

## ЗАДАЧИ КОНТАКТООБРАЗОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ МИКРОСТРУКТУР SiC\*/Si

---

*Шодымуродов Улугбек Акмалович - Студент второго курса  
информационной безопасности Нурафшонский филиал ТУИТ*

*Жураев Асом Куйлибаевич - Студент второго курса  
информационной безопасности Нурафшонский филиал ТУИТ*

**Аннотация.** Энергетическая эффективность бета-преобразования радионуклидов внутри полупроводниковой структуры для использования в бетавольтаических устройствах рассматривается в данной работе. Предложенный подход использует радиоактивный изотоп углерода-14 (C-14) в качестве легирующей примеси, замещающей стабильный углерод-12 в молекуле полупроводникового карбида кремния (SiC). Такой подход позволяет сохранить химические свойства материала, при этом излучая бета-частицы.

**Ключевые слова:** Изотоп, кремния (SiC), эффективность, преобразование, энергии, радионуклидов, электрическую, полупроводниковой.

В работе обсуждается эффективность преобразования энергии радионуклидов в электрическую внутри полупроводниковой структуры в контексте бетавольтаического применения. Предлагаемый вариант исполнения бета-преобразователя на изотопе C-14 [1, 2] обладает мировой новизной, так как данный изотоп используется в концентрации на уровне легирующей примеси, замещающей атомы стабильного углерода-12 в молекуле карбида кремния, что соответствует уровню радиационной безопасности. Изотоп углерода-14 радиоактивен, он испускает бета-электрон, но в химическом отношении он обладает такими же свойствами как обычный изотоп углерода-12, который входит в состав молекул полупроводникового карбида кремния (SiC). Присутствие в небольших количествах, один атом радиоизотопа C-14 на тысячу или даже миллион атомов устойчивого радиоизотопа C-12, придает полупроводниковому материалу новые полезные в энергетическом отношении свойства.

Энергопреобразователь функционально состоит из нескольких составляющих:

1. Компактный источник ядерной энергии с высокой удельной плотностью;
2. Полупроводниковая структура прямого преобразования бета-излучения в электрическую энергию;

3. Накопитель энергии для импульсного расхода ее потребителем.

Каждая составляющая функционирующей системы имеет свою определенную эффективность, влияющую на коэффициент полезного действия системы в целом. Обоснование экспериментальной части работ выполнено на основе анализа совокупных физических факторов, влияющих на эффективность источника ядерной энергии. Учтена и проанализирована следующая совокупность факторов:

$$\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_{\text{то}} + \mathcal{E}_{\text{эс}} + \mathcal{E}_{\text{а/п}} + \mathcal{E}_{\text{ппс}} + \mathcal{E}_{\text{пп}} + \mathcal{E}_{\text{дпв}} + \mathcal{E}_{\text{нд}}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{то}}$  – телесный угол облучения, обусловленный приемным окном полупроводникового устройства;

$\mathcal{E}_{\text{эс}}$  – распределение по энергии спектра излучения радиоизотопа;

$\mathcal{E}_{\text{а/п}}$  – активность на единицу площади сопряжения полупроводника и радиоизотопа;

$\mathcal{E}_{\text{ппс}}$  – переизлучение промежуточного слоя;

$\mathcal{E}_{\text{дп}}$  – длина свободного пробега бета-частицы в полупроводнике;

$\mathcal{E}_{\text{дпв}}$  – длина свободного пробега вторичных электрон-дырочных пар в полупроводнике;

$\mathcal{E}_{\text{нд}}$  – энергия дефектообразования в полупроводнике.

Рассмотрим анализ роли каждого слагаемого определяющего эффективность проектируемого образца преобразователя энергии.

$\mathcal{E}_{\text{то}}$  – телесный угол облучения, обусловленный приемным окном полупроводникового устройства. Обзор известных технических решений свидетельствует, что, как правило, материалы радиоизотопа сопрягаются с поверхностью полупроводниковых структур (аналогичных структурам солнечных батарей). это облучение по полусфере с углом  $2\pi$  стерadian. В нашем случае атом радиоизотопа C-14, введенный в элементарную ячейку карбида кремния, как легирующая примесь, на месте атома C-12 в молекуле вещества SiC, облучает полупроводниковое соединение симметрично под сферическим углом  $4\pi$  стерadian, что в 2 раза эффективнее.

$\mathcal{E}_{\text{эс}}$  – распределение по энергии спектра излучения радиоизотопа. Полоса энергетического спектра бета-электронов с энергией от 2,2 эВ способна эффективно образовывать неравновесные вторичные электрон-дырочные пары в полупроводниковой структуре, последние вносят вклад в прямое преобразование энергии (аналогичное фото-ЭДС структур солнечных батарей).

Экспериментально установлено, что средняя энергия, затрачиваемая бета-электроном на образование электрон-дырочной пары, составляет утроенное значение ширины запрещенной зоны полупроводника. Чем шире запрещенная зона полупроводника, тем эффективнее генерация носителей, в нашем случае по сравнению с кремнием ширина запрещенной зоны в 2 раза шире, следовательно, эффективность ожидается в 2 раза выше.

$\mathcal{E}_{a/n}$  – активность на единицу площади сопряжения полупроводника и радиоизотопа. Бета-излучение атома С-14 в элементарной ячейке полупроводника образует сферическую симметрию, при этом ток короткого замыкания, генерируемого структурой, пропорционален активности изотопа. Более коротковолновый спектр бета-электрона поглощается по радиусу сферы в ближней окрестности атома – продукта распада (азот на месте атома С-14). Активность радиоизотопа обратно пропорциональна периоду полураспада и с одной стороны для С-14 это слабый показатель, но с другой стороны она пропорциональна количеству атомов радиоизотопа в рабочем слое пленки карбида кремния и, дополнительно, данный негативный фактор нивелируется еще и показателем самопоглощения. В сравнении с используемыми радиоизотопами для целей бетавольтаики у С-14 самопоглощение в среднем в 50 раз ниже, чем у Ni-63, поэтому толщина активного слоя пленки карбида кремния может быть существенно выше, чем у аналогов и повышает значение результирующей активности. Значение средней энергии испускаемых бета-электронов составляет 49 кэВ, что в 3 раза выше, чем у Ni-63. Максимальный квантовый выход вторичных электрон-дырочных пар от одного бета-электрона при активности 5,32 микроКи составляет около 2420, а у Ni-63 - 1320, что существенно выше. В совокупности отмеченный негативный фактор в целом не ухудшает эффективность по сравнению с аналогом.

$\mathcal{E}_{nnc}$  – переизлучение промежуточного слоя. Этот прием использования люминофоров для снижения концентрации наведенных радиационных дефектов в полупроводнике и расширения спектра поглощения за счет переизлучаемых люминофором фотонов с энергией сопоставимой с шириной запрещенной зоны полупроводника в нашем случае использовать не целесообразно. Радиационная пассивность кремния в 10 раз хуже, чем у карбида кремния – это, во-первых, а, во-вторых, в случае поверхностного источника радиоизотопа высокоэнергетические частицы поглощаются материалом сильнее, и генерация электрон-дырочных пар происходит уже на поверхности насыщенной центрами рекомбинации носителей, в этом случае они не вносят вклада в эффективное преобразование энергии. В



нашем случае и высокоэнергетическая часть спектра бета-электронов принимает участие в преобразовании энергии, т.к. отсутствуют ненасыщенные связи атомов в сферической симметрии взаимодействия излучения с веществом: атом С-14 преобразовался в атом азота в объеме кристаллической решетки. Рекомбинация неравновесных носителей подавлена.

$\mathcal{E}_{\text{дп}}$  – длина свободного пробега бета-частицы в полупроводнике. В качестве значения длины свободного пробега можно принять пробег, определенный по формуле Канайя–Окаяма:

$$L_{k-o} = 0,0276 \cdot A_B \cdot E^{1,67} \cdot Z^{-0,89} \rho^{-1}, \quad (3)$$

где  $L_{k-o}$  – длина свободного пробега электрона, мкм;  $A_B$  – средний атомный вес полупроводникового материала;  $E$  – энергия электрона, кэВ;  $Z$  – средний атомный номер полупроводникового материала;  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>. Диапазон длины свободного пробега бета-электрона в SiC 1ч10 мкм в зависимости от удельного сопротивления и связанной с ней подвижностью носителей. Исходя из этого параметра, оптимизируется толщина активного слоя карбида кремния и положение гетероперехода или p-n перехода.

$\mathcal{E}_{\text{дпв}}$  – длина свободного пробега неравновесных вторичных электрон-дырочных пар в полупроводнике. Диффузионная длина свободного пробега вторичных носителей важный параметр

$$L_D = (D \cdot \tau)^{0,5}, \quad (4)$$

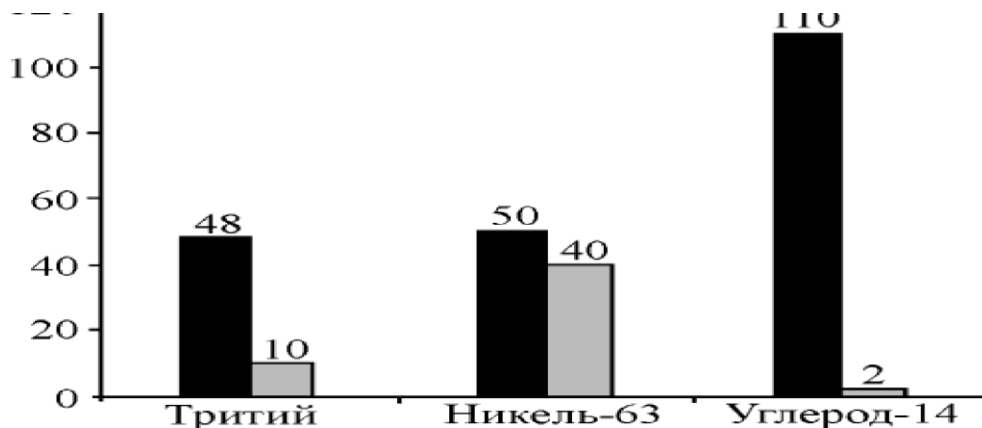
где  $D$  и  $\tau$  – соответственно коэффициент диффузии в градиенте концентраций и время жизни носителей до их рекомбинации. Носители, рожденные бета-электронами на расстоянии  $L_D$  от области объемного пространственного заряда (ОПЗ) и в области ОПЗ разделяются внутренним электростатическим полем и вносят вклад в преобразованную энергию (радиоизотопную ЭДС). Совокупная область составляет в зависимости от уровня легирования посторонней примесью определяющей тип проводимости до 10 мкм. Легирование радиоизотопом С-14 в нашем случае не оказывает существенного влияния на длину свободного пробега, время жизни носителей и эффективность разделения зарядов, т.к. он эквивалентен С-12 относительно валентных электронов и существенно не деформирует параметр решетки из-за низкой концентрации.

$\mathcal{E}_{\text{нд}}$  – энергия дефектообразования в полупроводнике. Карбид кремния кубической модификации относится к широкозонным полупроводникам, для которых характерны слабые обратные токи утечки, поэтому он одинаково эффективно работает как в преобразовании фотонов, так и бета-электронов в широком интервале рабочих температур. Это материал экстремальной

электроники, он может работать в системах с концентраторами солнечной энергии, тенденция к снижению фототока начинает проявлять себя при  $115^{\circ}\text{C}$ , у кремния при  $50^{\circ}\text{C}$ . Токи утечки наблюдаются в области гетероперехода из-за дефектов несоответствия параметров решетки, релаксация механических напряжений несоответствия выполняется на сетке дислокаций расположенной в фазе кремния. Сетка дислокаций выполняет роль скрытого геттера и движется перед фронтом роста SiC-фазы, сорбируя на своей поверхности атомы посторонней примеси кремния и атомы C-14, насыщая оборванные ковалентные межуатомные связи. Рассмотренный фактор не ухудшает эффективность энергопреобразования в широком интервале температур.

Одной из составляющих конструкции является источник энергии – нестабильный изотоп. Обоснованием выбора радиоизотопа для нашего случая послужили три фактора: технологический, технико-экономический и экологический. Технологический фактор выбора C-14 обусловлен способом формирования пленки карбида кремния на монокристаллической подложке кремния – это способ эндотаксии. Подложка кремния при температуре  $1360^{\circ}\text{C}$  экспонируется в среде водорода и углеводорода, последний при этой температуре восстанавливается до углерода и углерод и кремний при этой температуре неизбежно образуют соединение SiC. Если углерод представлен нестабильным радиоизотопом, то и соединение будет способно излучать бета-электроны с энергией достаточной для образования вторичных электронов, взаимодействующих с электростатическим полем гетероперехода или гомоперехода в карбиде кремния в зависимости от варианта исполнения энергопреобразователя. В данной работе экспериментальный образец выполнен в самом простом варианте – изотипный гетеропереход. Изотоп C-14 (C-13) представлен лекарственным препаратом для онкобольных с предельно низкой активностью безопасной для окружающих.

Технико-экономический фактор представлен информацией из тематической публикации [3]:



Сравнение изотопов по запасу энергии (выделено черным) и стоимости. ■ – запас энергии, кВт х ч/кг; ■ – стоимость за 1 Ки активности, тыс. долл.

Радиоизотоп С-14 можно нарабатывать на исследовательских атомных реакторах, а целесообразнее перерабатывать отработавшие угольные стержни АЭС – это экологический фактор повторного использования отходов АЭС.

Другой составляющей конструкции является полупроводниковая структура. Анализ следует начать с физического принципа работы полупроводниковой структуры по прямому преобразованию энергии. Диодная структура полупроводника может быть представлена несколькими вариантами исполнения: на основе р-п перехода, на основе барьера Шоттки и на основе гетероперехода. В любом случае структура имеет встроенное внутреннее электростатическое поле, обусловленное разной работой выхода сопрягаемых материалов. Это означает, что у полупроводника в области объемного пространственного заряда и примыкающего к ней пространства, соответствующего длине свободного пробега носителя, без всякого внешнего смещения электрон-дырочные пары, возникшие под воздействием бета-излучения с энергией, соответствующей диапазону от одного до трех значений ширины запрещенной зоны, будут разделяться: дырки и электроны будут выбрасываться в сообразно знаку заряда на границах ОПЗ. Структура оказывается включенной в прямое смещение и энергетический барьер уменьшается вплоть до спрямления. Такое движение положительных и отрицательных носителей заряда вызовет во внешней цепи ток, направление которого будет от плюса к минусу – это ток, соответствующий преобразованной энергии ядерных превращений атомов. Величина тока растет пропорционально логарифму активности введенного С-14 в SiC-фазу. Максимальная величина вырабатываемой энергии определяется высотой энергетического барьера. Обоснование выбора структуры для экспериментального образца определялось



самым простым вариантом ее исполнения – это гетероструктура n-SiC/n-Si, которая далека от оптимального варианта с предполагаемым использованием процессов фотолитографии и планарного исполнения гетероструктуры p-n SiC/nSi, n-p SiC/p-Si, p<sup>+</sup>-n-p SiC/pSi. Электрические выводы к структуре выполнены в виде зондовых прижимных контактов, которые обеспечивают сбор носителей с площади не более 0,25мм<sup>2</sup>. Чипы структур экспериментальных образцов имеют геометрические размеры 1 x 1 x 0,5 мм. Работы по металлизации контактных площадок большей площади для эффективного сбора носителей намечается проводить в перспективе.

Результаты тестирования экспериментальных образцов чипов гетероструктур вертикального исполнения выполнено с использованием приборов В7-21А, характериографа, экранированной измерительной ячейки с прижимными зондовыми выводами. Типичные значения тока короткого замыкания от 1 – 70 нА, напряжение холостого хода 0.1 – 6 мВ для области сбора носителей площадью 0,25мм<sup>2</sup>.

Сравнение с известными значениями для чиповых структур (не для систем структур) на основе кремния, карбида кремния и изотопа Ni-63, приведенных в литературных источниках [4], затруднительно, так как активность по сравнению с аналогами у нас в тысячи раз меньше, площади чипов в сотни раз меньше. Но если ввести удельные пересчитанные значения показателей, то можно заключить следующее. Используемая нами активность по сравнению с аналогом в 100 раз меньше (1 Ку активности стоит 1 млн руб.). Сравнение не вполне корректное, т.к. в качестве аналога взята батарея, представленная в виде сборки чипов карбидокремниевых диодов Шоттки соединенных последовательно. В нашем случае значение тока холостого хода одного чипа по сравнению с аналогом-сборкой как минимум в 40 раз больше, напряжение холостого хода в 450 раз меньше, мощность в 16 раз меньше. Если учесть, что в нашем случае активность в 100 раз (и более) меньше, то в итоге получим эффективность выросла по отношению к аналогу в 6 раз и более.

Дальнейшая работа проводится в реализации третьей компоненты системы – накопитель энергии для импульсной активации энергопреобразователя или его варианта, предполагаемого использования сборки чипов с накопителями, которые подключаются по круговой замкнутой системе по мере накопления энергии. Предварительные экспериментальные тестирования чипов в сборе с ионистором показали обнадеживающие результаты.

**Библиографический список:**

1. Гурская А.В., Чепурнов В.И., Латухина Н.В., Долгополов М.В. Способ получения пористого слоя гетероструктуры карбида кремния на подложке кремния // Патент РФ №2653398 опубл. 24.01.2018 Бюл. № 3.
2. Долгополов М.В, Сурнин О.Л., Чепурнов В.И. Устройство генерирования электрического тока посредством преобразования энергии радиохимического бета-распада С-14 // Патент РФ № 2714690 опубл. 19.02.2020 Бюл. №5.
3. Сауров А.Н., Булярский С.В., Рисованый В.Д., Павлов А.А., Абанин И.Е., Кицюк Е.П., Шаманаев А.А., Лебедев Е.А. // Наноструктурированные источники тока, возбуждаемые  $\beta$ -излучением, на основе углеродных нанотрубок // Известия высших учебных заведений. Электроника. Том 20, №5, 2015.
4. Абанин И.Е. Выбор активных слоев источника питания с р—п-переходом, возбуждаемым  $\beta$ -излучением. Нано- и микросистемная техника, № 10, 2015.