

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ БЕТА-РАСПАДА ^{14}C НА БАЗЕ SiC/Si

*Е. В. Андреев^{а, 1}, М. В. Долгополов^{б, 2},
В. И. Чепурнов^{в, 3}, А. С. Чипура^{б, 4}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

^б Самарский государственный технический университет, Самара, 443100, Россия

^в Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева,
Самара, 443100, Россия

Представлены результаты исследования бета-вольтаических преобразователей энергии и конкретно устройств на базе гетероструктур с SiC/Si , использующих радионуклид ^{14}C в качестве источника бета-излучения. В полупроводниковом чипе $\text{Si}^{14}\text{C}/\text{Si}$ органично интегрированы инжектор ^{14}C и преобразователь энергии электронов бета-распада на основе гомо- или гетероперехода SiC/Si для повышения удельной мощности при обеспечении радиационной безопасности самопоглощением бета-излучения полупроводником. Достижимая плотность мощности $0,3 \text{ мВт/см}^3$ при толщине карбида кремния $0,4 \text{ мкм}$, максимальная плотность тока короткого замыкания 900 нА/см^2 , КПД $21,31\%$. Результаты моделирования и экспериментальные исследования свидетельствуют, что легированная радионуклидом пленка карбида кремния на подложке кремния имеет улучшенные выходные характеристики преобразователя энергии за счет оптимального распределения неравновесных зарядов во внутреннем слое структуры преобразователя с молекулярно встроенным инжектором. Впервые количественно установлено включение ^{14}C в решетку SiC по изотопному сдвигу фононных мод ($\Delta\omega_{\text{TO}} = +15,0 \text{ см}^{-1}$). Актуальность задачи бета-вольтаики — в синхронизации достижений микроэлектроники и источников энергии для ее автономного функционирования на основе преобразования энергии высокой удельной плотности. Это возможность отложенного во времени, соответствующем периоду полураспада, включения программного обеспечения электронного устройства или накопления информации в базах данных на интегрированном чипе интегральной схемы «ИС — источник ее питания».

The results of a research of betavoltaic energy converters and specifically the devices on SiC/Si -based heterostructures using the ^{14}C radionuclide as a source of beta radiation are presented. The $\text{Si}^{14}\text{C}/\text{Si}$ semiconductor chip organically integrates a beta electron injector and an energy converter based on a homo- or heterojunction to increase the specific power while ensuring radiation safety by self-absorption of radiation by a semiconductor. The achievable power density is $0.3 \text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^3$ with a silicon carbide thickness of $0.4 \text{ }\mu\text{m}$, the maximum short-circuit current density is $900 \text{ nA}/\text{cm}^2$, efficiency is 21.31% . The results of modeling and experimental studies indicate that a silicon carbide film doped with a radioisotope on a silicon substrate has improved output characteristics of the energy converter due to the optimal distribution of non-equilibrium charges in the inner layer of the converter structure with a molecularly integrated injector. First quantification of inclusion of ^{14}C into SiC lattice by isotopic shift of phonon modes ($\Delta\omega_{\text{TO}} = +15.0 \text{ cm}^{-1}$) is given. The relevance of the betavoltaic task is to synchronize the achievements of microelectronics and

¹E-mail: evandreev@jinr.ru

²E-mail: mvdolg@yandex.ru

³E-mail: chvi44@yandex.ru

⁴E-mail: al_five@mail.ru

energy sources for its autonomous functioning based on the conversion of energy of high specific density. This is the possibility of switching on the software of an electronic device delayed in time, corresponding to the half-life period, or accumulating information in databases on an integrated circuit "IC Chip – Power Source".

PACS: 84.60.-h; 88.30.jr; 61.72.uj; 78.30.Fs; 73.61.-r

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные инициативы 2025 г. направлены на удовлетворение растущего спроса на энергию при одновременном ускоренном сокращении выбросов углекислого газа, способствуя тем самым устойчивому и безопасному энергетическому будущему [1]. К ним относятся: (i) повышение энергоэффективности, (ii) увеличение производства устойчивой возобновляемой энергии, (iii) диверсификация производства электроэнергии и технологий с низким уровнем выбросов углерода и (iv) обеспечение разумной интеллектуальной энергетической инфраструктуры [2] с интегрированием ядерных источников питания и ядерных батарей [3, 4] как самогенерирующихся источников энергии. В данном контексте на стыке технологий ядерной и полупроводниковой микроэлектроники определяется одним из элементов фото-бета-вольтаика и проблемы создания бета-вольтаической (или бета-электрической) батареи — ядерного источника питания, который вырабатывает электроэнергию путем непосредственного использования энергии большой удельной плотности, выделяемой в результате бета-вольтаического эффекта в полупроводнике при распаде бета-излучающих радиоизотопов [5, 6]. Несмотря на то, что они называются «батареями», в отличие от других батарей, ядерные батареи не являются электрохимическими и не требуют зарядки и подзарядки; следовательно, они адаптируются и интегрируются в устройства, которые должны функционировать безопасно и автономно в течение длительного периода времени.

Варианты исполнения бета-вольтаического преобразователя энергии отличаются назначением. В статье мы акцентируем внимание на энергопреобразователях, адаптируемых для нагрузок микро- и наномощности для микросхем навесного исполнения, приводов микросистемной техники, импульсных датчиков систем мониторинга удаленных или недоступных объектов техники, для биомедицинских применений. Известно два типа энергопреобразователей такого класса — конденсаторные и полупроводниковые, которые могут сочетаться с современными твердотельными накопителями энергии — компактными ионисторами, пригодными для навесного монтажа или интеграции в микросхему. Для непосредственной интеграции в микросхемы приоритет отдается полупроводниковым преобразователям. Для данного варианта исполнения имеются технические решения, анализ которых является целью настоящей статьи в контексте решения ключевых задач современной микроэнергетики:

- 1) интеграция источника и преобразователя в одном чипе, что критично для автономных устройств IoT и космической электроники;
- 2) синхронизация микроэлектроники и энергоисточников для создания самообеспечивающихся систем («ИС — источник ее питания»).

Примерами таких интенсивно разрабатываемых сегодня устройств являются гибридные ядерные суперконденсаторы и батареи конденсаторного типа с жидким электролитом [7], перезаряжаемые ионные батареи гибридного типа фото/бета-перезаря-

жаемые и системы «бета-вольтаика (^{63}Ni) + цинк-ионный аккумулятор» [8, 9] и их комбинации с гетероструктурными интерфейсами с ^{14}C [10] для перезарядки. Ядерные батареи становятся здесь интегрированными самогенерирующимися источниками энергии, преобразующими энергию самопроизвольного распада радиоизотопов в электрическую энергию. Достижимая удельная мощность бета-части 50–70 нВт/см³, емкость Zn-ионной части 120 мА · ч/г, основные преимущества: компактность и устойчивость к циклическим нагрузкам.

Несмотря на то, что история технического развития бета-вольтаических источников питания началась более 70 лет назад, практически одновременно с предложением электронного вольтаического эффекта [11] и созданием первых полупроводниковых фотовольтаических и бета-вольтаических устройств [12] (а первая атомная батарея на основе бета-распада радия была создана Генри Мозли [13] еще в 1913 г. на заре развития ядерной физики), только в последние годы стали появляться экспериментальные интегрированные высокоэффективные бета-вольтаические элементы [4, 10, 14–18] с целью автономного питания микросхем и нано- и микроэлектромеханических систем (Н/МЭМС) и устройств. Это связано, с одной стороны, с повсеместным распространением примерно с 2015 г. Н/МЭМС во всех сферах жизни при уменьшении размеров устройств управления до масштабов порядка нанометров, которые требуют автономного соразмерного милли-микро-нановаттного питания, с другой стороны, — с выходом к 2000 г. на предел потенциальных возможностей в этом плане кремниевой микроэлектроники и с переходом, начиная примерно с 2010 г., на тонкопленочные покрытия и широкозонные полупроводниковые материалы 3-го поколения.

Многие научные центры стали стремительно моделировать и создавать новые современные композиционные материалы. И, в том числе, в связи с необходимостью сокращения энергетических потерь и рядом рекомендаций, общий перечень которых достаточно хорошо известен [19]. Отличием бета-вольтаического эффекта от фотовольтаического является то, что каждый бета-электрон, испытывая в основном ионизационные потери в диапазоне энергий до порога нарушения атомной решетки полупроводника примерно 200–250 кэВ, образует электронно-дырочные пары в количестве тысяч и десятков тысяч, также путем образования оптических фононов в случае непрямозонных полупроводников. Отметим здесь, что многие результаты в области бета-вольтаики на уровне подтверждения эффекта оказалось получить весьма несложно. Но чтобы оптимизировать технологии для получения стабильно работающих экспериментальных и промышленных девайсов, приходится учитывать различные, порой противоречащие друг другу, закономерности и рекомендации на практике [19], в том числе с точки зрения безопасности и контроля параметров на этапах производства [17].

Появились новые разработки, учитывающие технические возможности увеличения эффективности преобразования энергии радионуклидов полупроводниковыми материалами, прежде всего, с учетом имплантации радионуклидов и попадания бета-электронов сразу (масштаб времени взаимодействия и разделения носителей зарядов встроенным электрическим полем на несколько порядков меньше времени жизни электронно-дырочных пар) в обедненную область или ОПЗ (область пространственного заряда) и с учетом преобразования энергии внутри полупроводниковой гетероструктуры с эффективной контактной разностью потенциалов [4, 10, 15, 16, 20–23]. Помимо классических бета-вольтаических структур, перспективным направлением

является интеграция бета-вольтаики с аккумуляторными технологиями [8–10]. Например, в работе [9] предложена перезаряжаемая Zn-ионная батарея, в которой бета-вольтаическая структура комбинируется с интеркаляционным катодом, что позволяет повысить срок службы и стабильность работы системы.

Термин «область пространственного заряда» (ОПЗ, SCR) описывает ключевой элемент p – n -перехода или гетероперехода, характеризующийся наличием неподвижного пространственного заряда (фиксированные ионизированные доноры N_d^+ и акцепторы N_a^-) и создаваемого им встроенного электрического поля. Именно это поле ответственно за эффективное разделение генерируемых в ОПЗ электронно-дырочных пар и формирование электродвижущей силы (ЭДС). Понятие «обедненная область» (depletion zone), в отличие от ОПЗ, является упрощенным описанием, акцентирующим лишь отсутствие свободных носителей заряда в данной области, но не отражающим фундаментальную роль пространственного заряда и управляющего поля в процессах разделения носителей. Для бета-вольтаических преобразователей, особенно с интегрированным радионуклидом (^{14}C), принципиально важно, что генерация электронно-дырочных пар происходит непосредственно внутри ОПЗ. Это обеспечивает максимальную эффективность их разделения встроенным полем до рекомбинации, что является ключевым фактором повышения КПД устройства. Фокус на ОПЗ, а не на обедненной области подчеркивает активный физический механизм преобразования энергии.

Как правило, в фотопреобразователе сложно ввести фотоны, минуя структурные поверхностные дефекты, на которых образованные неравновесные носители разных знаков зарядов рекомбинируют, не давая вклада в фото-ЭДС; в некоторых моделях исполнения бета-вольтаических энергопреобразователей отмечается этот же недостаток.

Первые систематические исследования бета-вольтаических полупроводниковых преобразователей бета-распада радионуклида ^{14}C — база для ^{14}C -технологий, самозаряжающегося суперконденсатора на основе углеродных нанотрубок [24], на базе переходов на Si [25, 26] и впервые инженерные решения на базе технологии эндотаксии [27] и активированных изнутри радионуклидом ^{14}C преобразователей на $\text{p}^+\text{-SiC/Si}$ гетероструктурах [28, 29] относятся к 2015–2016 гг. [14, 30].

С другой стороны, гетеропереход Si/SiC показал наилучшую концентрацию энергии в области обеднения при исследовании гомопереходов Si, GaN, GaAs, SiC и InGaP, а также гетеропереходов этих полупроводников с Si [31]. В остальном сошлемся на анализ эффективности различных изотопов на базе различных материалов полупроводниковых преобразователей, представленный, например, достаточно широко в недавних аналитических обзорах [32, 33], и на базе Si с разными переходами — в одной из первых теоретических работ с аналитическим сравнением [34] и приложением для бета-сенсора [35].

Недавние успешные исследования по оптимизации структуры гетеропереходного преобразователя для уменьшения потерь энергии радиоактивных источников на основе полупроводников с широкой и непрямой запрещенной зоной: с ^{63}Ni с высокой эффективностью $^{63}\text{NiO/ZnO}$ комплексная бета-вольтаическая батарея [23], ^{63}Ni GaN-PIN бета-вольтаическая батарея [21], покрывающая источник ядерной энергии мультиструктурная GaN-PIN бета-вольтаическая батарея [36], нанопроволочные бета-вольтаические генераторы [37, 38], производительная бета-вольтаическая ядерная батарея с 3D $^{63}\text{Ni-SiC}$ P+PNN+мультиструктурой [16], квазитвердотельный электро-

химический элемент с фото/бета-вольтаическим питанием на основе трехмерной гетероструктуры CdS/ZnO [15]. Комбинированные фото/бета-вольтаические системы, такие как 3D CdS/ZnO, показавшие высокую стабильность и эффективность в электрохимических ячейках [15], исследуются также в качестве альтернативы классическим гетероструктурам.

Обратим внимание на недавно разработанную батарею, рассчитанную на много лет, — бета-вольтаическую ячейку с двойным расположением чувствительного к радиоактивному изотопу красителя (d-DSBC), в которой источник ^{14}C (с радиоактивным изотопом облученная лимонная кислота ^{14}CA) используется как на аноде, так и на катоде [4], и бета-вольтаическую батарею, использующую платину/пористый ZnO-переход Шоттки, моделируемую с кодом TCAD-SILVACO 3D и C-визуализатором, имитирующим электронный пучок бета-частиц от ^{63}Ni [39].

В работе [40] чистый бета-источник ^{14}C в виде порошка, который может быть преобразован в ультратонкую пленку с помощью дифенилкарбамида $(^{14}\text{C}_6\text{H}_5\text{NH})_2\text{CO}$ с ^{14}C , был выбран для создания плоских бета-вольтаических батарей с p - n -переходом на основе 4H-SiC. Для прогнозирования выходных характеристик была разработана комплексная модель с использованием кода Монте-Карло и кода COMSOL Multiphysics. В результате, используя источник $(^{14}\text{C}_6\text{H}_5\text{NH})_2\text{CO}$ толщиной 100 мкм с максимальной плотностью мощности $1,86 \text{ мВт/см}^2$ и современную технологию изготовления p - n -перехода 4H-SiC, авторы [40] оптимизировали толщину области p -типа (4,2 мкм) с концентрацией легирующего вещества $N_a = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и область n -типа (5,8 мкм) с концентрацией легирующего вещества $N_d = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

В данной статье мы рассматриваем SiC/Si преобразователь энергии бета-распада радионуклида ^{14}C в гетеропереходе на основе развития работ [14, 41], предполагая внутренний слой, в процессе эндотаксии легированный ^{14}C , в близком расположении с обедненной областью в гетеропереходе и с пленкой SiC толщиной от 10 нм до 10 мкм. То есть используется наиболее эффективно источник энергии большой удельной плотности как эффект «внутреннего солнца» — внутри гетероперехода [42]. При этом уменьшение размеров структуры гетеропереходов приводит к увеличению их плотности и к геометрическому масштабированию электрофизических характеристик [43]. Таким образом, масштабирование подобно, например, многоуровневому процессору Intel $1 \times 1 \text{ см}$ с 500 000 транзисторов, объединенных сеткой проводников-контактов.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Хорошо известно, что при проектировании фото- и бета-вольтаических преобразователей основными составляющими элементами для анализа эффективности рассматриваются следующие: обработка спектра облучения, ширина запрещенной зоны полупроводникового преобразователя, ловушки и внутренние характеристики для задержки излучения и носителей инжекции электронно-дырочных пар. Сосредоточимся на первых двух характеристиках эффективности SiC/Si преобразователя, в который внедряется источник энергии бета-распада (здесь радионуклид ^{14}C) прямо в гетеропереходе — в обедненной области или вблизи нее на расстоянии диффузионной длины [10]. Предполагается металлургическая граница фаз в области ОПЗ SiC-фазы

шире, по причине геттерирования легирующей примеси в Si-фазе, определяющей тип проводимости.

ОПЗ SiC/Si представлена двухфазной областью, ширина каждой из двух частей соответствует концентрации легирующей примеси [44, 45]. Увеличение ширины ОПЗ, занятой SiC-фазой, предполагает уменьшение степени легирования ее по отношению к Si-фазе и способствует повышению эффективности энергопреобразователя. Это достигается технологическим приемом формирования гетероструктуры. Сопряжение полупроводников с параметрами элементарной ячейки, отличающимися на 20 %, предполагает формирование дислокационной сетки, релаксирующей механическое напряжение несоответствия решеток. В методе эндотаксии пленка карбида кремния формируется за счет Si-фазы, и перед фронтом роста SiC-пленки движется скрытый геттерный слой, роль которого выполняет дислокационная сетка, сосредоточенная в Si-фазе [45]. Геттерируется легирующая примесь, отвечающая за тип проводимости исходной Si-подложки; в этом случае пленка формируется за счет очищенной от легирующей примеси и сопутствующих точечных дефектов Si-фазы. SiC-фаза в ОПЗ гетероперехода формируется методом эндотаксии с участием легирующей примеси ^{14}C . Дислокационная сетка, ее заряженное состояние и градиент концентрации углерода способствуют механизму электрохимического переноса диффузионного процесса формирования SiC-фазы.

Первая выделенная характеристика эффективности преобразователя связана с анализом и моделированием преобразования полупроводником бета-спектра, эффективно основанным на комбинировании нескольких программ и гибридных кодов [46–49] для оптимизации гетероструктуры [50, 51]. При этом исходим из того, что особенностью выступает представление об образовании электронно-дырочных пар в сферических координатах, энергия их образования в реальной ситуации приблизительно равна утроенному значению ширины запрещенной зоны сопрягаемых материалов. Движение неравновесных носителей зарядов представляется во встроеном поле в ортогональных координатах.

Вторая характеристика эффективности преобразователя, вытекающая из первой, основана на анализе структуры материала преобразователя и его профиля потенциала. При этом принципиальное значение имеют экспериментальные измерения внутренней активности или измененного бета-спектра (рис. 1) и профиля потенциала и термодинамических работ выхода из полупроводника и работ выхода для контактных металлов.

На рис. 1 представлен экспериментально пересчитанный спектр (количество импульсов/с по вертикали графика) с площади квадратной пластинки образца 1×1 см в течение 1 ч, измеренный на бета-спектрометре с полупроводниковым детектором размером, совпадающим и приближенным максимально к размеру поверхности образца. Образец представляет собой пластинку кремния толщиной порядка 400 мкм со слоем карбида кремния в несколько микрон, полученным методом эндотаксии с легированием ^{14}C . Площадь детектора чуть больше, чем пластинка образца. Детектор бета-спектрометра и программа «Ангамма» калибруются по пикам висмута. Из рисунка видно, что фон очень малый, меньше погрешности измерения спектра. Спектр набирался в течение 1 ч, что более чем достаточно для получения необходимой статистики. Дискриминация нижнего уровня чувствительности занижена максимально для фиксирования электронов с меньшей энергией. Спектр со стороны нерабочей поверх-

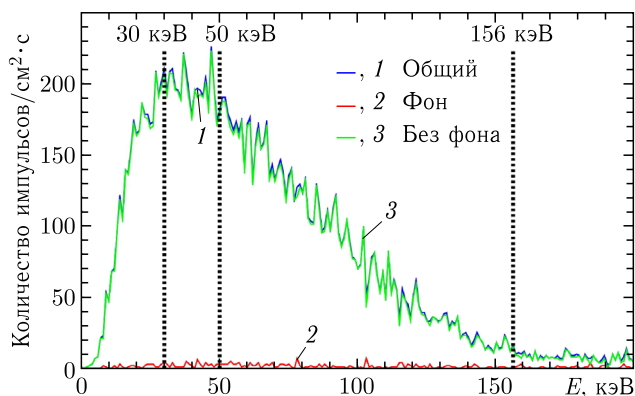


Рис. 1. График спектра импульсов бета-электронов с учетом/отсутствием фона

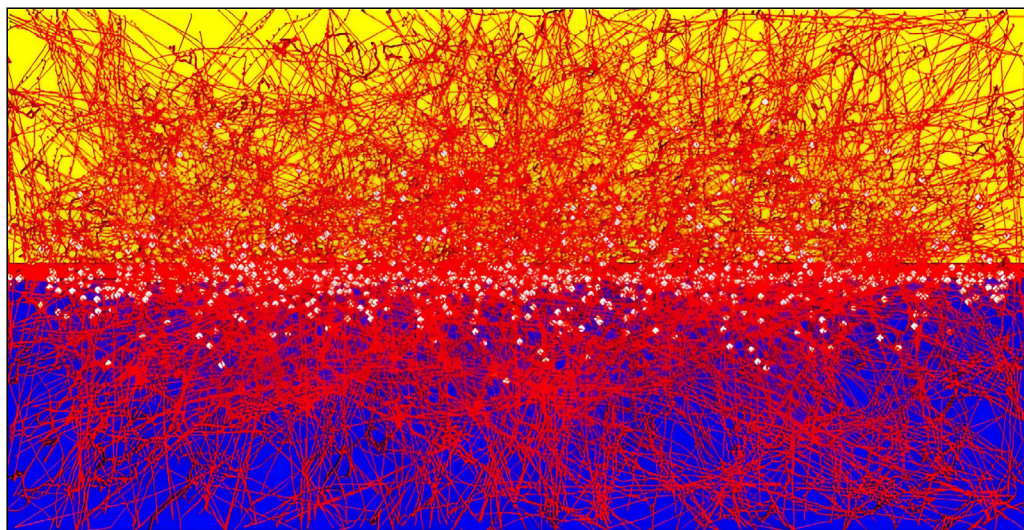


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Пример моделирования MCNP5 для гетеропереходного (SiC/Si) бета-вольтаического преобразователя

ности пластинки кремния практически на уровне фона. Таким образом, измеренный экспериментально бета-спектр подтверждает качественно характер бета-спектра ^{14}C и позволяет оценить интегрально его активность и глубину внутри структуры. Это является ключевой характеристикой для технологии изготовления таких легированных радионуклидом гетероструктур. Также авторы воспользовались пересчетом спектра нормированно на один электрон, что удобно для учета активности.

На рис. 2 представлен пример визуализации смоделированной бета-вольтаической батареи в коде MCNP5, в условном удельном масштабе. Моделирование произведено для 1000 бета-распадов в пятне радиусом 0,564 мм условно по горизонтали с площадью пятна 1 см^2 в трехмерном пространстве со срезowymi проекциями треков электронов бета-распада, т. е. на рис. 2 показана срезовая проекция. Представлены

траектории рассеиваемых частиц с учетом преобразуемой энергии на образование электронно-дырочных пар, которые не показаны на рисунке. Желтым цветом изображен слаболегированный кремний условной толщиной 400 мкм, синим цветом — карбид кремния, достаточно легированный задающей тип проводимости примесью условной толщиной от 10 нм до 30 мкм. Внутренняя красная полоска условной толщиной до 30 мкм отражает расположение диффузионного слоя с ^{14}C . Посередине расположен слой SiC с ^{14}C . Красным цветом показаны траектории бета-электронов, которые образовались при бета-распадах. Белые точки характеризуют первое взаимодействие после кулоновского первого рассеяния, т.е. отображена первая отдача энергии на электронно-дырочную пару.

Таким образом, моделирование MCNP5 [52] (как и Geant4 [48, 49]) позволяет визуализировать геометрические особенности движения и концентрации неравновесных носителей заряда и оптимизировать концентрации легирования составляющих материалов (с данными свойств [53]) для обработки спектра бета-электронов внутри обедненной области плюс-минус диффузионная длина. Отметим, что среди развиваемых современных комбинированных кодов моделирования обработки спектра полупроводниковым преобразователем для бета-вольтаики одними из ключевых являются Geant4, как наиболее фундаментально основанный, и варианты кодов MCNP5 [18].

Основные физические характеристики изотопа ^{14}C хорошо известны и представлены в табл. 1 [54, 55]. При этом отметим, что действительно в ближайшем будущем объем мирового производства ^{14}C будет находиться на уровне 1000 Ки/год [54], а его удельное энерговыделение составляет 0,3 мВт/Ки. Но эффект генерации каждым бета-электроном в полупроводниковом преобразователе оценочно 5000 электронно-

Таблица 1. Радиационные характеристики ^{14}C

| Характеристика | Значение |
|--|----------------------------------|
| Плотность, г/см ³ | 1,87 |
| Период полураспада, лет (с) | 5730 ($1,80825 \cdot 10^{11}$) |
| Постоянная распада λ , с ⁻¹ | $3,83 \cdot 10^{-12}$ |
| Энергия β -частиц, кэВ | |
| максимальная | 156,48 |
| средняя | 49,47 |
| Концентрация радионуклида, | |
| ядер в 1 см ³ | $8,03 \cdot 10^{22}$ |
| ядер в 1 г | $4,3 \cdot 10^{22}$ |
| Удельная активность, | |
| Ки/см ³ | 8,31 |
| Ки/г | 4,44 |
| Энерговыделение, мВт/Ки | 0,296 |
| Энерговыделение, мВт/см ³ | 2,46 |
| Энерговыделение, мВт/г | 1,32 |
| Запас энергии до полного распада | |
| 1 г изотопа, Вт · ч | 95540 |
| МЗА, Бк | $3,7 \cdot 10^6$ |

Таблица 2. Диапазон значений выходных характеристик для различных материалов, содержащих радионуклиды

| Бета-вольтаическая гетероструктура | J_{sc} , нА | V_{OC} , В | FF | η , % | Ссылка |
|---|---------------|--------------|-------|------------|----------|
| $^{14}\text{C} \rightarrow \text{TiO}_2/\text{N719-CNP/CQD}$ | 12,4 | 0,0864 | — | 2,86 | [4] |
| $^{14}\text{C} \rightarrow p\text{-4H-SiC-}n\text{-4H-SiC}$ | 0,1 | 2,15 | — | 10,6 | [40] |
| $n\text{-SiC} \leftarrow ^{14}\text{C} \rightarrow p\text{-Si}$ | 433 | 1,2 | 0,9 | 16–21,31 | [10, 60] |
| $^{63}\text{Ni} \rightarrow \text{C@VO}_2/^{63}\text{Ni@ZMRAs/AZO}^1$ | — | 0,5–0,8 | — | 5,1 | [9] |
| $^{63}\text{Ni} \rightarrow 2\text{-CdS@ZNRAs/AZO}$ | 755 | 0,288 | 0,489 | 10,09 | [15] |
| $p\text{-SiC} \leftarrow ^{63}\text{Ni} \rightarrow n\text{-SiC}$ | 8570 | 2,45 | — | 4,58 | [16] |
| $^{63}\text{Ni} \rightarrow p\text{-Pt-}n\text{-ZnO}$ | 37,5 | 1,237 | 0,765 | 35,5 | [39] |
| $^{63}\text{Ni} \rightarrow n\text{-GaP-}p\text{-Si}$ | 170 | 1,5 | 0,91 | 2,3 | [61] |
| $^{63}\text{Ni} \rightarrow p\text{-GaN-}n\text{-Si}$ | 168 | 3,6 | 0,97 | 7 | [62] |

¹ Плотность энергии $P = 128$ мВт·ч/г.

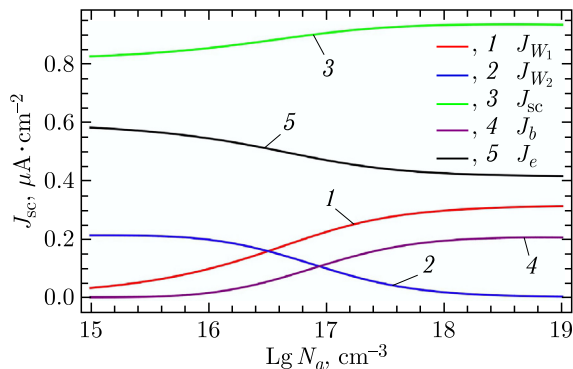


Рис. 3. Вклады составляющих плотности тока J_e в эмиттере, коллекторе J_b и в обедненной области $J_{W_1} + J_{W_2}$ в гетеропереходе $n\text{-SiC}/p\text{-Si}$ в зависимости от концентрации акцепторов N_a в объеме Si-фазы, и сумма составляющих плотностей токов J_{sc} определяет плотность тока короткого замыкания

дырочных пар в секунду позволяет рассчитывать на значительное серийное производство интегрированных микроисточников или элементов питания с приемлемой удельной мощностью и длительностью работы [56].

Расчетная максимальная удельная мощность бета-излучения ^{14}C оценивается как 2,968 мВт/см³, максимальная удельная мощность бета-излучения ^{14}C в SiC — 1,4 мВт/см³, или 1,4 мкВт/мм³.

Для бета-вольтаической батареи или отдельного элемента эффективность преобразования η_{tot} (и составляющие ее факторы [16, 19]) является важным параметром для оценки их работы [19]. В табл. 2 представлены диапазоны значений расчетных параметров плотности тока короткого замыкания J_{sc} , напряжения холостого хода V_{OC} , фактора заполнения FF для моделей бета-вольтаических элементов на гетеропереходах с различными составляющими материалами, с радионуклидами ^{63}Ni , разме-

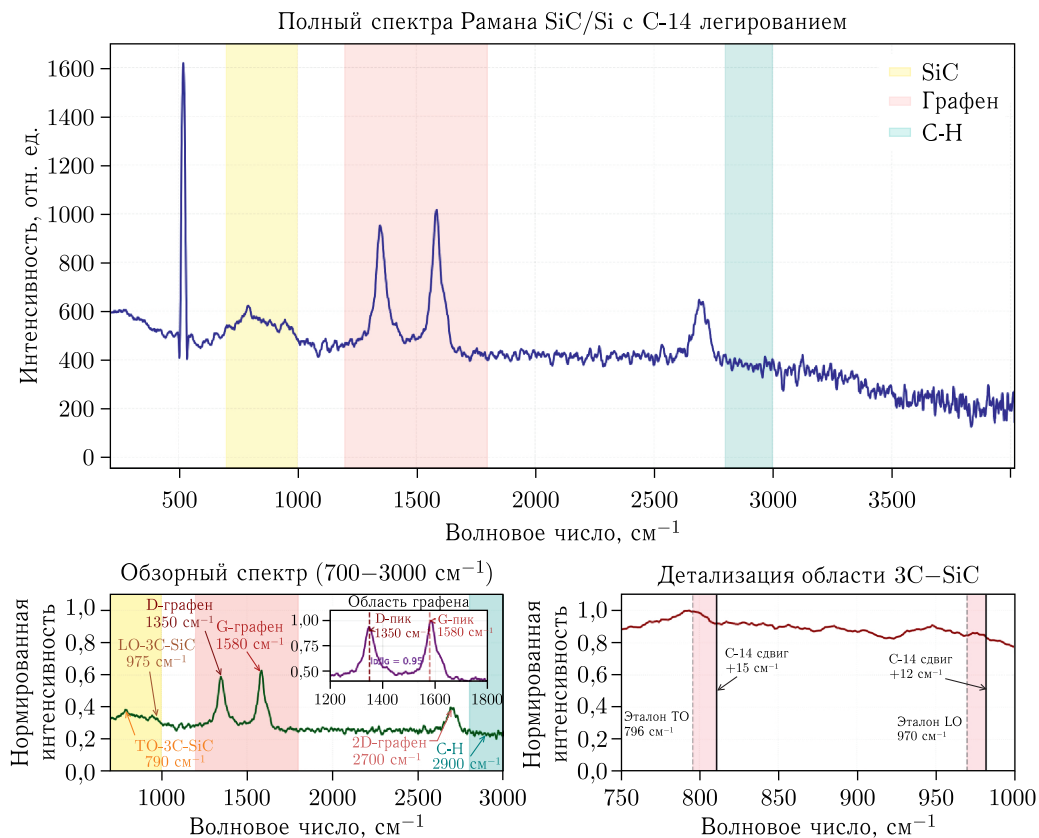


Рис. 4. Детализированный спектр комбинационного рассеяния образца SiC/Si с ^{14}C легированием: полный спектр с выделением ключевых областей; обзорный спектр ($700\text{--}3000\text{ см}^{-1}$) с аннотацией пиков, вставка детализации области графена с соотношением I_D/I_G ; детализация области SiC ($750\text{--}1000\text{ см}^{-1}$) со сдвигами пиков, иллюстрирующими изотопный сдвиг фононных мод SiC: TO + $15,0\text{ см}^{-1}$ ($796 \rightarrow 811\text{ см}^{-1}$), LO + $12,0\text{ см}^{-1}$ ($970 \rightarrow 982\text{ см}^{-1}$), расчетно концентрацию ^{14}C 38,2 ат. % и механизм атомного замещения в решетке

щенными снаружи, и ^{14}C , размещенными внутри гетероперехода, как в одном материале для преобразователя и для источника. Тестируемая активность радионуклида составляет $100\text{ мКи} \cdot \text{см}^{-2}$. Необходимо обратить внимание на то, что концентрации легирования доноров N_d и акцепторов N_a для данных в табл. 2 рассматриваются в оптимальном сочетании от 10^{15} до 10^{20} см^{-3} . Плотность тока короткого замыкания пропорциональна активности и градиенту квазиуровней Ферми, в оптимальном режиме достигает значения 900 нА/см^2 . Пример зависимости составляющих плотностей токов от концентраций легирования акцепторов N_a представлен на рис. 3.

Отметим здесь важность оценки влияния этапов производственных процессов и оптимизации [17] как на удельную активность, электрофизические характеристики, морфологию пленки SiC бета-вольтаического преобразователя, так и на спектральные характеристики. На рис. 4 и 5 представлены спектр комбинационного рассеяния (КР)

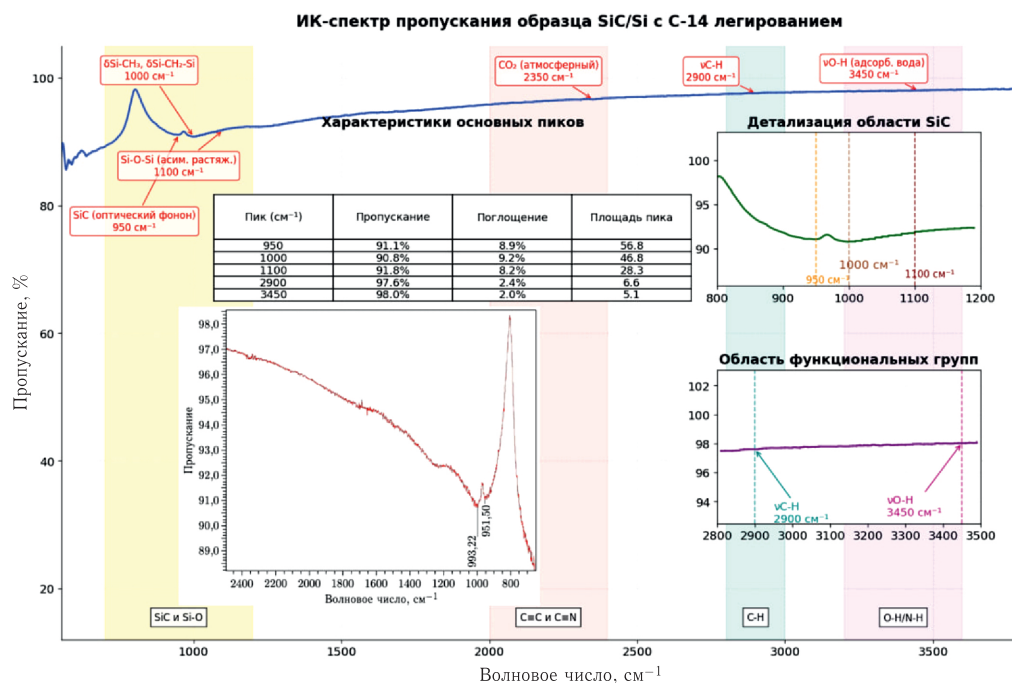


Рис. 5. Комбинированный ИК-спектр пропускания образца SiC/Si с детализацией ключевых областей (дополнение к детализированному Раман-анализу), основные характеристики: основной спектр (400–4000 см⁻¹); область фоновых мод SiC (800–1200 см⁻¹) с характерным пиком при 950 см⁻¹ (оптические фононы 3C-SiC) и дополнительными пиками при 1000 см⁻¹ (δSi-CH₃, δSi-CH₂-Si) и 1100 см⁻¹ (Si-O-Si); область функциональных групп (2800–3500 см⁻¹) с пиками при 2900 см⁻¹ (C-H) и 3450 см⁻¹ (O-H), указывающими на наличие поверхностных групп и адсорбированной воды, высокое пропускание (> 80%) свидетельствует о хорошем качестве пленки, присутствие кислородосодержащих групп указывает на необходимость оптимизации поверхностной обработки; отсутствие выраженного сдвига пика Si-C может быть связано с недостаточной концентрацией ¹⁴C для данного метода или компенсацией напряжениями решетки (более детальный анализ изотопного эффекта и оптических свойств возможен при проведении спектроскопии эллипсометрии и измерений в отражении)

света и ИК-спектр пропускания. Анализ методом инфракрасной фурье-спектроскопии проводился на спектрометре Nicolet iS20 (Thermo Fisher Scientific) на приставке нарушенного полного внутреннего отражения (Smart iTX, монокристалл ZnSe). Разрешение сканирования составляло 2 см⁻¹, количество сканирований — 32. Анализ методом спектроскопии комбинационного рассеяния света проводили на спектрометре Enspector R532 с длиной волны лазера 532 нм. Спектры КР света регистрировали в течение 3 с и усредняли по 10 повторам. На спектре комбинационного рассеяния можем наблюдать пик на 520 см⁻¹, соответствующий Si, пики в области 600–1000 см⁻¹, относящиеся к SiC, и пики на 1351, 1586, 2698 см⁻¹, характерные для графена [57]. На ИК-спектре пропускания можно наблюдать две полосы: при 951 и 993 см⁻¹. Появление полосы в области 950–960 см⁻¹ в ИК-спектре в работе [58] связывают с

оптическим фоном в пористом 6H-SiC, а полосу поглощения при $\approx 1000\text{ см}^{-1}$ в работе [59] относят к $\delta\text{Si-CH}_3$, $\delta\text{Si-CH}_2\text{-Si}$.

Таким образом, результаты экспериментальных измерений (см. рис. 4 и 5) представлены для подтверждения наличия пленки карбида кремния, выращенной на подложках кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В статье рассмотрена гетеропереходная структура карбида кремния (SiC) и кремния (Si) с интегрированным изотопом углерода-14 (^{14}C). Энергия β -распада ^{14}C преобразуется в электричество через оптимизированную область пространственного заряда (ОПЗ), где генерируются электронно-дырочные пары, которые разделяются встроенным электрическим полем гетероперехода, образуется электрохимическая разность потенциалов.

Проведено исследование влияния и обработки SiC/Si структурой бета-спектра ^{14}C и оптимизация гетеропереходного бета-вольтаического элемента на основе реализации стратегии активации и инжекции в ОПЗ гетероперехода, включая генерацию дополнительных неравновесных электронно-дырочных пар внутри гетероперехода с помощью радиоактивно легирующей добавки. Такое отклонение от традиционных конвенциональных конструкций, в которых радиоактивный источник расположен вне конвертера, позволяет снизить потери энергии за счет внутреннего распределения источника энергии большой плотности.

Представленные кратко в статье выборочные результаты теоретического моделирования и экспериментальных измерений позволяют сделать следующие выводы.

1. Ключевыми для технологии изготовления легированных радионуклидом гетероструктур являются измерение бета-спектра и определение внутренней (или удельной поверхностной) активности. Измеренный экспериментально бета-спектр подтверждает бета-спектр ^{14}C и оценку интегрально его глубины внутри структуры до 10 мкм.

2. Моделирование MCNP5 позволяет визуализировать распределение концентрации неравновесных носителей заряда и оптимизировать легирование примесью составляющих материалов $n\text{-SiC}/p\text{-Si}$ в пределах для N_d , N_a от 10^{15} до 10^{20} см^{-3} .

3. Используется подложка кремния p -типа, определяются геттерирующие свойства сетки дислокаций, и пленка легирована ^{14}C . Наблюдается диффузионное автолегирование пленки SiC-фазы при использовании n -типа проводимости подложки кремния. При этом формируется область компенсации — i -область, расширяющая ОПЗ-область.

4. Плотность тока короткого замыкания пропорциональна активности и градиенту квазиуровней Ферми, для преобразователя на базе SiC/Si она достигает значения 900 нА/см^2 . Напряжение холостого хода определяется электрохимической разностью потенциалов ограниченной шириной запрещенной зоны SiC.

5. Спектр комбинационного рассеяния и инфракрасный спектр пропускания подтверждают наличие пленки SiC на поверхности Si. Ключевой результат: изотопный сдвиг фононных мод ($\Delta\omega_{TO} = +15,0\text{ см}^{-1}$, $\Delta\omega_{LO} = +12,0\text{ см}^{-1}$) однозначно подтверждает атомное включение ^{14}C в решетку SiC с концентрацией 38,2 ат. %.

Произведена оценка полупроводниковых структур, сделан акцент на тонких пленках из активированного карбида кремния, в сравнении с вариантами интегрирован-

ных бета-вольтаических элементов, используемых как в качестве комбинированного радионуклидного материала, так и в качестве полупроводникового гетеропереходного преобразователя энергии, и предоставлены реалистичные оценки достижимой плотности тока и эффективности. Эффект с инжектором внутри, снижающий негативное влияние самопоглощения радиоактивного источника на ядерную ячейку, благодаря единому интегрированному материалу преобразователя — бета-источнику, был оценен для вариантов с радионуклидами с умеренным бета-излучением.

Было проведено сравнение с результатами работ по теме различных гетеропереходов типа II с полупроводниками с широкой запрещенной зоной; несколько более высоких плотностей мощности и эффективности (КПД) преобразования возможно достичь с помощью комбинированного масштабирования, но для этого потребуются разработка технологии высокоточного травления или дефектообразования на ядрах дислокаций различных активированных наногетеропереходов [60], при этом тонкая пленка карбида кремния проявляется в кремниевой фазе, не образуя сетки дислокаций на поверхности. Однако также возможно сформировать множество видов образцов с помощью технологии высокотемпературного осаждения из газовой фазы (HT CVD метода) за короткое время, поскольку процесс зарождения протекает на начальной стадии без накопления механических напряжений.

Отметим, что в процессе атомно-слоевой эпитаксии, для нашего случая это эндотаксия, подается порциями углеводород, чтобы образовался монокристаллический слой, затем следует продувка аргоном и новая порция углеводорода. Но предварительно Si-поверхность окисляют, делают 32-нм фотолитографию, вскрывая окна до Si, затем — поатомная эндотаксия в окна с формированием SiC-фазы, островки не должны подвергаться механическим напряжениям. Затем — металлизация SiC-фазы вместе с SiO₂-фазой сплошную, затем вскрывается периферия чипа от SiO₂ с трех сторон до Si-фазы, и по ней выполняется металлизация — так получается планарное исполнение.

Кроме того, благодаря замене карбидной пленки можно значительно повысить удельную мощность и КПД. Карбид кремния SiC представляет собой полупроводниковый материал с более широкой запрещенной зоной, который теоретически может увеличить плотность мощности и КПД более чем в 2 раза, но на данный момент производство этих полупроводниковых устройств с очень высокой запрещенной зоной коммерчески возможно только из кремния. Оценена достижимая плотность мощности 0,3 мВт/см³ при толщине карбида кремния 0,4 мкм, максимальная плотность тока короткого замыкания составляет 900 нА/см², может быть достигнут КПД 21,31 %. Площадь поверхности преобразователя энергии составляет 1 см². Конструкция с плоскими контактами будет обладать большей эффективностью из-за противоположного знака разности между работами выхода контактирующих металлов и термодинамическими работами выхода карбида кремния. Это представляет собой значительное улучшение по сравнению с традиционной копланарной геометрией, которая обычно ограничивается плотностями мощности порядка нВт/см³.

Таким образом, полупроводниковый гетеропереходный бета-вольтаический элемент с активированной тонкой пленкой SiC в качестве материала, преобразующего энергию встроенного бета-источника ¹⁴C, представляется перспективным преобразователем энергии для бета-вольтаических батарей. Основными преимуществами SiC/Si (с ¹⁴C) являются: уже сложившийся этап научной инновации и первая успешная интеграция ¹⁴C в гетеропереход; экологически ¹⁴C менее опасен, чем ³H или ⁶³Ni;

возможно универсальное приложение для космоса, АЭС и IoT. Также перспективно развивается интеграция с суперконденсаторами для импульсных нагрузок (аналогично китайским Zn-ion гибридам).

Примечание при корректуре. В ходе подготовки рукописи к публикации получены новые результаты, подтверждающие и расширяющие ключевые выводы работы (на основе списка источников в [63] и данных в табл. 3):

— оптимизация материалов: установлено превосходство SiC над GaN и алмазом при облучении ^{14}C — КПД 7,31 % (против 6,6 % для GaN) благодаря сниженному обратному рассеянию и отработанной технологии синтеза. Градиентно-легированные PIN-структуры с *i*-слоем 15 мкм демонстрируют +20 % к плотности мощности для систем на ^{14}C ;

— гибридные системы: интеграция с твердотельными ионисторами (например, TDK SeraCharge) обеспечивает >1000 циклов заряд/разряд при импульсных нагрузках, решая проблемы стабильности в имплантатах и космической электронике;

— масштабируемость: 2D/3D гетероструктуры (MoS_2/SiC) подавляют рекомбинационные потери: эксперимент показывает КПД 18,5 % за счет улучшенного сбора заряда.

Эти достижения подтверждают возможность создания монолитных чипов «ИС–источник питания» со сроком службы более 50 лет, устанавливая гетеропереходы SiC/Si как основу микроэнергетики нового поколения.

Таблица 3. Ключевые инновации в технологиях и их применения

| Направление | Технология | Эффект | Применение |
|--------------------|---|---|------------------------|
| Термосинергия | Тепло β -распада \rightarrow ионный транспорт | $\uparrow D_{\text{Zn}^{2+}}$ на 217% | Медицинские имплантаты |
| Зарядовые насосы | Каскадные SiC-гетеропереходы | Генерация импульсов 5 В из nW-источников | IoT-сенсоры |
| ВЧ-усилители | Monolithic SiC-RF,HF схемы | \downarrow потеря энергии на 40 % при передаче данных (импульсов) | Космические зонды |
| Storage-интерфейсы | $\text{MoS}_2/\text{PEDOT:PSS}$ + радиационные гели | Стабильность > 1000 циклов при 10^{15} н/см ² | АЭС-мониторинг |

Частично результаты исследования обсуждались в докладах авторов на секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук 3 апреля 2024 г. (М. В. Д.) и на международной конференции «Современные проблемы теории конденсированных сред» 16 июля 2024 г. (А. С. Ч.), проходивших в ОИЯИ.

Конфликт интересов. Отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Warren B. G20 Climate Change Performance // Rome Summit. 2021.
2. Ramesh R., Salahuddin S., Datta S., Diaz C.H., Nikonov D.E., Young I.A., Ham D., Chang M.F., Khwa W.S., Lele A.S., Binek C., Huang Y.L., Sun Y.C., Chu Y.H., Prasad B., Hoffmann M., Hu J.M., Yao Z.J., Bellaiche L., Wu P., Cai J., Appenzeller J.,

- Datta S., Camsari K. Y., Kwon J., Incorvia J. A. C., Asselberghs I., Ciubotaru F., Couet S., Adelman C., Zheng Y., Lindenberg A. M., Evans P. G., Ercius P., Radu I. P.* Roadmap on Low-Power Electronics // APL Materials. 2024. V. 12, No. 9. P. 099201; https://pubs.aip.org/aip/apm/article-pdf/doi/10.1063/5.0184774/20160718/099201_1_5.0184774.pdf.
3. *Terranova M. L.* Nuclear Batteries: Current Context and Near-Term Expectations // Intern. J. Energy Res. 2022. V. 46, No. 14. P. 19368–19393; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.8539>.
4. *Kim H. S., Lee J., Naseem M. B. et al.* Multiple-Year Battery Based on Highly Efficient and Stable Dual-Site Radioactive Isotope Dye-Sensitized Betavoltaic Cell // J. Power Sources. 2024. V. 60. P. 234427.
5. *Spencer M. G., Alam T.* High Power Direct Energy Conversion by Nuclear Batteries // Appl. Phys. Rev. 2019. V. 6, No. 3. P. 031305.
6. *Neethu T. M., Balakrishnan, Anandu M. Nair, Akhila Das, Jabeen Fatima M. J., Jou-Hyeon Ahn, Reddy M. V., Raghavan P.* Ch. 7. Nuclear Batteries. An Overview // Advanced Technologies for Rechargeable Batteries: Metal Ion, Hybrid, and Metal-Air Batteries / Eds.: P. Raghavan, A. Das, J. M. J. Fatima. 1st ed. CRC Press, 2024. P. 396.
7. *Рисованный В. Д., Костылев А. И., Душин В. Н., Фирсин Н. Г., Синельников Л. П., Бутаков Д. С., Николкин В. Н.* Атомные батареи конденсаторного типа нового поколения с жидким электролитом // АЭ. 2022. Т. 132, № 3. С. 175–178.
8. *Ding Z., Jiang T., Zhao W., Luo Z., San H., Li S., Li X., Zhang L.* Photo-Rechargeable Zinc-Ion Battery Using Highly Ordered and Vertically Oriented C@VO₂/ZnO Microrod Arrays // Energy Storage Materials. 2024. V. 71. P. 103646; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405829724004720>.
9. *Ding Z., Luo Z., San H., Li X., Zhang L.* Betavoltaic Rechargeable Zn-Ion Battery Based on Hybrid Cathode by Combining Betavoltaic Structure with Intercalation Host // Appl. Phys. Lett. 2024. V. 125, No. 23. P. 233901; [/pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/doi/10.1063/5.0229924/20281502/233901_1_5.0229924.pdf](https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/doi/10.1063/5.0229924/20281502/233901_1_5.0229924.pdf).
10. *Dolgoplov M. V., Chipura A. S.* Heterojunction Betavoltaic Si¹⁴C–Si Energy Converter // J. Power Sources. 2024. V. 613. P. 234896; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775324008486>.
11. *Ehrenberg W., Lang C.-S., West R.* The Electron Voltaic Effect // Proc. Phys. Soc. Sect. A. 1951. V. 64, No. 4. P. 424.
12. *Rappaport P.* The Electron-Voltaic Effect in *p–n* Junctions Induced by Beta-Particle Bombardment // Phys. Rev. 1954. V. 93. P. 246–247.
13. *Moseley H. G. J.* The Attainment of High Potentials by the Use of Radium // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1913. V. 88, No. 605. P. 471–476.
14. *Гурская А. В., Долгополов М. В., Чепурнов В. И.* ¹⁴С бета-преобразователь // ЭЧАЯ. 2017. Т. 48, вып. 6. С. 901–909.
15. *Ding Z., Zheng R., Zhao W. et al.* A Stable and Efficient Quasi-Solid-State Photo/Betavoltaic-Powered Electrochemical Cell Based on 3-Dimensional CdS/ZnO Heterostructure // Chem. Engin. J. 2023. V. 47. P. 147256.
16. *He H.-J., Han Y.-C., Wang X.-Y. et al.* Enhancing Betavoltaic Nuclear Battery Performance with 3D P+PNN+Multi-Groove Structure via Carrier Evolution // Nucl. Sci. Tech. 2023. V. 3. P. 181.
17. *Zhang J., Gao Y., Lv K., Li J., Han Y., Tang J.* The Impact of Fabrication Processes on the Performance of Betavoltaic Battery // SSRN's Research Paper Ser. 2025.
18. *Movahedian Z., Tavakoli-Anbaran H.* Experimental and Theoretical Study of ⁹⁰Sr/⁹⁰Y-n-Si/ZnO Betavoltaic Battery and Theoretical Prediction of Homo Junction Betavoltaic Cells Performance // Mater. Sci. Semicond. Process. 2025. V. 186. P. 109059; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369800124009557>.

19. Alam T., Tchouaso M., Prelas M. Chapter Eleven — Summary of the Design Principles of Betavoltaics and Space Applications // Photovoltaics for Space / Ed. by Sh.G. Bailey, A.F. Hepp, D.C. Ferguson, R.P. Raffaele, S.M. Durbin. Elsevier, 2023. P. 293–345.
20. Zhang Q., Chen R., San H. *et al.* Betavoltaic Effect in Titanium Dioxide Nanotube Arrays under Build-In Potential Difference // J. Power Sources. 2015. V. 282. P. 529–533.
21. Xi S., Li L., Zhou C. *et al.* Researches on the Performance of GaN-PIN Betavoltaic Nuclear Battery // Radiat. Eff. Defects Solids. 2022. V. 177, No. 3–4. P. 213–229.
22. Wang Y., Zheng R., Lu J. *et al.* Theoretical Prediction of Output Performance of $^{63}\text{NiO-Si}$ Heterojunction Betavoltaic Cell // Appl. Phys. Lett. 2022. V. 121, No. 8. P. 083901.
23. Yuan X., Lu J., Zheng R. *et al.* Design of a Feasible High-Efficiency $^{63}\text{NiO/ZnO}$ Integrated Betavoltaic Battery // Appl. Phys. Express. 2023. V. 16, No. 2. P. 021006.
24. Сауров А.Н., Булярский С.В., Рисованный В.Д. и др. Наноструктурированные источники тока, возбуждаемые β -излучением, на основе углеродных нанотрубок // Изв. вузов. Электроника. 2015. Т. 20, № 5. С. 474–480.
25. Абанин И.Е. Выбор активных слоев источника питания с p - n -переходом, возбуждаемым β -излучением // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 10(183). С. 3–10.
26. Абанин И.Е. Сравнительный анализ источников питания, возбуждаемых различными β -изотопами // Изв. вузов. Электроника. 2016. Т. 21, № 5. С. 462–466.
27. Патент РФ RU 2653398 С2. Способ получения пористого слоя гетероструктуры карбида кремния на подложке кремния / Чепурнов В.И., Долгополов М.В., Гурская А.В., Латухина Н.В. 2016.
28. Dolgoplov M., Akimchenko A., Chepurnov V., Gurskaya A., Kuznetsov O., Mashnin A., Radenko V., Radenko A., Surnin O., Zanin G. Betavoltaic Device in por-SiC/Si C-Nuclear Energy Converter // Eur. Phys. J. Web Conf. 2017. V. 158. P. 06004.
29. Chepurnov V.I., Dolgoplov M. V., Gurskaya A. V., Akimchenko A.A., Kuznetsov O. V., Radenko A. V., Radenko V. V., Mashnin A. S. C-Betavoltaic Energy Converter in por-SiC/Si // Intern. Sci. J. Mater. Sci. Non-Equilib. Phase Transform. 2017. V. 3, No. 3. P. 119–120.
30. Гурская А.В., Чепурнов В.И., Долгополов М.В. Энергопреобразователи бета-распада C-14. Сопроводительный материал // 22-я Всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ–22): Материалы конф., Ростов-на-Дону, 21–28 апр. 2016 г. 2016. С. 183.
31. Gao H., Luo S., Zhang H., Wang H., Fu Z. Demonstration, Radiation Tolerance and Design on a Betavoltaic Micropower // Energy. 2013. V. 51, Iss. C. P. 116–122; <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v51y2013icp116-122.html>
32. Ghasemabadi D., Dizaji Zaki H., Abdollahzade M. Investigation and Analysis of Beta Radioisotopes for Optimal Use in Betavoltaic Batteries // Nucl. Sci. Engin. 2025. V. 199, No. 3. P. 476–489; <https://doi.org/10.1080/00295639.2024.2370675>.
33. Ghasemabadi D., Dizaji Zaki H., Abdollahzade M. The Optimal Choice of Semiconductor Converter to Increase Power and Efficiency in Betavoltaic Batteries with ^3H , ^{63}Ni , and ^{147}Pm Beta Sources // J. Adv. Mater. Engin. 2024. V. 43. P. 47–63; <https://jame.iut.ac.ir/article3530.html?lang=en>.
34. Rahmani F., Khosravinia H. Optimization of Silicon Parameters as a Betavoltaic Battery: Comparison of Si p - n and Ni/Si Schottky Barrier // Radiat. Phys. Chem. 2016. V. 125. P. 205–212; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X16301219>.
35. Ghasemi Nejad G.R., Rahmani F., Abaeiani G.R. Design and Optimization of Beta-Cell Temperature Sensor Based on $^{63}\text{Ni-Si}$ // Appl. Radiat. Isotopes. 2014. V. 86. P. 46–51; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804313006271>.
36. Kim D.-S., Yoon Y.J., Lee J.S. *et al.* Experimental and Simulation Study of Power Performance Improvement of GaN PIN Betavoltaic Cell // Intern. J. Energy Res. 2021. P. 1–9.
37. Wagner D.L., Novog D.R., LaPierre R.R. Design and Optimization of Nanowire Betavoltaic Generators // J. Appl. Phys. 2020. V. 127. P. 244303.

38. Thomas A., LaPierre R.R. Analytical Model of a Nanowire-Based Betavoltaic Device // J. Appl. Phys. 2024. V. 135, No. 13. P. 134302.
39. Ebadiyan A., Shokri A., Amirmazlaghani M. et al. Betavoltaic Battery Using Platinum/Porous ZnO Schottky Junction // J. Electric. Comput. Engin. Innovations. 2024.
40. Yuan W., Wei G., Liu Y., He H., Li X., Zhang G., Lv Z., Zhang J. 4H-SiC p - n Junction Betavoltaic Micro-Nuclear Batteries Based on ^{14}C Source with Enhanced Performance // AIP Adv. 2024. V. 14, No. 11. P. 115024; https://pubs.aip.org/aip/adv/article-pdf/doi/10.1063/5.0242271/20262702/115024_1_5.0242271.pdf.
41. Гурская А. В., Долгополов М. В., Чепурнов В. И. и др. Радиационное дефектообразование в бета-преобразователе на карбиде кремния // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 5(250). С. 1238–1243.
42. Гурская А. В., Долгополов М. В., Чепурнов В. И. и др. Контакты для SiC-преобразователей в диапазоне нано–микроватт // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2023. № 1. С. 2310103.
43. Гурская А. В., Долгополов М. В., Раденко В. В. и др. Комбинированное масштабирование наночипов-генераторов для бетавольтаики // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 5(250). С. 1230–1237.
44. Покоева В. А., Сивакова К. П. Математическое моделирование диффузионного легирования структуры 3C-SiC/Si для полупроводниковых преобразователей // Математическая физика и нанотехнологии: Материалы и докл. междунар. методол. школы-конф., Самара, 5 окт.—6 нояб. 2009 г. Самара: Самар. гос. ун-т., 2010. (Современные проблемы мат. физики; Спецвып. № 1). С. 79–82.
45. Комов А. Н., Сивакова К. П., Чепурнов В. И. Наноразмерные точечные дефекты и их распределение в процессе формирования гомогенной фазы 3C-SiC/Si // Там же. С. 48–51.
46. Ghasemabadi D., Zaki Dizaji H., Abdollahzadeh M. Evaluation of GEANT4 and COMSOL Multiphysics Coupling Capabilities by Simulation of an Optimized Betavoltaic Battery // J. Nucl. Res. Appl. 2023. V. 3, No. 2. P. 22–26; https://jonra.nstri.ir/article_1483_bb0b2d73d69f6336b65408f18f0aae7c.pdf.
47. Maleki P., Etaati Gh.R. Enhance Simulation Capability of Beta-Voltaic Micro Battery Using MCNPX-SILVACO Hybrid Code // JONSAT. 2020. V. 41, No. 3. P. 37–40.
48. Hosein M., Soheil H., Mohammadreza E., Gholamreza E. Optimization Design and Simulation of a Betavoltaic Nuclear Battery Based on Sr/Y-90 with MCNP/Geant4 Codes // 1st International & 28th National Conference on Nuclear Science & Technology 2022 (ICNST22). 2022.
49. Dolgoplov M. V., Kuznetsov O. V., Chepurinov V. I. et al. C-Beta Energy Converter Efficiency Modeling // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 222. P. 02012.
50. Комков О. С. Расчет полупроводниковых гетеропереходов: Учеб.-метод. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 52 с.
51. Долгополов М. В., Раджапов С. А., Чипура А. С. и др. Моделирование полупроводниковых гетероструктур для преобразователей энергии и датчиков // Вестн. Самар. ун-та. Естественно-научн. сер. 2024. Т. 30, № 1. С. 64–81.
52. Alam T.R., Pierson M. A., Prelas M. A. Beta Particle Transport and Its Impact on Betavoltaic Battery Modeling // Appl. Radiat. Isotopes. 2017. V. 130. P. 80–89; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804317300568>.
53. Rahastama S., Saputra Y. D., Waris A. The Self-Absorption Effect of Ni-63 Beta Source to the Silicon Carbide Based Betavoltaic Battery // Positron. 2020. V. 10, No. 2. P. 113–122.
54. Цветков Л. А., Пустовалов А. А., Баранов Н. Н. и др. Основы бета-вольтаики: научные и технологические аспекты преобразования энергии бета-распада радионуклидов в электрическую энергию. М.: РадиоСофт, 2019. 336 с.

55. Бекман И.Н. Атомная и ядерная физика: радиоактивность и ионизирующие излучения. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Юрайт, 2025. 493 с.
56. Цветков Л.А., Цветков С.Л., Пустовалов А.А. и др. Радионуклиды для β -вольтаических атомных батарей (миниатюрных, энергоемких, с многолетним сроком службы) // Радиохимия. 2022. Т. 64, № 2. С. 281–288.
57. Zhu K., Guo L., Lin J., Hao W., Shang J., Jia Y., Chen L., Jin S., Wang W., Chen X. Graphene Covered SiC Powder as Advanced Photocatalytic Material // Appl. Phys. Lett. 2012. V.100, No.2. P.023113; https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/doi/10.1063/1.3676042/13405666/023113_1_online.pdf.
58. Spanier J.E., Herman I.P. Use of Hybrid Phenomenological and Statistical Effective-Medium Theories of Dielectric Functions to Model the Infrared Reflectance of Porous SiC Films // Phys. Rev. B. 2000. V.61. P.10437–10450; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.61.10437>.
59. Ito H., Onitsuka S., Gappa R., Saitoh H., Roacho R., Pannell K.H., Suzuki T., Niibe M., Kanda K. Fabrication of Amorphous Silicon Carbide Films from Decomposition of Tetramethylsilane Using ECR Plasma of Ar // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V.441, No.1. P.012039; <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/441/1/012039>.
60. Долгополов М.В., Раджапов С.А., Чепурнов В.И. и др. КПД активированных наногетеропереходов на подложках кремния и карбида кремния // Comp. Nanotechnol. 2023. V. 10, No.4. P.91–102.
61. Wang T., Lu T., Zheng R., Li X. et al. Theoretical Study of a High-Efficiency GaP–Si Heterojunction Betavoltaic Cell Compared with Metal–Si Schottky Barrier Betavoltaic Cell // AIP Adv. 2021. V. 11. P.065110.
62. Kavak Y.R., Tütüncüler H. Theoretical Investigation of High-Efficiency GaN–Si Heterojunction Betavoltaic Battery // Can. J. Phys. 2019. V.97, No.9. P.1031–1038.
63. Dolgoplov M. V., Rakhimov R. Kh. Betavoltaics: Advances in Efficiency, Hybrid Systems, and Manufacturing Control // Proc. of the Intern. Sci. Conf. “The New Materials and Solar Technologies”. 2025. P.13–15; https://www.researchgate.net/publication/392893608_Beta-voltaics_Advances_in_Efficiency_Hybrid_Systems_and_Manufacturing_Control.

Получено 23 января 2025 г.