

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 733 616** (13) **C2**

(51) МПК  
[C30B 29/36 \(2006.01\)](#)  
[C30B 31/06 \(2006.01\)](#)  
[G21H 1/02 \(2006.01\)](#)  
(52) СПК  
[C30B 29/36 \(2020.05\)](#)  
[C30B 31/06 \(2020.05\)](#)  
[G21H 1/02 \(2020.05\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 16.10.2020)

(21)(22) Заявка: [2020110496](#), 11.03.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
11.03.2020

Дата регистрации:  
05.10.2020

Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 11.03.2020

(43) Дата публикации заявки: 15.07.2020 Бюл. №  
[20](#)

(45) Опубликовано: [05.10.2020](#) Бюл. № [28](#)

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: ГУРСКАЯ А.В. и др. 14С Бета-  
преобразователь, "Физика элементарных  
частиц и атомного ядра", 2017, Т.48, No.6,  
стр.906, рис. а). СHERPURNOV V.I. et al.  
Optimization of the Beta Converter,  
"Mathematical Modeling and Boundary Value  
Problems", May, 27-30, 2019, Samara,  
Russian Federation, pp 369-370.  
СHERPURNOV V.I. et al. C-Betavoltaic  
Energy Converter

in Por-SiC/Si, "International Scientific Journal  
"Materials Science. Non-Equilibrium Phase  
Transformations", 2017, Vol.3, No.3, p 119.

Адрес для переписки:  
443001, Самарская обл., г. Самара, ул.  
Ульяновская, 52/55, этаж 16, комната 28,  
Общество с ограниченной  
ответственностью "БетаВольтаика"

(72) Автор(ы):

Сурнин Олег Леонидович (RU),  
Чепурнов Виктор Иванович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной  
ответственностью "БетаВольтаика" (RU)

(54) КАРБИД КРЕМНИЯ: МАТЕРИАЛ ДЛЯ РАДИОИЗОТОПНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к полупроводниковым структурам карбида кремния. Карбид кремния: материал для радиоизотопного источника энергии, содержащий в своем составе монокристаллическую фазу полупроводниковой структуры карбида кремния в виде пленки, имеющей n- и p-тип проводимости для разделения электронно-дырочных пар, включает в молекулярной структуре карбида кремния

элементы: изотоп углерода  $C^{12}$  и дополнительно  $C^{14}$  для преобразования его энергии излучения в электрическую энергию, при этом концентрация радиоизотопа  $C^{14}$  в одном из слоев n- или p-типа проводимости составляет от  $5 \cdot 10^{17}$  до  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Слой карбида кремния n- или p-типа проводимости может быть сформирован на поверхности подложки монокристаллического кремния. Слой карбида кремния с  $C^{14}$  n- или p-типа проводимости имеет пористую морфологию поверхности. Изобретение обеспечивает минимизацию расхода радиоизотопа  $C^{14}$  в веществе полупроводниковой структуры, что определяет технико-экономическую эффективность и радиационную безопасность применения вещества в полупроводниковых устройствах энергопреобразования. 2 з.п. ф-лы, 6 пр., 5 ил.

Изобретение относится к веществам из области электронной техники, в частности относится к полупроводниковым структурам карбида кремния, содержащим в своем молекулярном составе атомы радиоизотопа углерода-14 функционально выполняющим роль источника энергии радиохимического распада, энергетический барьер структуры способен напрямую преобразовывать эту энергию в электрическую форму.

Известно техническое решение [1] в котором радиоизотопное вещество ( $Si^{14}C$ ) использовано в качестве трассера для изучения коэффициента самодиффузии углерода в монокристаллическом полупроводниковом карбиде кремния. При его получении использован порошок кремния фракции 325 микрон и углерод C-14 активностью 309,59 милиКюри на грамм в соотношении 1:1,2. Использование радиоактивного меченого углерода позволило получить расчетную формулу для определения энергии активации и температурной зависимости коэффициента самодиффузии углерода в карбиде кремния, т.е. используется свойств C-14 излучать бета электрон позволяющее отследить его трассу самодиффузии в веществе. В этом заключается отличие аналога от предполагаемого технического решения и оно связано с назначением структуры вещества ( $Si^{14}C$ ) с высоким значением активности компонента C-14.

Известны другие аналогичные радиоизотопные вещества излучающие бета-электроны и полупроводниковые упорядоченные структуры объекта изобретения на вещество приводящие к получению эффекта прямого преобразования энергии радиоизотопного превращения в электрическую высокой удельной мощности и ресурса.

Известным аналогом предполагаемого изобретения на вещество может быть техническое решение [2], в котором в качестве ингредиента для алмазной подложки полупроводникового материала структуры использована алмазная пленка на подложке алмаза с выпрямляющей характеристикой металлизации по модели Шоттки. В качестве источника ионизирующего излучения предлагаются к использованию радиоизотоп из ряда: соединение трития, никель-63, прометий-147, сопрягаемых с материалом вещества полупроводниковой структуры посредством физического контакта. Удельная энергия, выделяемая при распаде радиоизотопа приходящаяся на единицу площади сопряжения с полупроводниковым материалом, характеризует эффективность преобразователя. Бета-излучение атома радиоизотопа распространяется по сферической поверхности, в аналоге эффективно используется только полусфера распространения излучения направленная в сторону полупроводникового вещества, преобразующего энергию. Другая часть энергии теряется - это недостаток, влияющий на полезную эффективность вещества структуры связанную с генерацией электронно-дырочных пар. Удельную эффективность преобразования энергии радиохимического распада, связанную с выбором метода сопряжения веществ, можно повысить, если бы авторы использовали в качестве радиоизотопа углерод-14, вводимый эпитаксиально в выращиваемую пленку, в этом случае центром излучения являлся бы атом радиоизотопа, излучение распространялось бы по сфере, вызывая вторичные электронно-дырочные пары неравновесных носителей, что существенно изменяет взаимодействие и приводит к генерации электронно-дырочных пар разделяемых барьером Шоттки в области взаимодействия. Таким образом, недостатком является ограниченное число

генерируемых неравновесных носителей вследствие неразвитой площади контакта сопрягаемых компонентов.

Известны вещества, составляющие p-i-n структуру ядерной батареи с инградиентным слоем карбида кремния легированным ванадием [3]. Структура или компонентный состав последовательности слоев ингредиентов вещества составляющих батарею включает в себя подложку из карбида кремния n-типа с концентрацией примеси от  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  до  $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , на одну сторону которой нанесен омический контакт, а на другую последовательно эпитаксиальный слой карбида кремния с собственной проводимостью с концентрацией примеси n-типа от  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  толщиной от 3 до 5 мкм и эпитаксиальный слой карбида кремния p-типа с концентрацией примеси  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  толщиной от 0,2 до 0,5 мкм, причем слой карбида кремния с собственной проводимостью формируют при помощи имплантации ионов ванадия с энергией от 2000 до 2500 кэВ и дозой  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . На часть поверхности эпитаксиального слоя карбида кремния p-типа наносят омический контакт, на другую часть поверхности наносят слой радиоизотопа. В данном техническом решении использована структура с недостаточно развитой поверхностью контакта и взаимодействия между радиоизотопным ингредиентом и компонентами, составляющими структуру полупроводникового вещества. Вещество полупроводниковой структуры связано с веществом радиоизотопа посредством физического сопряжения фаз, поэтому площадь взаимодействия определена площадью физического контакта каждого слоя структуры с радиоизотопом, что эффективно, но недостаточно т.к. один из слоев сэндвича с радиоизотопом эффективно работает только в одну сторону, следовательно, имеет место потеря энергии радиоизотопного распада в электричество.

Известен компонентный состав вещества, используемого в ядерной батарее из карбида кремния с контактом по модели Шоттки [4]. На компонент вещества в виде монокристаллической подложки карбида кремния n<sup>+</sup> - типа проводимости с концентрацией примеси от  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $1 \cdot 10 \text{ см}^{-3}$  с одной стороны наносят слой карбида кремния с собственной проводимостью с концентрацией примеси от  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а с другой стороны наносят омическую контактную металлизацию. На слой карбида кремния с собственной проводимостью наносят барьерный слой металла из хрома или молибдена или вольфрама и верхний металлический слой из золота или серебра или алюминия или платины одинаковой формы. На поверхность барьерного слоя металла наносят радиоактивный изотоп. Недостаток данного технического решения - это нерациональный расход дорогостоящего радиоизотопа, который облучает поверхность барьерного слоя. Излучение в противоположную сторону теряется, снижая эффективность использования удельной энергии радиоизотопа.

Другой аналогом вещества используемого в техническом решении [5] является вещество, ингредиентный состав которого образует полупроводниковую структуру, причем матричный компонент имеет вид пластины полупроводника с текстурированной поверхностью и со сквозными каналами для увеличения площади контакта с веществом радиоизотопа. Стенки каналов имеют диодную структуру по образующей к стенкам каналов, стенки каналов и поверхность покрывают радиоактивным веществом, содержащим  $^3\text{H}$  или  $^{63}\text{Ni}$ . Шаг каналов в сотовой структуре и диаметр канала соизмеримы по значению и составляют 100 мкм. Данный отличительный признак отражает взаимосвязи ингредиентов. Недостатком технического решения является технологически неэффективное использование дорогостоящего изотопа Ni-63, вследствие явления самопоглощения в пределах трековой области объема канала заполненного изотопом. Кроме того, в данном техническом решении использована структура с недостаточно развитой поверхностью контакта между компонентами структуры вещества. Вещество полупроводниковой структуры связано с веществом радиоизотопа посредством физического сопряжения фаз, поэтому площадь контакта определяет ограниченную эффективность взаимодействия бета-электронов с полупроводниковой фазой, следовательно, и малоэффективно преобразование энергии радиоизотопного распада в электричество.

Известно техническое решение [6], в котором матрица полупроводникового материала представлена структурой карбида кремния 4Н политипа, включающей р- и п-области проводимости толщиной соответственно 4 мкм с концентрацией дырок  $3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и 0,25 мкм с концентрацией электронов  $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Для преобразования энергии радиохимического распада изотопа никеля-63 активностью 1 мкКюри использована толщина никелевого-63 покрытия 3 мкм., а металлизация другого контакта выполнена покрытием Al/Ti. В работе приводятся характеристики энергопреобразования для материала структуры и симулированного эквивалентного облучения потоком электронов электронного микроскопа, а не натуральный эксперимент с пленкой никеля-63. Полученные показатели эффективности: КПД 3,7%, ток короткого замыкания 22рА, напряжение холостого хода 0,95 V. Недостатком технического решения является предполагаемое использование структуры, в которой сопряжение компонентов радиоизотопа и полупроводника будет иметь ограниченную площадь контакта и, следовательно, ограниченную этим фактором эффективность преобразования энергии.

Известен компонентный состав вещества, который можно взять в качестве прототипа по числу сходных существенных признаков [7]. В публикации приводится техническое решение, в котором присутствует два компонента вещества для энергопреобразователя: радиоизотоп углерод-14, испытывающий радиохимическое превращение сопровождающееся излучением бета-электронов с энергией 156 кэВ и периодом полураспада 5730 лет; полупроводниковая гетероструктура карбида кремния на подложке монокристаллического кремния ( $\beta\text{-SiC/Si}$ ), характеризуется тем, что пленка карбида кремния имеет р-п переход. Карбид кремния по физико-химическим свойствам относится к материалам с высокой устойчивостью к наведенным радиационным дефектам, энергии бета-электронов углерода-14 достаточно для генерации вторичных электронно-дырочных пар. В работе предложено в парных слоях Si-C молекулярной структуры карбида кремния, вместо атомов углерода-12 использовать радиоизотоп углерода-14, как источника радиохимической энергии, а р-п переход структуры своим внутренним электростатическим полем разделял вторичные электронно-дырочные пары, создавая во внешней цепи постоянный электрический ток. Для повышения радиационной устойчивости и существенного увеличения активности предложен вариант использования пористой гетероструктуры карбида кремния на подложке монокристаллического кремния.

Недостатками данного технического решения являются:

1. Высокое содержание радиоизотопа в одной из областей р-п перехода требует особых условий организации производства в целях радиационной безопасности;
2. Повышенный расход углерода-14 экономически не целесообразен.
3. В источнике информации не приводится примеров конкретного компонентного состава вещества энергопреобразователя, например диапазона концентраций радиоизотопа, тактико-технических характеристик получаемого вещества преобразующего радиоизотопную энергию ядерного превращения в электрическую энергию.

Достоинство заключается в эффективности генерации вторичных электронно-дырочных пар в области р-п перехода внутренним излучением самого полупроводникового карбида кремния и исключение типичных потерь на самопоглощение бета-излучения веществом.

Целью изобретения является минимизация концентрации радиоизотопа в веществе полупроводниковой структуры SiC, используемого для прямого преобразования энергии радиохимического превращения атомов углерода-14 в электричество.

Техническим результатом предполагаемого изобретения является вещество полупроводниковой структуры: карбид кремния, молекулярная структура которого содержит атомы углерода. Неочевидный эффект связанный с генерацией электрического тока проявляется в том, что внутримолекулярным источником радиоизотопной энергии является его атомарный компонент: радиоизотоп углерода-14, который в сочетании со стабильным радиоизотопом углерода-12 составляют монокристаллическую структуру полупроводникового вещества.

Соединение ( $\text{Si}^{14}\text{C}$ ) с нестабильным атомом радиоизотопа углерода-14 не встречается в природе, его получают искусственным путем, оно с иными, чем у соединения  $\text{SiC}$  с изотопом  $\text{C-12}$  свойствами, новые свойства, обусловленные радиоизотопом можно использовать в прикладных целях.

Кроме того, радиоизотоп углерод-14 может находиться в виде сверхстехиометрического атома в гомогенной фазе полупроводникового соединения  $\text{SiC}$ , т.е. находиться в междоузлии, занимать место атома кремния или замещать часть атомов углерода-12, т.е. выполнять роль легирующей примеси.

К новым свойствам относят: не известную по величине работу выхода электрона, иное значение параметра кристаллической решетки, появляется новое свойство выделять энергию компонентом структуры вещества испытывающим радиохимическое превращение с известным периодом полураспада 5760 лет и иным спектром энергии электрона в карбиде кремния. Комплекс новых свойств расширяет арсенал средств вещества полупроводниковых карбидокремниевых структур по прямому преобразованию энергии радиохимического превращения в другую форму - электрическую энергию. При этом содержание или доля радио изотопного компонента в веществе имеет широкий спектр концентраций, что определяет технико-экономическую эффективность и радиационную безопасность применения вещества в полупроводниковых устройствах энергопреобразования.

Техническим результатом предлагаемого изобретения на вещество является структура взаимосвязей его компонентов на молекулярном уровне. Молекулярная структура компонентов фазы карбида кремния представлена:

1. Карбидом кремния в виде монокристаллической пленки. В молекулы вещества пленки карбида кремния  $\text{SiC}$  входит углерод, представленный смесью радиоизотопов  $\text{C-12}$  и  $\text{C14}$  в диапазоне концентраций углерода  $\text{C-14}$  от  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , функция компонента ( $\text{Si}^{14}\text{C}$ ) в полупроводниковой структуре выделять энергию радиоизотопного распада атома  $\text{C-14}$  в виде бета-электромагнитного излучения электронов в сферической конфигурации вокруг атома радиоизотопа в объеме вещества;

2 Карбидом кремния в виде монокристаллической пленки, с компонентом ( $\text{Si}^{14}\text{C}$ ), который может быть в области n- или p-типа проводимости в фазы  $\text{SiC}$ ;

3. Карбидом кремния в виде монокристаллической пленки, которая сопряжена с подложкой кремния n- или p-типа проводимости (образуя гетероструктуру  $\text{SiC/Si}$ );

4. Гетероструктура  $\text{SiC/Si}$  может иметь варианты исполнения: n-p переход или гетеропереход, функция которых разделять вторичные электронно-дырочные пары внутренним полем области объемного пространственного заряда n-p перехода или гетероперехода, которые напрямую преобразует энергию радиоизотопного ядерного превращения в постоянный электрический ток по внешней цепи.

Технический эффект на основе новых свойств обусловленных структурой вещества проявляет себя следующим образом:

- атом углерода-14 излучает бета электрон в объем кристаллической решетки и обладает энергией достаточной для генерации в сферической симметрии вокруг атома радиоизотопа вторичных неравновесных носителей (электронно-дырочных пар);

- последние разделяются внутренним полем p-n перехода, при этом во внешней цепи появляется постоянный ток короткого замыкания и напряжение холостого хода высокой удельной мощности на единицу объема энергопреобразователя и ресурса непрерывной работы;

- эффективность энергетического превращения обусловлена прямым преобразованием энергии генерируемой в объеме молекулярной структуры  $\text{SiC}$ -фазы;

- минимальная концентрация компонента радио изотопного карбида кремния ( $\text{Si}^{14}\text{C}$ ) в диапазоне от  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  в структуре p-n  $\text{SiC}$  меняет электрофизические, физико-химические, функциональные свойства структуры в целом. В концентрации радиоизотопа  $\text{C-14}$  на уровне легирования вещества не требуется разрешения надзорных органов радиационного контроля;

- структуру p-n  $\text{SiC}$  можно формировать на подложке монокристаллического кремния ориентации (111), (110), (100), что повышает технико-экономическую эффективность за счет снижения стоимости подложечного материала в 100 раз в

отличие от использования в качестве ингредиента вещества подложечного карбида кремния;

- пленка карбида кремния имеет толщину от 50 нм до 5 мкм, структура политипов: гексагональная на подложке карбида кремния или кубическая на подложке монокристаллического кремния, количественный состав соединения стехиометрический или сверхстехиометрический в сторону избытка углерода в том числе углерода-14 за счет собственного точечного дефектообразования монокристаллической структуры;

- в одном из вариантов структуры вещества разделение неравновесных носителей осуществляется внутренним электрическим полем гетероперехода структуры вещества;

- в одном из вариантов вещества могут использоваться структуры n-SiC\*/p-SiC/p-Si или p-SiC\*/n-SiC/n-Si, где SiC\* - фаза карбида кремния содержащая C-14;

- энергия бета-электронов распада C-14 не достаточна для генерации радиационных дефектов, а использование пористой морфологии поверхности активированного радиоизотопом карбида кремния повышает его радиационную устойчивость за счет стока дефектов на развитую поверхность;

- в одном из вариантов используются зеркально-симметричные последовательности слоев структуры полупроводникового вещества относительно подложки кремния с двухсторонней рабочей областью.

Таким образом, вещество для прямого преобразования энергии радиоизотопного распада в электрическую форму полупроводниковым монокристаллическим карбидом кремния структурированным в процессе формирования вещества энергопреобразователя послойно со свойствами приданными слоям легирующими атомами ингредиентов донорной или акцепторной природы образующие слои n- и p- типа проводимости, отличающееся тем, что в качестве дополнительного легирующего элемента используют радиоизотоп углерода-14 в n- или p-слое проводимости в диапазоне концентраций от  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

Примеры конкретного выполнения изобретения на вещество полупроводниковой структуры, предназначенной для генерации постоянного тока малой мощности посредством преобразования внутриядерной энергии не стабильного радиоизотопа углерода-14.

Пример 1.

Полупроводниковая структура монокристаллического карбида кремния для радиоизотопного источника энергии имеет следующую последовательность слоев:

- подложка кремния p-типа проводимости КДБ-4,5 (100)-ориентации с толстым 0,5 мкм. слоем окисла кремния с нерабочей стороны;

- пленка карбида кремния p-типа проводимости наследующая ориентацию подложки кремния с рабочей стороны легирована посторонней примесью галлия и углерода-14 соответственно с концентрациями  $5 \cdot 10 \text{ см}^{-3}$  и  $2 \cdot 10 \text{ см}^{-3}$ , соотношение атомов углерода-14 к атомам углерода-12 в пленке карбида кремния составляет один атом на  $10^5$  атомов.

Взаимосвязи компонентов в слоях гетероструктуры p-SiC\*/p-Si/SiO<sub>2</sub> проявляются в том, что легирующая примесь атомарного углерода-14, входящая в молекулу карбида кремния (Si <sup>14</sup>C) полупроводниковой структуры излучает бета-электроны с энергией достаточной для генерации вторичных электронно-дырочных пар носителей в области гетероперехода SiC/Si, последние разделяются электростатическим внутренним полем гетероперехода. Толстый слой SiO<sub>2</sub> с нерабочей стороны имеет предназначение исключить диффузию углерода-14 в кремний и образование карбида кремния с нерабочей стороны.

Свойства структуры вещества проявляются зондовыми измерениями структуры приготовленными в планарном и вертикальном исполнении. При планарном исполнении измерительные зонды устанавливаются на карбид кремния и вскрытую область окна в карбиде кремния до кремния (со стороны пленки карбида кремния). При вертикальном исполнении измерительные зонды устанавливаются на карбид кремния и кремний со стороны вскрытого окна в окисле кремния до кремния. Для чипов вертикальной и планарной структуры с геометрическими размерами рабочей

стороны соответственно 2×2 мм и 2×5 мм. Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода составляют в среднем соответственно 15 нА и 0,1 мВ (измерительный прибор В7-21А, измерительная приставка-камера исключает электромагнитные наводки и оптическое излучение, кроме естественного теплового).

Пример 2.

Полупроводниковая структура монокристаллического карбида кремния для радиоизотопного источника энергии имеет следующую последовательность слоев:

- подложка кремния n-типа проводимости КЭФ-20 (110)-ориентации с толстым 0,5-слоем окисла кремния с нерабочей стороны;

- пленка карбида кремния n-типа проводимости наследующая ориентацию подложки кремния с рабочей стороны легирована посторонней примесью фосфора и углерода-14 соответственно с концентрациями  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , соотношение атомов углерода-14 к атомам углерода-12 в пленке карбида кремния составляет один атом на  $10^5$  атомов.

Взаимосвязи компонентов в слоях гетероструктуры n- SiC\*/n-Si/SiO<sub>2</sub> проявляются в том, что легирующая примесь атомарного углерода-14, входящая в молекулу карбида кремния (Si <sup>14</sup>C) полупроводниковой структуры излучает бета-электроны с энергией достаточной для генерации вторичных электронно-дырочных пар носителей в области гетероперехода SiC\*/Si, последние разделяются электростатическим внутренним полем гетероперехода. Толстый слой SiO<sub>2</sub> с нерабочей стороны имеет предназначение исключить диффузию углерода-14 в кремний и образование карбида кремния с нерабочей стороны.

Свойства структуры вещества проявляются зондовыми измерениями структуры приготовленными в планарном и вертикальном исполнении. При планарном исполнении измерительные зонды устанавливаются на карбид кремния и вскрытую область окна до кремния со стороны пленки карбида кремния. При вертикальном исполнении измерительные зонды устанавливаются на карбид кремния и кремний со стороны вскрытого окна в окисле кремния. Для чипов вертикальной и планарной структуры с геометрическими размерами рабочей стороны соответственно 2×2 мм и 2×5 мм. Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода составляют в среднем соответственно 17 нА и 0,15 мВ (измерительный прибор В7-21А, измерительная приставка-камера исключает электромагнитные наводки и оптическое излучение, кроме естественного теплового).

Пример 3.

Полупроводниковая структура монокристаллического карбида кремния для радиоизотопного источника энергии имеет следующую последовательность слоев:

- подложка кремния n-типа проводимости КЭФ-5 (111)-ориентации с толстым 0,5 мкм. слоем окисла кремния с нерабочей стороны;

- пленка карбида кремния n-типа проводимости наследующая ориентацию подложки кремния с рабочей стороны легирована посторонней примесью фосфора и углерода-14 соответственно с концентрациями  $8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и  $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , соотношение атомов углерода-14 к атомам углерода-12 в пленке карбида кремния составляет один атом на  $10^3$  атомов.

Взаимосвязи компонентов в слоях гетероструктуры n-SiC\*/n-Si/SiO<sub>2</sub> проявляются в том, что легирующая примесь атомарного углерода-14, входящая в молекулу карбида кремния (Si <sup>14</sup>C) полупроводниковой структуры излучает бета-электроны с энергией достаточной для генерации вторичных электронно-дырочных пар носителей в области гетероперехода SiC\*/Si, последние разделяются электростатическим внутренним полем гетероперехода. Толстый слой SiO<sub>2</sub> с нерабочей стороны имеет предназначение исключить диффузию углерода-14 в кремний и образование карбида кремния с нерабочей стороны.

Свойства структуры вещества проявляются зондовыми измерениями структуры приготовленными в планарном и вертикальном исполнении. При планарном исполнении измерительные зонды устанавливаются на карбид кремния и вскрытую область окна до кремния со стороны пленки карбида кремния. При вертикальном исполнении измерительные зонды устанавливаются на карбид кремния и кремний со

стороны вскрытого окна в окисле кремния. Для чипов вертикальной и планарной структуры с геометрическими размерами рабочей стороны соответственно 2×2 мм и 2×5 мм. Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода составляют в среднем соответственно 17,5 нА и 0,1 мВ (измерительный прибор В7-21А, измерительная приставка-камера исключает электромагнитные наводки и оптическое излучение, кроме естественного теплового).

#### Пример 4.

Полупроводниковая структура монокристаллического карбида кремния для радиоизотопного источника энергии имеет следующую последовательность слоев:

- подложка кремния n-типа проводимости КЭФ-20 (110)-ориентации с толстым 0,5 мкм. слоем окисла кремния с нерабочей стороны;
- пленка карбида кремния n-типа проводимости наследующая ориентацию подложки кремния с рабочей стороны легирована посторонней примесью фосфора и углерода-14 соответственно с концентрациями  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , соотношение атомов углерода-14 к атомам углерода-12 в пленке карбида кремния составляет один атом на  $10^3$  атомов.

Взаимосвязи компонентов в слоях гетероструктуры n-SiC\*/n-Si/SiO<sub>2</sub> проявляются в том, что легирующая примесь атомарного углерода-14, входящая в молекулу карбида кремния (Si <sup>14</sup>C) полупроводниковой структуры излучает бета-электроны с энергией достаточной для генерации вторичных электронно-дырочных пар носителей в области гетероперехода SiC/Si, последние разделяются электростатическим внутренним полем гетероперехода. Толстый слой SiO<sub>2</sub> с нерабочей стороны имеет предназначение исключить диффузию углерода-14 в кремний и образование карбида кремния с нерабочей стороны.

Свойства структуры вещества проявляются зондовыми измерениями структуры приготовленными в планарном и вертикальном исполнении. При планарном исполнении измерительные зонды устанавливаются на карбид кремния и вскрытую область окна до кремния со стороны пленки карбида кремния. При вертикальном исполнении измерительные зонды устанавливаются на карбид кремния и кремний со стороны вскрытого окна в окисле кремния. Для чипов вертикальной и планарной структуры с геометрическими размерами рабочей стороны соответственно 2×2 мм и 2×5 мм. Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода составляют в среднем соответственно 22 нА и 0,35 мВ (измерительный прибор В7-21А, измерительная приставка-камера исключает электромагнитные наводки и оптическое излучение, кроме естественного теплового).

#### Пример 5.

Полупроводниковая структура монокристаллического карбида кремния для радиоизотопного источника энергии имеет следующую последовательность слоев:

- подложка кремния n-типа проводимости КЭФ-20 (110)-ориентации;
- пленка карбида кремния n-типа проводимости наследующая ориентацию подложки кремния с двух сторон легирована посторонней примесью фосфора и углерода-14 соответственно с концентрациями  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , соотношение атомов углерода-14 к атомам углерода-12 в пленке карбида кремния составляет один атом на  $10^3$  атомов.

Взаимосвязи компонентов в слоях гетероструктуры n-SiC\*/n-Si/SiO<sub>2</sub> проявляются в том, что легирующая примесь атомарного углерода-14, входящая в молекулу карбида кремния (Si <sup>14</sup>C) полупроводниковой структуры излучает бета-электроны с энергией достаточной для генерации вторичных электронно-дырочных пар носителей в области гетероперехода SiC/Si, последние разделяются электростатическим внутренним полем гетероперехода. Свойства структуры вещества проявляются зондовыми измерениями структуры приготовленными в планарном исполнении. При планарном исполнении измерительные зонды устанавливаются на карбид кремния и вскрытую область окна до кремния со стороны пленки карбида кремния. Для чипов структуры с геометрическими размерами рабочей стороны 2×5 мм. Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода составляют с каждой стороны симметричной структуры в среднем соответственно 22 нА и 0,35 мВ (измерительный прибор В7-



21А, измерительная приставка-камера исключает электромагнитные наводки и оптическое излучение, кроме естественного теплового).

Пример 6.

Полупроводниковая структура монокристаллического карбида кремния для радиоизотопного источника энергии имеет следующую последовательность слоев:

- подложка кремния n-типа проводимости КЭФ-4,5 (100)-ориентации с толстым 0,5 мкм.слоем окисла кремния с нерабочей стороны;

- пленка карбида кремния по внутренней поверхности пор с последовательностью слоев образующими структуру с n-p переходом, причем n-слой пленки выходит на поверхность с легирующей посторонней примесью фосфора и углерода-14 соответственно с концентрациями  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , соотношение атомов углерода-14 к атомам углерода-12 в пленке карбида кремния составляет один атом на 10 атомов.

Взаимосвязи компонентов в слоях гетероструктуры p-n-SiC/p-SiC/p-Si/n-Si/SiCh проявляются в том, что легирующая примесь атомарного углерода-14, входящая в молекулу карбида кремния ( $\text{Si}^{14}\text{C}$ ) полупроводниковой структуры излучает бета-электроны с энергией достаточной для генерации вторичных электронно-дырочных пар носителей в области p-n перехода p-n-SiC\*/p-SiC, последние разделяются электростатическим внутренним полем перехода. Толстый слой  $\text{SiO}_2$  с нерабочей стороны имеет предназначение исключить диффузию углерода-14 в кремний и образование карбида кремния с нерабочей стороны. Структура с развитой площадью поверхности при тех же геометрических объемных размерах повышает удельную активность радиоизотопа и одновременно является эффективным стоком наведенных излучением структурных дефектов, что увеличивает радиационную пассивность и не нарушает функциональных свойств по разделению вторичных электронно-дырочных пар.

Свойства структуры вещества проявляются зондовыми измерениями структуры приготовленной в планарном исполнении. При планарном исполнении измерительные зонды устанавливаются на n- карбид кремния и вскрытую область окна до p-карбида кремния. Для чипов планарной структуры с геометрическими размерами рабочей стороны соответственно  $5 \times 10$  мм. Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода составляют в среднем соответственно 32 нА и 0,45 мВ (измерительный прибор В7-21А, измерительная приставка-камера исключает электромагнитные наводки и оптическое излучение, кроме естественного теплового).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Self-diffusion in alfa and beta silicon carbide. J.D. Hong, M.N. Hon, R.F. Davis // *Strammurgia international*. Vol. 5, n. 4, 1979. С. 155-160.

2. Бланк В.Д., Бурмашев В.С., Голованов А.В. Способ изготовления полупроводникового преобразователя энергии ионизирующего излучения в электроэнергию. Патент РФ №2668229, патентообладатель ФГБНУ «Технический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов».

3. Патент US №9728292 В2, МПК G21Н 1/06, H01L 21/04, H01L 29/868, H01L 29/167, H01L 29/66, H01L 29/36, H01L 29/861, H01L 29/16, H01L 21/02, дата приоритета 2011.10.09.

4. Патент CN №101320601 В, МПК G21Н1/00, 21Н 1/06, H01L 29/47, дата приоритета 2008.06.18.

5. Задде В.В., Пустовалов А.А., Пустовалов С.А., Цветков Л.А., Цветков С.Л. Полупроводниковый преобразователь бета-излучения в электроэнергию, патент RU №2452060 С2, H01L 31/04, G01Н 01/00 Опубликовано: 27.05.2012, бюл. №15.

6. M.V.S. Chandrashekhara, Christopher I. Thomas. Demonstration of a 4H SiC Betavoltaic Cell // *Materials science forum* vols. 527-529 (2006) pp.1351-1354.

7.  $^{14}\text{C}$  бета-преобразователь. Гурская А.В., Долгополов М.В., Чепурнов В.И. // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2017. Т. 48. Вып. 6. С. 901-909.

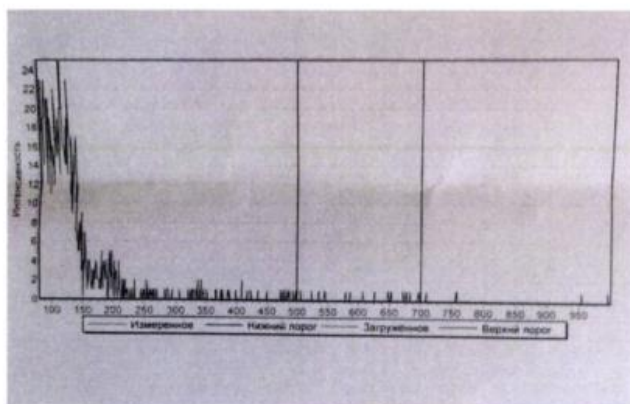
#### Формула изобретения

1. Карбид кремния: материал для радиоизотопного источника энергии, содержащий в своем составе монокристаллическую фазу полупроводниковой структуры карбида

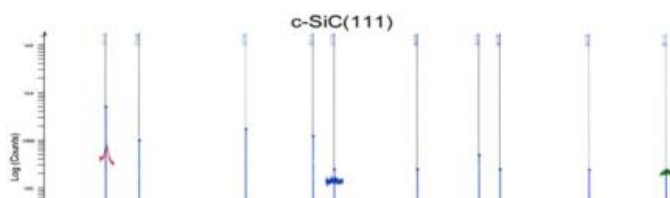
кремния в виде пленки, имеющей n- и p-тип проводимости для разделения электронно-дырочных пар, включающий в молекулярной структуре карбида кремния элементы: изотоп углерода  $C^{12}$  и дополнительно  $C^{14}$  для преобразования его энергии излучения в электрическую энергию, отличающийся тем, что концентрация радиоизотопа  $C^{14}$  в одном из слоев n- или p-типа проводимости составляет от  $5 \cdot 10^{17}$  до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

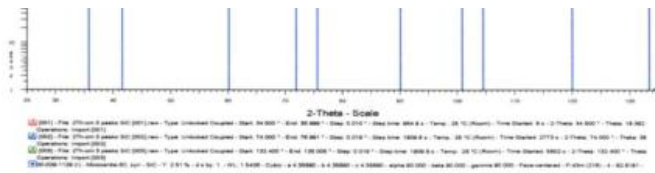
2. Карбид кремния по п. 1, отличающийся тем, что слой карбида кремния n- или p-типа проводимости сформирован на поверхности подложки монокристаллического кремния.

3. Карбид кремния п. 1 или 2, отличающийся тем, что слой карбида кремния с  $C^{14}$  n- или p-типа проводимости имеет пористую морфологию поверхности.

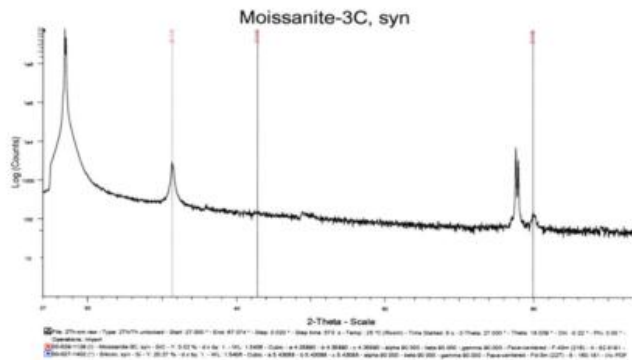


Фиг.1 Активность бета-электронов гетероструктуры энергопреобразователя размером 10 x 10 мм., легированной радиоизотопом углерода-14 в концентрации  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

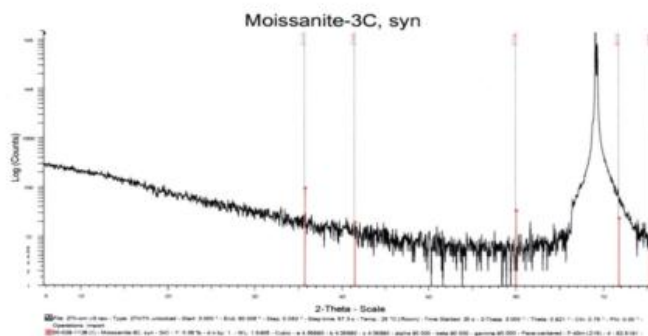




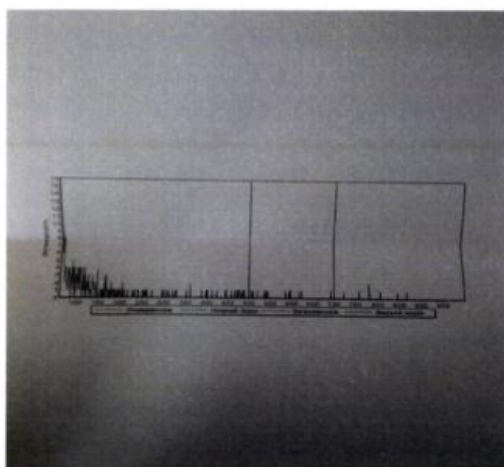
Фиг.2 Фрагменты дифрактограмм с отражениями SiC (111), (222), (333).



Фиг.3 Дифрактограмма структуры энергопреобразователя  $\text{roq-SiC/Si(111)}$



Фиг.4 Дифрактограмма структуры энергопреобразователя  $\text{roq-SiC/Si(001)}$ . Красные штрих-линии табличных значений угловых положений рефлексов кубической сингонии SiC



Фиг.5 Активность бета-электронов гетероструктуры энергопреобразователя размером 10 x 10 мм. легированной радиоизотопом углерода-14 в концентрации  $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .