Соловьев¹, Ю. Ю. Бунькова^{1,2}, И. Э. Новиков¹, О. В. Вольпяс^{1,2}✉

¹ ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ o.volpyas@rtc.ru

Аннотация. Возможность изменения свойств полупроводниковых материалов актуальна для развития микроэлектроники и решения задач в области перспективных технологий по созданию полупроводниковых материалов с новыми свойствами. Для решения подобных задач исследованы механизмы взаимодействия нейтронного излучения с изотопами особо чистого германия (ОЧГ). Изучение данного полупроводникового материала особенно актуально из-за его использования в детектирующих структурах при разработке измерительной аппаратуры с высоким энергетическим разрешением, предназначенной для анализа сложных спектров излучения.

Ключевые слова: ОЧГ, нейтронное излучение, деградация полупроводника, полупроводник, изотопы германия

Для цитирования: Влияние изотопного состава особо чистого германия на характеристики процессов взаимодействия с потоком нейтронов / В. Е. Соловьев, Ю. Ю. Бунькова, И. Э. Новиков, О. В. Вольпяс // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 8. С. 5–13. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-5-13.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов:

Соловьев В. Е. – постановка проблемы, проведение моделирования, описание результатов и формирование выводов исследования.

Бунькова Ю. Ю. – подготовка и редактирование текста, табличное и графическое представление результатов, описание результатов и формирование выводов исследования.

Новиков И. Э. – анализ литературы, научное редактирование текста статьи.

Вольпяс О. В. – разработка концепции статьи, подготовка и редактирование текста.

Финансирование. Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2023-0001 1022113000016-5-2.5.1 № 075-03-2023-193/2 «Исследование влияния нейтронного излучения на свойства полупроводниковых материалов».

Influence of the Isotope Composition of High-Pure Germanium on its Interaction with a Neutron Flux

V. E. Solovyev¹, Yu. Yu. Bunkova^{1,2}, I. Eu. Novikov¹, O. V. Volpyas^{1,2}✉

¹ Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ o.volpyas@rtc.ru

Abstract. The possibility of varying the properties of semiconductor materials is relevant for the development of microelectronics and creation of semiconductor materials with improved properties. In this study, we set out to investigate the mechanisms of interaction of neutron radiation with high-purity germanium (HPG). This semiconductor material can be used as part of detecting structures in the development of high energy-resolution measuring equipment designed to analyze complex radiation spectra.

Keywords: HPG; neutron radiation, semiconductor degradation, semiconductor, germanium isotopes

For citation. Influence of the Isotope Composition of High-Pure Germanium on its Interaction with a Neutron Flux / V. E. Solovyev, Yu. Yu. Bunkova, I. Eu. Novikov, O. V. Volpyas // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 8. P. 5–13. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-5-13.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Author Contributions:

Solovyev V. E. – problem statement, modeling, presentation of the results, drawing the conclusions.

Bunkova Yu. Yu. – writing the initial draft of the manuscript and its revision, data visualization, presentation of the results, drawing the conclusions.

Novikov I. Eu. – literature review, critical revision of the manuscript.

Volpyas O. V. – concept development, preparation and critical revision of the manuscript.

Acknowledgements: The results were obtained within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia FNRG-2023-0001 1022113000016-5-2.5.1 no. 075-03-2023-193/2 «Investigation of neutron radiation induced effect on the properties of semiconductor materials».

Введение. При изучении кристаллов ОЧГ были рассмотрены результаты, показывающие возможность получения высокочистого изотопно обогащенного германия [1].

Использование изотопов материалов в микроэлектронике, оптике и других сферах открывает новые горизонты производства принципиально новых устройств на их основе. В данной статье представлены результаты исследования факторов воздействия нейтронного излучения на различные изотопы ОЧГ.

В ходе проведенных исследований были решены следующие задачи:

– выявление механизма воздействия нейтронного излучения на кристаллы ОЧГ;

– изучение восприимчивости ^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge , ^{76}Ge к нейтронному излучению.

О влиянии нейтронного излучения на полупроводниковые материалы. Нейтроны взаимодействуют с веществом через электроны и ядра. Хотя нейтрон обладает магнитным моментом и его взаимодействие с электронами не исключено, сечение такого взаимодействия малое и практически не влияет на поведение нейтрона внутри вещества по сравнению с взаимодействием с ядрами атомов вещества. В отличие от протонов, которые не могут эффективно взаимодействовать с ядром при малых энергиях из-за кулоновского барьера, нейтроны даже при низких энергиях способны подойти к ядру на расстояние порядка радиуса действия ядерных сил.

Типы взаимодействия нейтронов с ядрами вещества можно разделить на следующие категории [2]:

- 1) упругое рассеяние нейтрона на ядрах;
- 2) неупругое взаимодействие с возбуждением ядра;
- 3) различные реакции с поглощением нейтрона (радиационный захват – с опусканием гамма-квантов (n, γ), с вылетом заряженных частиц (n, p), (n, α); реакции деления (n, f) и др.).

Прямой анализ количества тех или иных взаимодействий, очевидно, не способен дать полную информацию о процессах, происходящих в структуре материала и о его деградации под действием нейтронного излучения. Несмотря на это, логично предположить, что по результатам сравнительного анализа количества взаимодействий можно судить о степени дефектообразования в материале, а также сделать вывод о его восприимчивости к нейтронному излучению.

О моделировании взаимодействия нейтронного излучения с кристаллами ОЧГ. Предварительный анализ размеров сечений показал, что сечения взаимодействия растут в сторону малых (тепловых) значений энергии, имеют резонансы в области от 100 эВ до 50 кэВ и медленно спадают в сторону энергии 14 МэВ. При этом выход упругого рассеяния нейтронов растет в сторону низких энергий, выход неупругого излучения имеет пороговый характер и излучение растет, начиная с энергии 100 кэВ, достигает максимума в области 5 МэВ, плавно спадает до энергии 10 МэВ и продолжает более резкий спад до энергии 14 МэВ. Реакция радиационного захвата прослеживается по всему спектру, усиливаясь в области 100 эВ, спадая до 20 эВ и, возрастая в сторону тепловых энергий. Пороговые реакции (n, p) и (n, α) проявляются, начиная от 3 МэВ, и увеличиваются в сторону больших энергий. Абсолютный выход реакций нейтронов прямо пропорционален толщине материала ОЧГ, при этом выход на единицу массы не зависит от его толщины.

Для оценки влияния спектра нейтронного излучения на кристаллы ОЧГ методом Монте-Карло проведены расчеты упругих и неупругих процессов и реакций (n, γ), (n, p), (n, α) в диапазоне энергий нейтронов от 0.025 эВ до 14 МэВ программой «Neutron Calculation» (разработана выпускником кафедры ЭЯФ СПбГПУ К. А. Багаевым, под руководством канд. физ.-мат. наук С. С. Козловского) и программой «MC Neutron» [2].

С помощью приведенных программных средств был рассчитан относительный вклад

упругих и неупругих взаимодействий, реакций (n, γ), (n, p), (n, α) в средах с указанными изотопными составами в зависимости от энергетического спектра нейтронов, образующихся при распаде ^{252}Cf или линейной энергии нейтронов заданной интенсивности. Рассмотрены воздействия нейтронов с числом событий 10^7 в геометриях ОЧГ-кристаллов различной толщины.

Подтверждено, что деградация ОЧГ-кристаллов нейтронами идет по всему энергетическому спектру, в разных частях спектра преобладают различные реакции, а значение деградации прямо пропорционально интенсивности потока нейтронов и времени воздействия.

Проведена оценка восприимчивости к нейтронному излучению германия с природным соотношением изотопов: ^{70}Ge (21.23 %), ^{72}Ge (27.66 %), ^{73}Ge (7.73 %), ^{74}Ge (35.94 %), ^{76}Ge (7.44 %) и чистых изотопов.

Результаты расчетов показали, что при природном соотношении изотопов германия у изотопа ^{76}Ge отмечается: меньше до 15 раз (от среднего по изотопам) выход реакции (n, γ), полное отсутствие реакций (n, p) и (n, α), меньше в 2.5 раза (от среднего по изотопам) выход неупругого взаимодействия. Полученная в результате расчетов пониженная восприимчивость вызвана относительно низким содержанием изотопа в природной смеси. Для полноценного анализа необходима оценка доли каждого вида взаимодействия в полном спектре воздействия нейтронов на вещество детектора из ОЧГ, имеющего конструкцию, соответствующую реальному детектору.

Рассчитаны основные реакции и полное взаимодействие нейтронов с веществом германия как природной смеси изотопов, так и отдельных обогащенных до 100 % изотопов. Мерой сравнения послужил интегральный счет взаимодействия нейтронов ^{252}Cf с веществом из изотопов природной смеси и веществом из чистых 100 % изотопов. Если принять общее число актов взаимодействия в веществе с природным соотношением изотопов за единицу, то для чистых изотопов в тех же условиях относительное число актов взаимодействия распределится следующим образом: $^{70}\text{Ge} - 0.73$; $^{72}\text{Ge} - 0.87$; $^{73}\text{Ge} - 2.09$; $^{74}\text{Ge} - 0.99$; $^{76}\text{Ge} - 1.05$ (рис. 1–5).

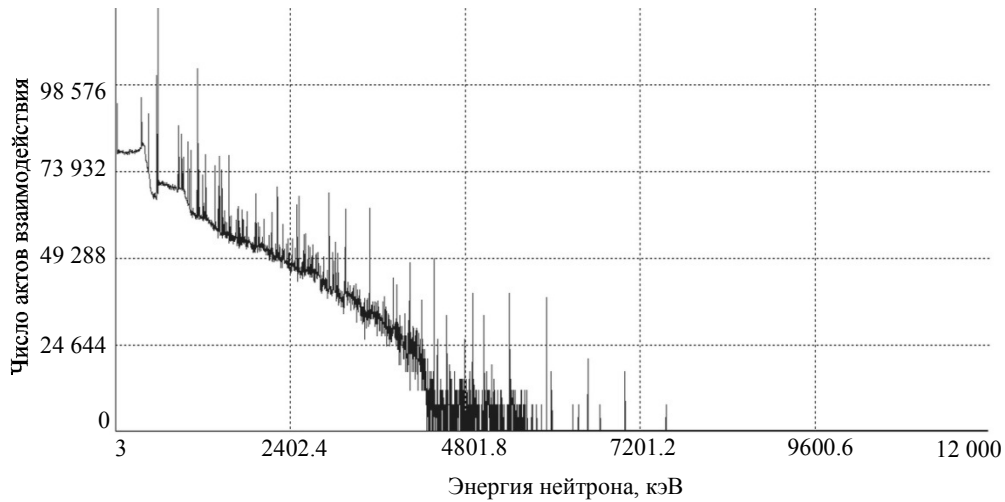


Рис. 1. Спектр взаимодействия нейтронов ^{252}Cf с чистым, 100 %-ным изотопом – ^{76}Ge
Fig. 1. Interaction of ^{252}Cf neutrons with a pure, 100 % isotope – ^{76}Ge

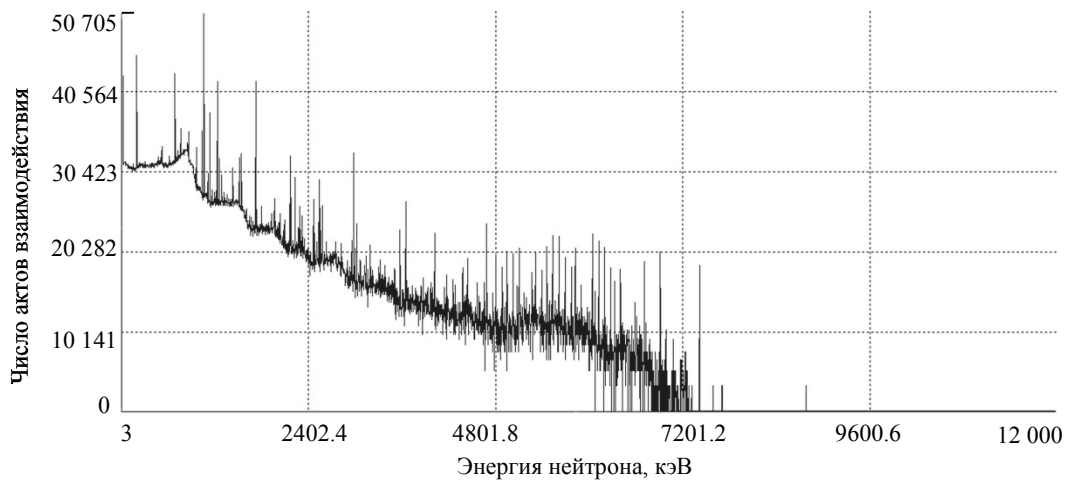


Рис. 2. Спектр взаимодействия нейтронов ^{252}Cf с чистым, 100 %-ным изотопом – ^{70}Ge
Fig. 2. Interaction of ^{252}Cf neutrons with a pure, 100 % isotope – ^{70}Ge

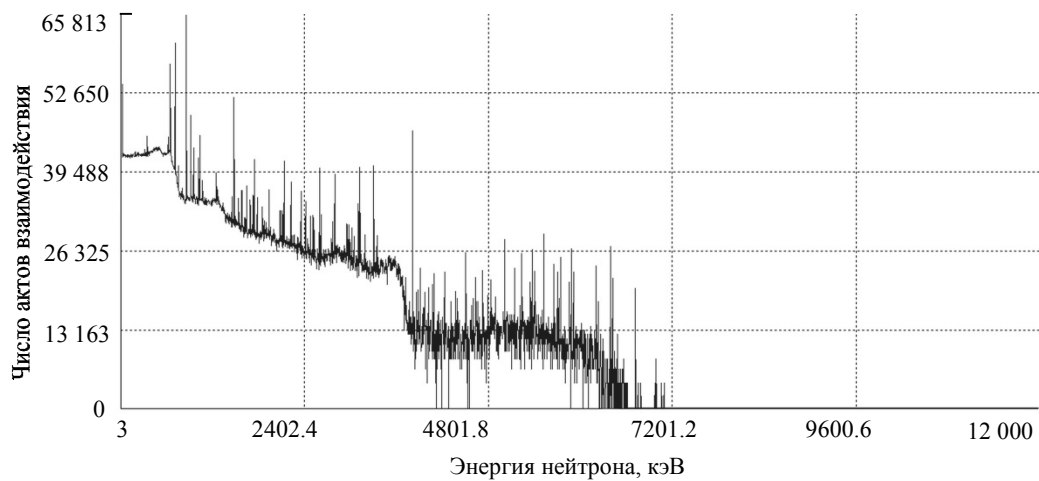


Рис. 3. Спектр взаимодействия нейтронов ^{252}Cf с чистым, 100 %-ным изотопом – ^{72}Ge
Fig. 3. Interaction of ^{252}Cf neutrons with a pure, 100 % isotope – ^{72}Ge

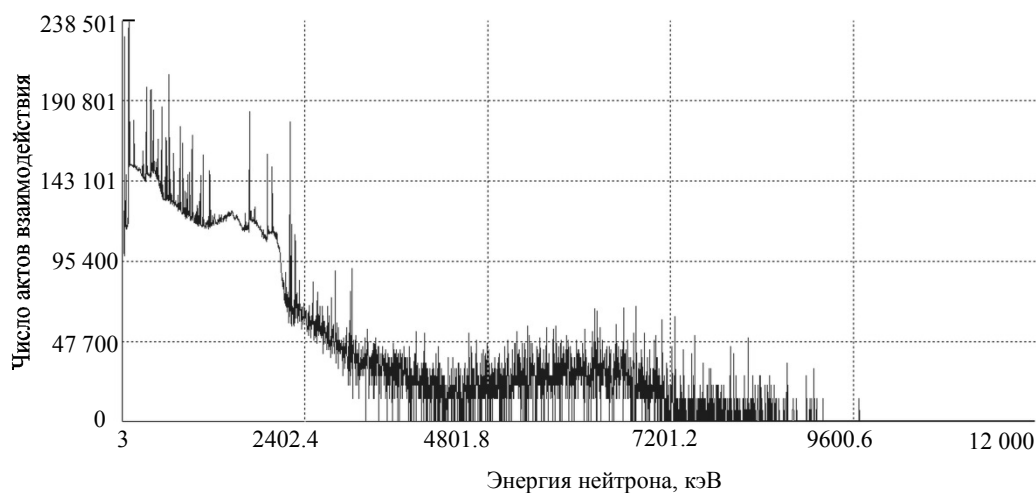


Рис. 4. Спектр взаимодействия нейтронов ^{252}Cf с чистым, 100 %-ным изотопом – ^{73}Ge
 Fig. 4. Interaction of ^{252}Cf neutrons with a pure, 100 % isotope – ^{73}Ge

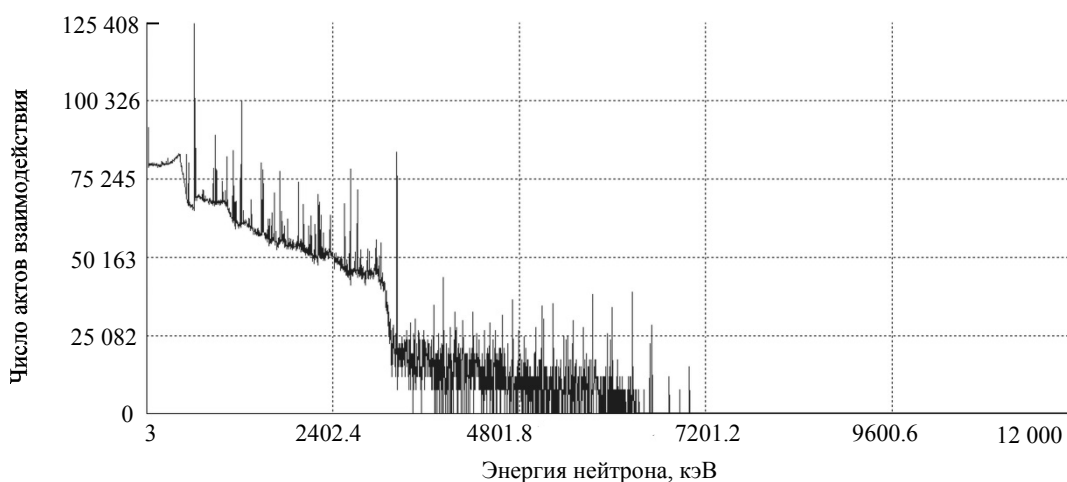


Рис. 5. Спектр взаимодействия нейтронов ^{252}Cf с чистым, 100 %-ным изотопом – ^{74}Ge
 Fig. 5. Interaction of ^{252}Cf neutrons with a pure, 100 % isotope – ^{74}Ge

Выполненные расчеты показали следующее: у чистых изотопов германия (^{70}Ge и ^{72}Ge) наблюдается некоторое снижение восприимчивости к нейтронному излучению, которое у ^{70}Ge достигает почти 30 %. Один из изотопов – ^{73}Ge , обладает повышенной восприимчивостью к нейтронному излучению в 2.09 раза выше среднего значения (полученные данные могут найти применение, например, для спектрометрии нейтронного излучения).

Установлено, что помимо деградации ОЧГ-кристаллов нейтронами по всему энергетическому спектру определен вклад в воздействие нейтронов вносят и особенности восприимчивости изотопов германия к нейтронному излучению.

При проведении предыдущих исследований было установлено, что значимые отличия в соответствующих характеристиках взаимодействия

нейтронов с изотопами происходили в основном из-за различного содержания изотопов и были прямо пропорциональны как содержанию изотопа, так и толщине исследуемого слоя.

Зависимости, представленные на рис. 6–10, представляют собой графическое сравнение пяти изотопов германия. В качестве математических моделей полупроводникового материала рассматривались пластины размером 10×10 см толщиной 10 см. По нормали к исследуемой пластине было направлено излучение нейтронов спектра спонтанного деления ^{252}Cf с числом событий 10^7 . Результаты моделирования были нормированы на активность источника, которая в данном случае также составляла 10^7 нейтронов.

На рис. 6 отражены чувствительности изотопов Ge к упругому рассеянию при облучении

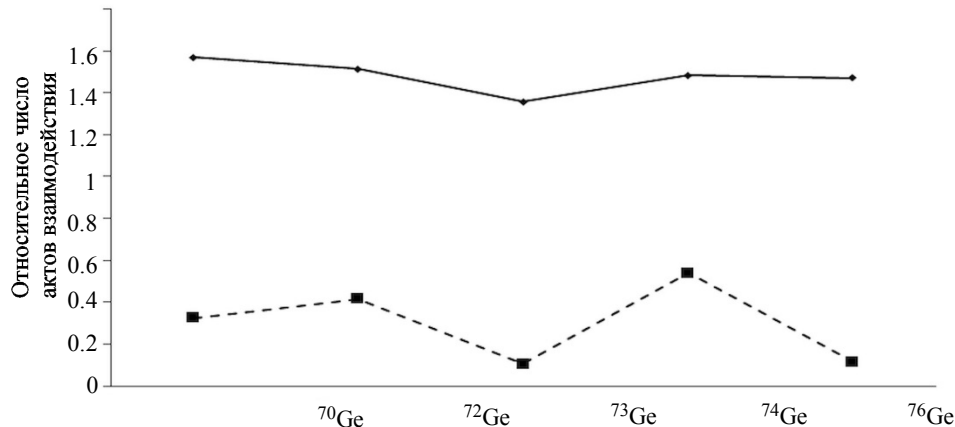


Рис. 6. Чувствительность обогащенных (—◆—) и природных (---■---) изотопов к упругому рассеянию при облучении нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf

Fig. 6. Sensitivity of enriched (—◆—) and natural (---■---) isotopes to elastic scattering when irradiated with neutrons of the spontaneous decay spectrum ^{252}Cf

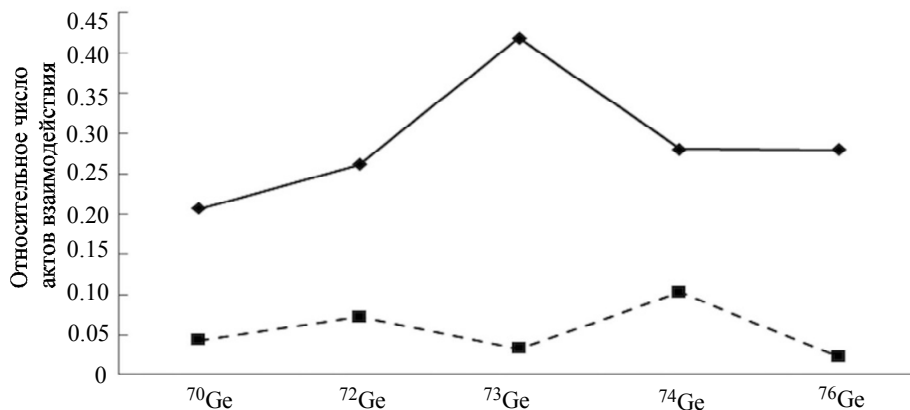


Рис. 7. Чувствительность обогащенных (—◆—) и природных (---■---) изотопов к неупругому рассеянию при облучении нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf

Fig. 7. Sensitivity of enriched (—◆—) and natural (---■---) isotopes to inelastic scattering when irradiated with neutrons of the spontaneous decay spectrum ^{252}Cf

нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf для обогащенных до 100 % изотопов и для их природного соотношения. Видно, что чувствительность к упругому рассеянию растет, в среднем, пропорционально содержанию изотопа.

Аналогичную картину мы наблюдаем на рис. 7, где отображена чувствительность изотопов Ge к неупругому рассеянию при облучении нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf .

Несколько иная картина отражена на рис. 8. Здесь представлена чувствительность изотопов Ge к реакции (n, γ) для обогащенных изотопов и для их природного соотношения при облучении нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf .

Выделяется доминирование чувствительности реакции (n, γ) ^{72}Ge как для обогащенного изотопа, так и для изотопа природной смеси.

Прослеживается закономерное уменьшение чувствительности к реакции (n, γ) , от ^{70}Ge к ^{76}Ge . Как в случае обогащенных изотопов, так и для их природного соотношения содержаний, изотоп ^{76}Ge обладает самой низкой чувствительностью реакции (n, γ) .

На рис. 9, 10 представлена чувствительность изотопов Ge к реакции (n, p) и (n, α) для обогащенных изотопов и для их природного соотношения при облучении нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf .

Как и в случае с реакцией (n, γ) , наблюдается закономерное уменьшение чувствительности и для обогащенных, и для природных изотопов. Изотоп ^{76}Ge обладает самой низкой чувствительностью реакции (n, p) и (n, α) при облучении нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf , так как в результате моделирования для исследуемых условий было получено 0 реакций такого типа.

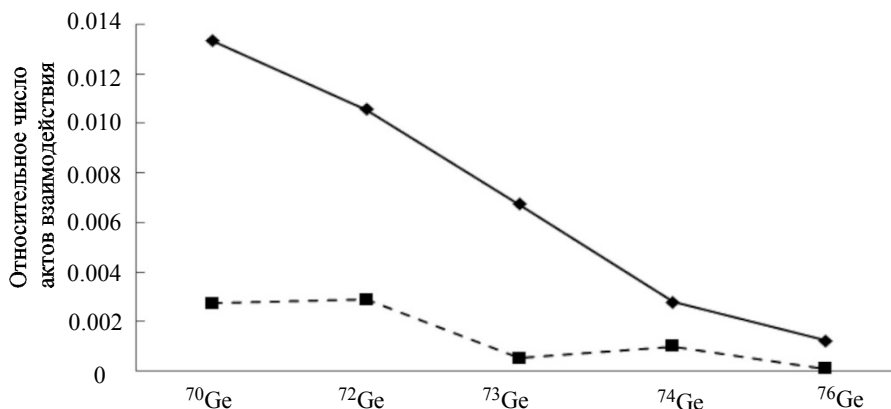


Рис. 8. Чувствительность обогащенных (—●—) и природных (---■---) изотопов к реакции (n, γ) при облучении нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf
 Fig. 8. Sensitivity of enriched (—●—) and natural (---■---) isotopes reaction (n, γ) when irradiated with neutrons of the spontaneous decay spectrum ^{252}Cf

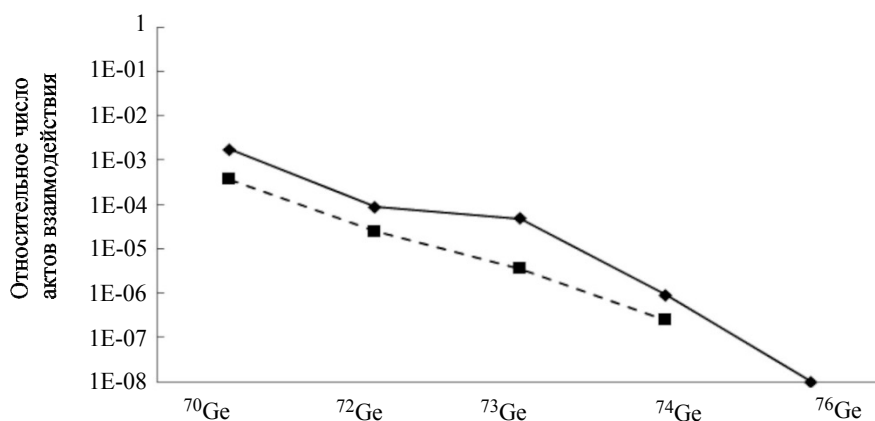


Рис. 9. Чувствительность обогащенных (—●—) и природных (---■---) изотопов к реакции (n, p) при облучении нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf
 Fig. 9. Sensitivity of enriched (—●—) and natural (---■---) isotopes reaction (n, p) when irradiated with neutrons of the spontaneous decay spectrum ^{252}Cf

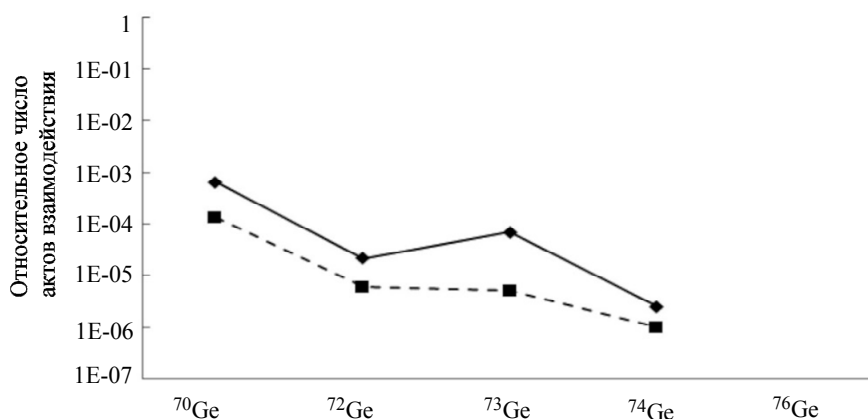


Рис. 10. Чувствительность обогащенных (—●—) и природных (---■---) изотопов к реакции (n, α) при облучении нейтронами спектра спонтанного деления ^{252}Cf
 Fig. 10. Sensitivity of enriched (—●—) and natural (---■---) isotopes reaction (n, α) when irradiated with neutrons of the spontaneous decay spectrum ^{252}Cf

Заключение. В ходе проведенных исследований получены следующие результаты.

Рассмотрены и промоделированы основные типы реакций, происходящих при взаимодей-

ствии нейтронного излучения с полупроводниковым материалом – особо чистым германием.

Определены наиболее восприимчивые к каждому из типов реакций изотопы германия: ⁷⁰Ge –

для упругого рассеяния, реакций типа (n, γ) , (n, α) , (n, p) ; ^{73}Ge – для неупругого рассеяния.

Для оценки степени влияния нейтронного излучения на ОЧГ-кристаллы необходим сравнительный анализ полученных результатов моделирования и запланированных экспериментов по исследованию структуры и свойств до и после воздействия нейтронного излучения.

На основании данных анализа будут разработаны рекомендации об использовании получен-

ных результатов исследований, включая перспективы развития предлагаемых подходов в проектах, связанных с технологиями создания элементной базы, обеспечивающей радиационную стойкость измерительной аппаратуры, предназначенной для экстремальных условий (космическая техника, измерительная аппаратура ионизирующих излучений в составе мобильных робототехнических комплексов).

Список литературы

1. Липский В. А. Получение и оптические свойства высокочистого изотопно обогащенного германия: дис. ... канд. хим. наук. Нижний Новгород: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятовых Российской академии наук, 2021. 119 с.

2. Св. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014611880 РФ. Программа имитационного трехмерного моделирования процессов взаимодействия

нейтронного излучения с веществом для получения функции отклика различных систем детектирования MS Neutron / К. А. Багаев, С. С. Козловский, В. Е. Соловьев; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК). Заявл. № 2013662194; опублик. 20.03.2014. 1 с.

Информация об авторах

Виктор Ефимович Соловьев – ведущий программист ГНЦ РФ «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики», 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 21.

E-mail: v.solovyev@rtc.ru

Юлия Юрьевна Бунькова – студентка гр. 9207 факультета электроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», инженер ГНЦ РФ «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики», 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 21.

E-mail: yu.bunkova@rtc.ru

Игорь Эдуардович Новиков – ГНЦ РФ «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики», инженер первой категории, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 21.

E-mail: novikov@rtc.ru

Ольга Валерьевна Вольпяс – студентка гр. 9371 факультета компьютерных технологий и информатики СПбГЭТУ «ЛЭТИ», программист ГНЦ РФ «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики», 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 21.

E-mail: o.volpyas@rtc.ru

References

1. Lipskij V. A. Poluchenie i opticheskie svojstva vysokochistogo izotopno obogashhennogo germanija: diss. ... kand. him. nauk. Nizhnij Novgorod: Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut himii vysokochistyh veshhestv im. G. G. Devjatyh Rossijskoj akademii nauk, 2021. 119 s.

2. Sv. o gos. registracii programmy dlja JeVM № 2014611880 RF. Programma imitacionnogo trehmernogo modelirovanija processov vzaimodejstvija nejtron-

nogo izluchenija s veshhe-stvom dlja poluchenija funkcii otklika razlichnyh sistem detektirovanija MS Neutron / K. A. Bagaev, S. S. Kozlovskij, V. E. Solov'ev; zjavitel' i pravoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe nauchnoe uchrezhdenie «Central'nyj nauchno-issledovatel'skij i opytно-konstruktorskij institut robototekhniki i tehničeskoj kibernetiki» (CNII RTK). Zjavil. № 2013662194; opubl. 20.03.2014. 1 s.

Information about the authors

Viktor E. Solovyev – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, lead programmer, 21, Tikhoretsky prospect, Saint Petersburg, 194064, Russia.

E-mail: v.solovyev@rtc.ru

Yuliya Yu. Bunkova – student of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, engineer, 21, Tikhoretsky prospect, Saint Petersburg, 194064, Russia.

E-mail: yu.bunkova@rtc.ru

Igor E. Novikov – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, first category engineer, 21, Tikhoretsky prospect, Saint Petersburg, 194064, Russia.

E-mail: novikov@rtc.ru

Olga V. Volpyas – student of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, programmer, 21, Tikhoretsky prospect, Saint Petersburg, 194064, Russia.

E-mail: o.volpyas@rtc.ru

Статья поступила в редакцию 02.06.2023; принята к публикации после рецензирования 22.06.2023; опубликована онлайн 19.10.2023.

Submitted 02.06.2023; accepted 22.06.2023; published online 19.10.2023.
