

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 714 783** ⁽¹³⁾ **C2**

(51) МПК
H01L 21/205 (2006.01)
C23C 16/32 (2006.01)
(52) СПК
H01L 21/205 (2019.08)
C23C 16/32 (2019.08)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 03.12.2021)
Пошлина: учтена за 4 год с 30.05.2022 по 29.05.2023. Установленный срок для уплаты пошлины за 5 год: с 30.05.2022 по 29.05.2023. При уплате пошлины за 5 год в дополнительный 6-месячный срок с 30.05.2023 по 29.11.2023 размер пошлины увеличивается на 50%.

(21)(22) Заявка: **2019116727**, 29.05.2019(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.05.2019Дата регистрации:
19.02.2020Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 29.05.2019(43) Дата публикации заявки: 09.07.2019 Бюл. №
19(45) Опубликовано: **19.02.2020** Бюл. № **5**(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: **RU 2653398 C2, 08.05.2018. RU**
2286616 C2, 27.10.2006. RU 2452060 C2,
27.05.2012. RU 2461915 C1, 20.09.2012. US
2014/0225472 A1, 14.08.2014.Адрес для переписки:
443001, Самарская обл., г. Самара, ул.
Ульяновская, 52/55, этаж 16, комната 28,
территория офиса ООО "Открытый код",
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) СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РАДИОХИМИЧЕСКОГО РАСПАДА C-14 В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области микроэлектронной технологии, а именно к способу формирования полупроводниковых структур для преобразования энергии радиохимического распада C-14 в постоянный ток. Техническое решение включает CVD-процесс, в котором формирование пленки карбида кремния осуществляют с участием атомов кристаллической решетки кремниевой подложки и атомов углерода, для этого создают условия химического переноса водородом углерода через стадию образования углеводородов в контейнере-реакторе с температурой зоны 1000-1200°C и последующее их разложение на поверхности подложек кремния в более высокотемпературной зоне 1360-1380°C по ходу движения водорода расходом 0,3-0,5 л/мин, в процессе роста фазы карбида кремния на кремниевой подложке перед ней

движется сетка дислокаций несоответствия параметров решетки, последующий термический отжиг гетероструктуры производят в вакууме при температуре от 1000 до 1100°C в течение соответственно от 60 до 30 минут, что обеспечивает эффект локализации или геттерирующего захвата сверхстехиометрического и растворенного атомарного С-14 на сетке дислокаций в фазе кремния, физическое взаимодействие бета-электронов высокой энергии с фазой кремния порождает дополнительные вторичные электроны, это приводит к градиентному диффузионному потоку электронов в фазе кремния, жертвенный карбидокремниевый слой выполнил свою роль и его удаляют частично или полностью для формирования контактных площадок к кремнию, а в других вариантах исполнения и к карбиду кремния, при этом пленка карбида кремния может быть изотипной с подложкой кремния как р-, так и п-типа проводимости, окисленной с нерабочей стороны. Способ упрощает технологию формирования структуры энергопреобразователя, сохраняя эффективность использования радиоизотопа в минимальном количестве. 2 з.п. ф-лы, 1 ил.

Изобретение относится к области микроэлектронной технологии, а именно к способу формирования полупроводниковых структур для преобразования энергии радиохимического распада С-14 в электрическую.

Известны способы прямого преобразования энергии радиохимического распада полупроводниковыми структурами с р-п переходами. В известных способах используется энергия бета-электронов для генерации неравновесных носителей (электронов и дырок) в области объемного пространственного заряда р-п перехода, разделения их собственным внутренним полем (полевой эффект). В технических решениях, принятых за аналоги и прототип, отмечены факторы, влияющие на эффективность энергопреобразования, например, вид радионуклида, площадь излучающей поверхности, вид и тип полупроводника. Прямое преобразование энергии ядерного радиохимического превращения по бета-каналу распада в электрическую энергию осуществляют с использованием изотопов с приемлемым периодом полураспада: ^3H , ^{63}Ni , ^{147}Pm , ^{14}C и полупроводников с р-п-переходом: Si, GaAs, $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$, SiC, GaN, Si-аморфный гидрогенизованный, алмазные пленки. Кроме того, для увеличения площади контакта радионуклидов с полупроводниковой диодной структурой применяют микроэлектронные технологии для профилирования структур, изготовления сквозных каналов. Наиболее близкими аналогами и прототипом являются нижеприведенные изобретения, с общими для них недостатками - это сложность технологического способа формирования структур энергопреобразователей:

Айзенштат Г.И., Прокопьев Д.Г., Ядерная батарейка патент H01L 31/04, RU№ 2461915, C1, Опубликовано: 20.09.2012 Бюл. №26;

Guo H. Zhang K., Zhang Yu, Han Ch., Shi Ya. I-layer vanadium-doped pin type nuclear battery and the preparation process thereof. USA Patent US 20140225472 A1. Pub.date: 14.08.2014;

Акульшин Ю.Д., Лурье М.С., Пятышев Е.Н., Глуховской А.В., Казакин А.В. Бета-вольтаический МЭМС-преобразователь энергии. St. Petersburg State Polytechnical University Journal 5 (205) 2014 Computer Science. Telecommunications and Control Systems. P.35-42).

Задде В.В., Пустовалов А.А., Пустовалов С.А., Цветков Л.А., Цветков С.Л. Полупроводниковый преобразователь бета-излучения в электроэнергию, патент RU№2452060 C2, H01L 31/04, G01H 01/00 Опубликовано: 27.05.2012, бюл. №15) в котором использована пластина полупроводника с текстурированной поверхностью и со сквозными каналами. Стенки каналов имеют диодную структуру по образующей к стенкам каналов, стенки каналов и поверхность покрывают радиоактивным веществом, содержащим ^3H или ^{63}Ni . Шаг каналов в сотовой структуре и диаметр канала соизмерим и составляет 100мкм. Недостатком технического решения является технологически неэффективное использование дорогостоящего изотопа Ni-63, вследствие явления самопоглощения в пределах трековой области объема самого изотопа, кроме того, в данном техническом решении использована структура с недостаточно развитой поверхностью контакта изотоп - полупроводник.

Магобетбеков Э.П., Меркушкин А. О., и др. Компактный бетавольтаический источник тока длительного пользования с бета-эмиттером на базе радиоизотопа ^{63}Ni и способ его получения. Патент RU №2641100 С1, МПК H01L 29/66, G01H 1/02, опубликовано 16.01.2018 Бюл. № 2. Способ представлен последовательностью технологических операций изготовления структур и сборки элементов конструкции. Недостатком технического решения является неэффективность преобразования энергии радиохимического распада связанного с выбором способа сопряжения источника излучения с полупроводниковым преобразователем энергии, т.к. генерация неравновесных носителей ограничена площадью контакта ^{63}Ni , несмотря на использование текстурированной поверхности полупроводниковой структуры.

Наиболее близким техническим решением к предлагаемому способу является патент (RU №2653398 С2, H01L 21/205, C23C16/32, C23C16/32. Опубликовано: 08.05.2018, бюл. №13) - это способ получения полупроводниковой гетероструктуры карбида кремния на кремниевой подложке, включающий формирование слоя карбида кремния при участии поверхностных атомов кристаллической решетки кремниевой подложки и атомов углерода, процесс включает стадии: химический транспорт углерода посредством потока водорода расходом 0,3-0,5 л/мин. в молекулярной форме углеводородов образующихся при температуре 1000-1200°C, перенос углеводородов по кассетам реактора для последующей реакции углеводородов с атомами кристаллической решетки кремниевой подложки в зону протекания второй стадии процесса формирования фазы карбида кремния при температуре 1340-1360°C (диапазон температур предупреждает обеднение газовой смеси углеводородами по направлению газового потока); р-п-переход формируют посредством легирования атомами посторонней примеси предшествующего слоя карбида кремния, способ характеризуется тем, что углерод переносят в молекулярной форме соединения углеводорода содержащего изотоп углерода-14 одновременно с подачей легирующей примеси при формировании карбидокремниевой фазы. Радиоизотоп в структуре карбида кремния, испуская бета-электроны, возбуждает неравновесные носители в области р-п перехода и внутреннее электрическое поле области пространственного заряда, разделяет электроны и дырки, которые по внешней цепи создают постоянный электрический ток по времени соизмеримый с периодом полураспада. Недостаток данного технического решения заключается в том, что в гетероструктуре необходимо формировать поры для увеличения площади излучающей поверхности, на поверхности пор формируют р-п переход путем легирования посторонними примесями, в технологическом исполнении формирование структуры многостадийное и сложное.

Технический результат предполагаемого изобретения заключается в упрощении технологии изготовления энергопреобразователя без ухудшения функциональных возможностей радиоизотопа и эффективности по генерации постоянного тока.

Указанный технический эффект достигается тем, что в предполагаемом изобретении используют иной физический механизм генерации, а именно, создают градиент концентрации носителей тока в структуре. В гетероструктуре карбида кремния на кремниевой подложке в процессе роста пленки карбида кремния при температуре 1360 - 1380°C формируется сетка дислокаций в матрице кремния, которая движется перед фронтом роста карбидокремниевой фазы. Сетка дислокаций выполняет две роли:

во-первых, выполняет роль буферного слоя, релаксируя механические напряжения несоответствия параметров решетки подложки кремния и пленки карбида кремния содержащего С-14, последний, имея больший атомный радиус, изменяет параметр решетки элементарной решетки карбида кремния в сторону увеличения, тем самым способствует уменьшению механических напряжений несоответствия в области сопряжения фаз и, во-вторых, при своем движении, связанном с ростом толщины пленки карбида кремния, сетка дислокаций локализованная по плоскости сопряжения фаз выполняет роль скрытого геттера или центра захвата точечных дефектов (собственных и посторонних примесей), включая радиоизотоп С-14. Последующий термический отжиг гетероструктуры при температуре 1000 - 1050°C приводит к гомогенизации распределения радиоизотопа в фазе карбида кремния и эффекту окончательной локализации на центрах стока адсорбированных атомов С-14. Энергии

бета-электронов радиоизотопа достаточно для генерации неравновесных носителей в области сопряжения примыкающей к сетке дислокаций. Избыточная концентрация электронов диффундирует в направлении их пониженной концентрации в Si-подложке, защищенной с противоположной стороны окисным слоем, предупреждающим рост пленки карбида кремния с C-14. Направленное движение носителей в градиенте его концентрации и есть диффузионный постоянный ток. В данном техническом решении металлизацию контактных площадок для съема электрических зарядов выполняют известными способами к области кремния на границе геттерного слоя и к тыльной стороне подложки противоположной геттерирующему слою. Эффект, в некоторой степени, аналогичен термо-ЭДС, который наблюдается в однородных полупроводниках.

Изобретение иллюстрируется фиг. 1.

Способ формирования полупроводниковых структур для преобразования энергии радиохимического распада в электрическую реализуется в примерах его конкретного исполнения.

Пример 1. Выращивание пленки карбида кремния осуществляют, используя технологическую установку CVD-эпитаксии. В испаритель-барботер газового блока загружают органическое соединение гидрохлорид анилина, включающего в свою молекулу радиоизотоп C-14. Подложки монокристаллического кремния КЭФ-20 (110), окисленные с нерабочей стороны устанавливают в «секции-кассеты» контейнера. Секции с установленными подложками соединяют друг с другом таким образом, чтобы они сообщались по газовому потоку, омывающему подложки. На сочлененные секции (образующие контейнер) устанавливают тепловые экраны только на области расположения секций с подложками кремния, что обеспечивает необходимый градиент температуры по ходу движения газа-носителя. Крайняя секция контейнера для загрузки углеродом с целью генерации углеводородов, не оснащена тепловым экраном. Оснастка и контейнер выполнены из графита и футерованы поликристаллическим карбидом кремния. Контейнер устанавливают в реактор проточного типа, работающий при атмосферном давлении. Далее следуют типовые технологические операции в следующей последовательности: продувка аргоном, продувка водородом диффузионной очистки, затем включают ВЧ-нагрев водоохлаждаемого кварцевого реактора. Температуру поднимают ступенчато, чтобы обеспечить удаление неконтролируемых посторонних газов из реактора и из контейнера, затем повышают температуру для финишного травления подложек в парах четыреххлористого углерода в потоке водорода из отдельного испарителя. По завершении травления твердофазное превращение поверхности кремния в карбид кремния со скоростью от 0,8 до 1,5 мкм/час осуществляют при температуре 1360°C в потоке водорода 0,3 л/мин. через испаритель с радиоизотопным соединением, при этом температура крайней не заэкранированной тепловыми экранами секции-кассеты вследствие теплового рассеяния излучением и конвекцией устанавливается 1100°C, что обеспечивает генерацию углеводородов по обратимой реакции водорода с углеродом в крайней «секции-кассете» контейнера. Углеводородные газы (с парами гидрохлорида анилина, содержащего радиоизотоп C-14), газом-носителем водородом переносятся в последовательно сообщаемые кассеты с подложками.

Термодинамическое равновесие реакции углерода с водородом при температуре 1360°C смещается в сторону распада углеводородов с выделением углерода C-12 и C-14 на поверхности подложек. Кремний и углерод при этой температуре вместе не сосуществуют (согласно диаграмме состояний «состав-свойство») и образуют новую фазу карбида кремния. Далее фазовое преобразование поверхности подложки кремния протекает по диффузионному механизму, процесс прекращают по достижении требуемой толщины пленки карбида кремния на подложке кремния, включая сформированный гетеропереход SiC/Si. Сетка дислокаций несоответствия при движении перед фронтом роста карбидокремниевой фазы выполнила функцию геттерирования радиоизотопа, сконцентрировав его в кремнии в области гетероперехода. Скорость роста пленки карбида кремния от 0,8 до 1,5 микрон в течение часа. Температуру снижают по окончании процесса со скоростью 100°C в минуту до 1000°C и ВЧ-нагрев выключают, далее следуют стандартные операции: продувка аргоном и извлечение изотипных гетероструктур из контейнера.

Последующий термический отжиг гетероструктуры выполняют в вакууме при температуре 1050°C в течении 40 минут. Затем следуют стандартные технологические операции полупроводниковой микроэлектроники по удалению пленки карбида кремния выполняющую роль жертвенного слоя и защитного окисла с подложки кремния для формирования металлизации контактных площадок к градиентной структуре кремния по C-14. Излучение бета-электронов радиоизотопом C-14 генерирует дополнительную концентрацию неравновесных носителей в области гетероперехода, градиент концентрации электронов вызывает направленный диффузионный ток по толщине подложки кремния в области между контактными площадками.

После скрайбирования структур с градиентной концентрацией электронов чипы без металлизации размером 1,5×1,5 мм. и 10×10 мм. подвергнуты послеоперационным измерениям на измерительной ячейке с прижимными зондовыми контактами стенда электрофизических измерений, исключаящим электромагнитные посторонние наводки и электромагнитное излучение, кроме теплового отвечающего комнатной температуре. Структуры генерируют постоянный ток короткого замыкания от 2.7 до 5.0 нА и напряжение холостого хода от 0.4 до 4.6 мВ, при активности исходного радиоизотопа, загруженного в барботер-испаритель 20 мкКи.

Пример 2. Выращивание пленки карбида кремния осуществляют, используя технологическую установку CVD-эпитаксии. В испаритель-барботер для легирования пленок карбида кремния загружают соединение четыреххлористый углерод, включающий в свою молекулу радиоизотоп C-14. Подложки монокристаллического кремния КСД-5 (111), окисленные с нерабочей стороны, устанавливают в секции контейнера. Секции-кассеты с подложками соединяют друг с другом таким образом, чтобы они сообщались по газовому потоку, омывающему подложки. На сочлененные секции (образующие контейнер) устанавливают тепловые экраны только на области расположения секций с подложками кремния, что обеспечивает необходимый градиент температуры по ходу движения газа-носителя. Крайняя секция контейнера выполнена из графита, она не оснащена тепловым экраном. Оснастка и контейнер изготовлены из графита и футерованы поликристаллическим карбидом кремния. Контейнер устанавливают в реактор проточного типа, работающий при атмосферном давлении. Далее следуют типовые технологические операции в следующей последовательности: продувка аргоном, продувка водородом диффузионной очистки, затем включают ВЧ-нагрев водоохлаждаемого кварцевого реактора. Температуру поднимают ступенчато, чтобы обеспечить удаление неконтролируемых посторонних газов из реактора и из контейнера, затем повышают температуру для финишного травления подложек при температуре в диапазоне от 1000 до 1100°C в парах четыреххлористого углерода из отдельного испарителя без радиоизотопа в потоке водорода 0,3 л/мин. По завершении травления твердофазное превращение кремния в карбид кремния осуществляют при температуре в диапазоне от 1360 до 1380°C в потоке водорода 3 л/мин через испаритель-барботер с четыреххлористым углеродом в молекуле которого содержится радиоизотоп C-14, температуру испарителя-барботера поддерживают в диапазоне 40-60°C. Термодинамическое равновесие реакции в системе (C-Cl-H) над подложками кремния смещается в сторону восстановления четыреххлористого углерода в потоке водорода с выделением углерода C-14 на поверхности подложек. Кремний и углерод при этой температуре вместе не сосуществуют и образуют новую фазу карбида кремния. Далее фазовое преобразование протекает по диффузионному механизму, которое прекращают по достижении требуемой толщины пленки карбида кремния на подложке кремния, включая формирование гетероперехода SiC/Si. Сетка дислокаций несоответствия при движении перед фронтом роста карбидокремниевой фазы выполнила функцию геттерирования радиоизотопа, сконцентрировав его в кремнии в области гетероперехода. В рассматриваемом варианте по окончании ростового процесса водород направляют минуя барботеры, температуру контейнера снижают со скоростью 100°C в минуту до 1000°C и ВЧ-нагрев выключают, далее следуют стандартные операции: продувка аргоном и извлечение гетероструктур из контейнера. Полученные гетероструктуры изотипной проводимости, наследуют ориентацию исходных подложек кремния, скорость их формирования от 1,5 до 2,5 микрона в

течение часа Последующий термический отжиг гетероструктуры выполняют в вакууме при температуре 1000°C в течении 60 минут. Затем следуют стандартные технологические операции полупроводниковой микроэлектроники по удалению пленки карбида кремния выполняющую роль жертвенного слоя и удалению защитного окисла с подложки кремния для формирования металлизации контактных площадок к градиентной структуре. Излучение бета-электронов радиоизотопа генерирует дополнительную концентрацию неравновесных носителей в области гетероперехода, градиент концентрации электронов вызывает направленный диффузионный ток по толщине подложки кремния между контактными площадками. После скрайбирования структур с градиентной концентрацией электронов чипы без металлизации размером 1,5×1,5 мм. и 10×10 мм. подвергнуты послеоперационным измерениям в ячейке с зондовыми прижимными контактами измерительного стенда, исключаящем электромагнитные посторонние наводки и электромагнитное излучение, кроме теплового отвечающего комнатной температуре. Структуры генерируют постоянный ток короткого от 2.6 до 7.4 нА и напряжение холостого хода от 1.5 до 5.0 мВ, при активности исходного радиоизотопа, загруженного в барботер-испаритель 20 мкКи.

Пример 3. Выращивание пленки карбида кремния осуществляют, используя технологическую установку CVD-эпитаксии. В качестве углерода для химического транспорта используют изотоп углерода с массовым числом 14, его загружают в крайнюю кассету контейнера (без теплового экрана с рабочей температурой, поддерживаемой в диапазоне от 1000 до 1200°C). Подложки монокристаллического кремния КЭФ-32 (100), окисленные с нерабочей стороны, устанавливают в последующие кассеты контейнера. Кассеты с установленными подложками соединяют друг с другом таким образом, чтобы они сообщались по газовому потоку, омывающему подложки. На сочлененные секции (образующие контейнер) устанавливают тепловые экраны только в области расположения кассет с подложками кремния, что обеспечивает необходимый градиент температуры по ходу движения газа-носителя. Крайняя кассета контейнера не оснащена тепловым экраном. Оснастка и контейнер изготовлены из графита и футерованы поликристаллическим карбидом кремния. Контейнер устанавливают в реактор проточного типа, работающий при атмосферном давлении. Далее следуют типовые технологические операции в следующей последовательности: продувка аргоном, продувка водородом диффузионной очистки, затем включают ВЧ-нагрев водоохлаждаемого кварцевого реактора. Температуру поднимают ступенчато, чтобы обеспечить удаление неконтролируемых посторонних газов из реактора и из контейнера, затем повышают температуру для финишного травления подложек при температуре в диапазоне от 1000 до 1100°C в парах четыреххлористого углерода из испарителя в потоке водорода 0,3 л/мин. По завершении травления твердофазное превращение кремния в карбид кремния осуществляют при температуре в диапазоне от 1360 до 1380°C в потоке водорода 3 л/мин. Химический транспорт углерода C-12 и C-14 осуществляют посредством обратимой реакции водорода с углеродом из зоны контейнера с температурой 1100- 1200°C в виде углеводородов, которые переносятся в зону контейнера с температурой в диапазоне от 1360 до 1380°C, при которых углеводороды по обратно смещенной реакции разлагаются с выделением углерода C-12 и C-14 на поверхности подложек. Кремний и углерод при этой температуре вместе не сосуществуют и образуют на поверхности подложки кремния новую фазу карбида кремния. Далее фазовое преобразование протекает по диффузионному механизму, которое прекращают по достижении требуемой толщины пленки карбида кремния на подложке кремния, включая формирование гетероперехода SiC/Si. Сетка дислокаций несоответствия параметров решетки сопрягаемых фаз при движении перед фронтом роста карбидокремниевой фазы выполнила функцию геттерирования сверхстехиометрического и растворенного в структуре радиоизотопа, сконцентрировав его в кремнии в области гетероперехода. В рассматриваемом варианте по окончании ростового процесса температуру контейнера снижают со скоростью 100°C в минуту до 1000°C и ВЧ-нагрев выключают, далее следуют стандартные операции: продувка аргоном и извлечение гетероструктур из кассет контейнера. Полученные гетероструктуры изотипной проводимости, наследуют

ориентацию исходных подложек кремния, скорость их формирования от 1,5 до 2,5 микрона в течение часа. Последующий термический отжиг гетероструктуры выполняют в вакууме при температуре 1050°C в течении 40 минут. Затем следуют стандартные технологические операции полупроводниковой микроэлектроники по удалению пленки карбида кремния выполняющую роль жертвенного слоя и защитного окисла с подложки кремния для формирования металлизации контактных площадок к полученной градиентной по C-14 подложке кремния. Излучение бета-электронов радиоизотопа генерирует дополнительную концентрацию неравновесных носителей в области гетероперехода, градиент концентрации электронов вызывает направленный диффузионный ток по подложке кремния в направлении от геттерирующей границы к тыльной стороне.

После скрайбирования структур чипы без металлизации размером 1,5×1,5 и 10×10 мм. мм. подвергнуты послеоперационным измерениям в ячейке с зондовыми прижимными контактами измерительного стенда, исключаящем электромагнитные посторонние наводки и электромагнитное излучение, кроме теплового отвечающего комнатной температуре. Структуры генерируют постоянный ток короткого в диапазоне от 1.2 до 4.6 нА и напряжение холостого хода от 66 до 80.4 мВ, при активности исходного радиоизотопа 20 мКи.

Пример 4. Выращивание пленки карбида кремния осуществляют, используя технологическую установку CVD-эпитаксии. В качестве углерода для химического транспорта используют изотоп углерода с массовым числом 14, его загружают в крайнюю кассету контейнера (без теплового экрана с рабочей температурой, поддерживаемой в диапазоне от 1000 до 1200°C). Подложки монокристаллического кремния КДБ-4,5 (100), окисленные с нерабочей стороны, устанавливают в последующие сборки кассет контейнера. Кассеты с установленными подложками соединяют друг с другом в сборку таким образом, чтобы они сообщались по газовому потоку, омывающему подложки. На сочлененные секции (образующие контейнер) устанавливают тепловые экраны только на области расположения кассет с подложками кремния, что обеспечивает необходимый градиент температуры по ходу движения газа-носителя. Крайняя кассета не оснащена тепловым экраном. Оснастка и контейнер изготовлены из графита и покрыты поликристаллическим карбидом кремния. Контейнер устанавливают в реактор проточного типа, работающий при атмосферном давлении. Далее следуют типовые технологические операции в следующей последовательности: продувка аргоном, продувка водородом диффузионной очистки, затем включают ВЧ-нагрев водоохлаждаемого кварцевого реактора. Температуру поднимают ступенчато, чтобы обеспечить удаление неконтролируемых посторонних газов из реактора и из контейнера, затем повышают температуру для финишного травления подложек при температуре в диапазоне от 1000 до 1100°C в парах четыреххлористого углерода из испарителя в потоке водорода 0,3 л/мин. По завершении травления твердофазное превращение кремния в карбид кремния осуществляют при температуре в диапазоне от 1360 до 1380°C в потоке водорода 3 л/мин. Химический транспорт углерода C-12 и C-14 осуществляют посредством обратимой реакции водорода с углеродом из зоны контейнера с температурой 1100 - 1200°C в виде углеводородов, которые переносятся в зону контейнера с температурой в диапазоне от 1360 до 1380°C в которой углеводороды по обратнсмещенной реакции разлагаются с выделением углерода C-12 и C-14 на поверхности подложек. Кремний и углерод при этой температуре вместе не сосуществуют и образуют на поверхности подложки кремния новую фазу карбида кремния. Далее фазовое преобразование протекает по диффузионному механизму, которое прекращают по достижении требуемой толщины пленки карбида кремния на подложке кремния, включая формирование гетероперехода SiC/Si. Сетка дислокаций несоответствия параметров решетки сопрягаемых фаз при движении перед фронтом роста карбидокремниевой фазы выполнила функцию геттерирования радиоизотопа, сконцентрировав его в кремнии в области гетероперехода. В рассматриваемом варианте по окончании ростового процесса температуру контейнера снижают со скоростью 100°C в минуту до 1000°C и ВЧ-нагрев выключают, далее следуют стандартные операции: продувка аргоном и извлечение гетероструктур из кассет контейнера. Полученные гетероструктуры изотипной проводимости, наследуют

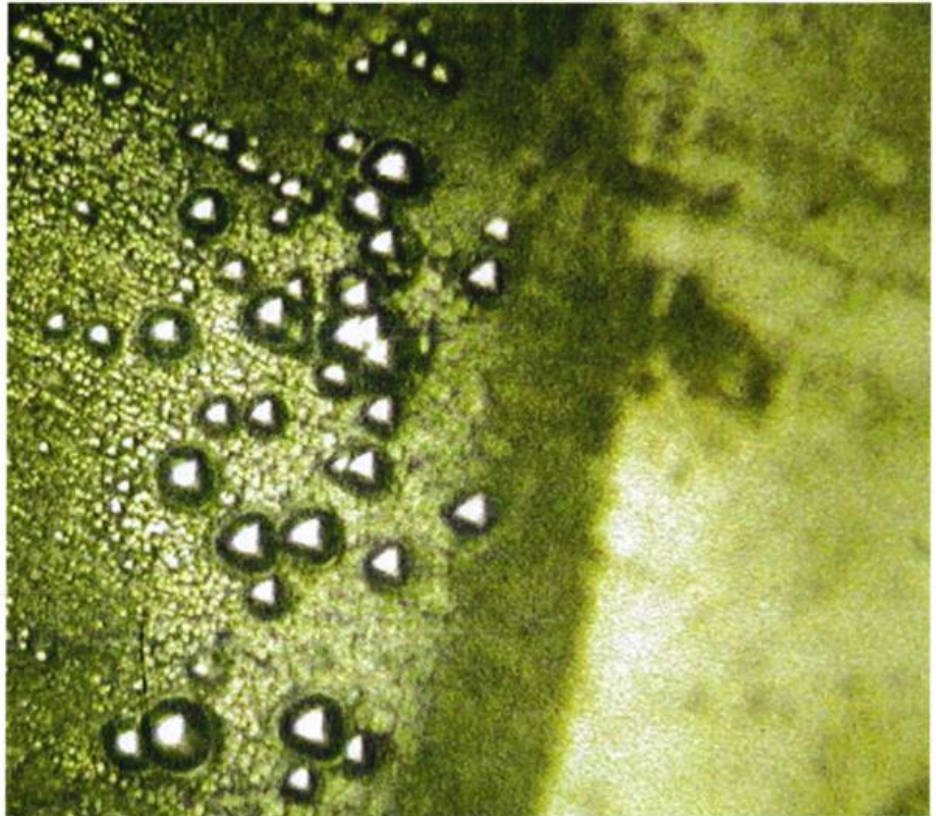
ориентацию исходных подложек кремния, скорость их формирования от 1,5 до 2,5 микрона в течение часа. Последующий термический отжиг гетероструктуры выполняют в вакууме при температуре 1100°C в течение 30 минут. Затем следуют стандартные технологические операции полупроводниковой микроэлектроники по частичному удалению изотипной пленки карбида кремния и полному удалению защитного окисла с тыльной стороны подложки кремния для формирования металлизации контактных площадок к полученной структуре. Излучение бета-электронов радиоизотопа генерирует неравновесные носители в области объемного заряда с внутренним полем гетероперехода, и дополнительно работает механизм градиентной концентрации электронов по подложке кремния. После скрайбирования структур с градиентной концентрацией электронов чипы без металлизации размером 10×10 мм подвергнуты послеоперационным измерениям в ячейке с зондовыми прижимными контактами к частично оставленной (50%) карбидокремниевой пленке и к вскрытым от жертвенного слоя карбида кремния кремниевых поверхностей (фронтальной и тыльной). Измерительный стенд выполнен в исполнении, исключающем электромагнитные посторонние наводки и электромагнитное излучение, кроме теплового диапазона, отвечающего комнатной температуре. Структуры генерируют постоянный ток короткого замыкания в диапазоне от 1.3 до 3.4 нА и напряжение холостого хода от 0.4 до 29 мВ, при активности загруженного исходного радиоизотопа 20 мкКи.

Формула изобретения

1. Способ формирования полупроводниковых структур для преобразования энергии радиохимического распада С-14 в электрическую, включающий формирование пленки карбида кремния с участием атомов кристаллической решетки кремниевой подложки и атомов углерода, при этом осуществляют химический перенос водородом углерода через стадию образования углеводородов в зоне реактора с температурой 1000-1200°C и их последующее разложение на поверхности подложек кремния в высокотемпературной зоне 1360°C по ходу движения водорода расходом 0,3-0,5 л/мин, альтернативой химического переноса углерода с массовым числом 14 является перенос водородом расходом 3-5 л/мин в зону подложек кремния органического соединения в соотношении от 1:4 до 1:10, содержащего в своем составе углерод-14, отличающийся тем, что пленка карбида кремния формируется в диапазоне температур от 1360 до 1380°C, при этом в процессе ее роста перед ней движется сетка дислокаций, последующий термический отжиг гетероструктуры производят в вакууме при температуре от 1000 до 1100°C в течение соответственно от 60 до 30 минут, что обеспечивает захват сверхстехиометрических и растворенных атомов С-14 на сетке дислокаций, выполняющей роль скрытого геттера в фазе кремния, взаимодействие бета-электронов с фазой кремния порождает вторичные электроны и тем самым создается градиентный диффузионный поток электронов со стороны жертвенного карбидокремниевое слоя и тыльной стороной подложки кремния, предварительно окисленной.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что жертвенный слой карбида кремния делают изотипным с подложкой кремния как р-, так и n-типа проводимости.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что жертвенный слой карбида кремния частично не удаляют, а изотипный гетеропереход карбида кремния на кремнии используют для целей дополнительной генерации электрического тока.



Фиг.1