

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 620.98, 620.92, 620.3
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.3.55-67

Дата поступления: 10.09.2019
Дата принятия: 17.09.2019

Экспериментальное исследование полупроводниковых структур источника питания на углероде-14

В.И. Чепурнов^{1,2}, Г.В. Пузырная^{1,2}, А.В. Гурская¹, М.В. Долгополов^{2,1}, Н.С. Анисимов¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34
² ООО «БетаВольтаика»
443001, Российская Федерация, г. Самара
ул. Ульяновская, 52/55

В статье представлены результаты исследования карбидокремниевых полупроводниковых (пористых) структур с включением углерода-14. По результатам экспериментальных измерений собраны данные о параметрах фотовольтаического преобразования энергии квантов света в фото-ЭДС для подтверждения эффективности работы р-п-перехода, проведена оценка эффективности введения углерода-14 в молекулу карбида кремния электрофизическими измерениями. В процессе работы использована технология твердофазного преобразования поверхности монокристаллической подложки кремния в фазу монокристаллического карбида кремния посредством химического транспорта углерода-14 в среде водорода.

Ключевые слова: микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах, бетавольтаика, бета-преобразователь, углерод-14, гетероструктура p-g-SiC/Si , эндотаксия, карбид кремния, р-п-переход, металлизация контактных площадок, твердофазная диффузия, твердофазные превращения, технология материалов.

Введение

В последнее время интерес появился в области исследования преобразования полупроводниковыми структурами, в особенности кремниевыми и на кремниевой основе [1–4], бета-излучения, так называемого бетавольтаического эффекта [5–7]. Предполагается, что механизм генерации зарядов схож с механизмом, реализованным в диодных солнечных элементах, то есть в области пространственного заряда предварительно созданного р-п-перехода происходит рождение и разделение электрон-дырочных пар. Создание приборов на основе бетавольтаического эффекта открывает новую область энергосберегающей электроники, которая будет широко развиваться в будущем с учетом общей тенденции миниатюризации оборудования приборов электронной техники, а также появления спроса на автономные источники бесперебойного питания для мест удаленного доступа, в частности для датчиков мониторинга состояния безопасности объектов и сооружений. Обзор текущего состояния проблемы имеется в работе [8], где говорится и о физических характеристиках бета-преобразователей. На сегодняшний день в данной области наиболее перспективными являются изотопы H-3, Ni-63, C-14, т. к. позволяют

создать бета-преобразователь, который сохраняет свои функциональные характеристики в диапазоне от нескольких лет до нескольких десятков лет и может конкурировать по времени эксплуатации с другими типами источников питания. Наиболее пригодными в бетавольтаике считаются структуры SiC, GaN, GaAs. Эти полупроводники обладают широкой запрещенной зоной и высокой температурой Дебая, что определяет стойкость материала к внешним воздействиям.

Объектом исследования данной работы является гетероструктура карбида кремния для прямого преобразования энергии радиохимического бета-распада C-14 в электрическую энергию, апробирование эффективной технологии введения углерода-14 в молекулу карбида кремния гетероструктуры $\text{n-p-g-SiC}^*/\text{p-SiC}/\text{p-Si}$ и $\text{n-SiC}^*/\text{p-SiC}/\text{p-Si}$. В работе использована технология твердофазного преобразования поверхности монокристаллической подложки кремния в фазу монокристаллического карбида кремния (эндотаксия) посредством химического транспорта углерода в среде водорода, разработанная В.И. Чепурновым [9]. Технология введения молекулы C-14 в структуру была разработана на основе предыдущей технологии и также защищена патентом в 2018 г. [10].

Исследования были поддержаны грантами Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программам «У.М.Н.И.К.» в 2015 г. (А.В.Г.) и «СТАРТ-НТИ» в 2018 г. (ООО «БетаВольтаика»).

1. Создание пористой гетероструктуры SiC с молекулами C-14

1.1. Твердофазная диффузия с бета-источником.

Для создания изотопного преобразователя используются гомо- и гетероструктуры SiC. Расчет оптимальной конструкции радиационно-стимулированного источника тока зависит от технологии изготовления полупроводниковых структур. Среди технологий известно, например, получение 3C-SiC методом CVD [11; 12], где в качестве газообразных веществ выступают SiH_4 , C_3H_8 , SiH_2Cl_2 . В перечисленных примерах пленка SiC эпитаксиально наращивается на поверхности Si. В отличие от предыдущей технологии, процесс эндотаксии [10] предполагает диффузионный механизм формирования 3C-SiC-фазы, поэтому в процессе расчета легирования используют диффузионные зависимости скорости легирования и роста, а не коэффициент распределения легирующей примеси между газовой и растущей фазой, как в случае эпитаксии. Таким образом, в методе эндотаксии осуществляют управляемое легирование гомогенной фазы 3C-SiC посредством перелегирования предыдущего слоя, получая несимметричный p-n-переход.

Ранее в работах [13–17] применительно к самодиффузии C-14 экспериментально было показано, что при легировании интенсивность диффузии увеличивается. В случае технологии формирования 3C-SiC диффузионным механизмом [10] движется сетка дислокаций несоответствия, которая формируется при температуре роста и располагается в кремниевой фазе. Теоретическое описание данного механизма представлено в работах [18–20].

1.2. Введение радионуклида в фазу *rog*-SiC.

Оригинальная идея решения вопросов развития технологии создания полупроводниковой структуры преобразователя энергии на основе SiC посредством формирования гетероструктур с C-14 в качестве топлива впервые была представлена в работе [21]. Технология предполагает использование пористого кремния. Пористый слой формируется травлением в растворе кислот $\text{HF} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1 : 1$, известными способами.

Кремниевые пластины марки КЭФ-5, КЭФ-20, КЭФ-32 предварительно были окислены в печи

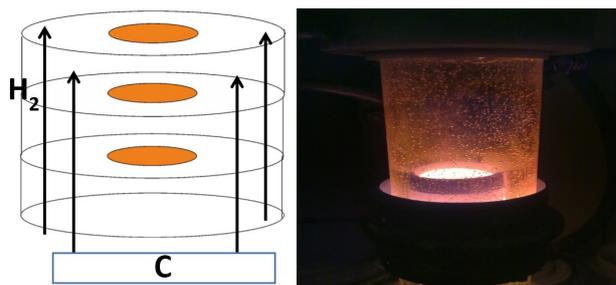


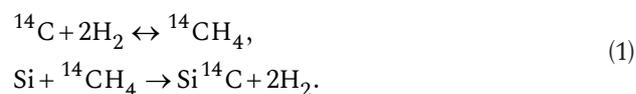
Рис. 1. Слева: схематическое представление химического транспорта (оранжевым обозначены опытные подложки кремния); справа: реактор CVD-эндотаксии семейства гетероструктур SiC/Si

СДО-125, затем на нерабочую сторону пластин наносился слой фоторезиста ФП-383 для формирования защитного окисла. С рабочей стороны слой окисла был стравлен во фтористоводородной кислоте.

Пластины поместили в реактор с ВЧ-нагревом и на них вырастили слой карбида кремния, легированный изотопом C-14. Время процесса 30 мин.

Радионуклид C-14 вводится в молекулу SiC частично вместо C-12 в фазу *rog*-SiC в гетероструктуре *rog*-SiC/SiC/Si в процессе эндотаксии. Концепция основана на твердофазной трансформации Si-фазы в SiC-фазу, что позволяет накопиться C-14 в *rog*-SiC фазе гетероструктуры [22]. Непористый слой p-типа контактирует с пористой SiC-фазой. Дно пор на самом деле не является пористым, т. е. p-n-переход формируется в основном по периферии внутренней поверхности пористого слоя.

Процесс эндотаксии осуществляется только лишь в потоке водорода (рис. 1). Пленка карбида кремния растет за счет преципитации углерода в градиенте концентрации (концентрация углерода в поверхностных слоях выше предела растворимости) и образования соединения с Si-фазой процесс протекает в две стадии:



Полученная структура была изучена на наличие пор на электронном микроскопе при напряжении в 30 кВ при различном разрешении (рис. 2, 3). Размер пор порядка 10÷50 нм.

На поверхности образцов возможно сформировать нанонити SiC (рис. 3) при определенных условиях эндотаксии. Наличие нанонитей дает возможность в дальнейшем использования их в конструкции батарейки в качестве токовыводов. Это значительно упростит конструкцию элемента питания, аналоги которого имеют систему кантилеверов для снятия заряда. На этапе формирования пленки было проведено легирование образцов фосфором и галлием. Таким образом,

в структурах создают р-n-переход [23]. На рис. 4 приведено распределение углерода, акцепторной и донорной примеси по глубине структуры на подложках n-(KEF_C, KEF_Ga, KEF_P) и p-(KDB_B, KDB_C, KDB_Ga, KDB_P) типа проводимости. Линия KDB_P и KDB_Ga в точке А на глубине 2.5 мкм, и/или линии KDB_P и KDB_B в точке В на глубине 7.5 мкм.

Опытные образцы структур бета-преобразователя представляют собой пластины карбида кремния на подложке кремния р-р-SiC/Si. Полученный мезо- и нанопористый слой n-типа проводимости бета-активен, большая площадь поверхности обеспечивает большую плотность потока излучения для преобразования неравновесных носителей в области объемного пространственного заряда гомо р-n-перехода в фазе карбида кремния гетероструктуры SiC/Si в электроэнергию (ЭДС радиохимического превращения углерода-14 в азот, связанный валентной связью с атомом кремния). Общая толщина карбидокремниевой фазы 4.5 мкм (KDB_C и KEF_P).

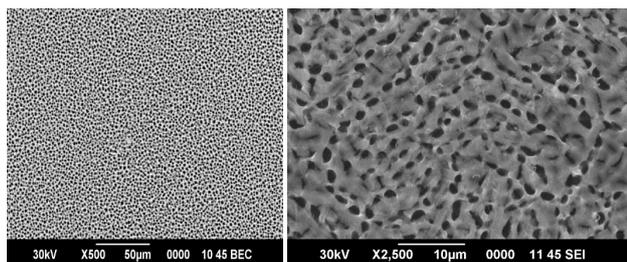


Рис. 2. Изображение пористой гетероструктуры SiC/Si

С образцов, имеющих структуру Me/n-SiC/p-SiC/p-Si (рК – 60 мин, nK*–9 мин), была стравлена металлизация, а также измерены параметры структуры n-SiC/p-SiC/p-Si и p-Si/p-SiC/n-SiC. Измерялась вертикальная структура. Кроме того были зафиксированы параметры образца с планарной структурой и вертикальной структурой.

2. Формирование контактных площадок к n- и р-областям SiC

2.1. Контакт металл–полупроводник. Когда металл и полупроводник приводят в контакт, существует два типа переходов, сформированные в зависимости от работы выхода полупроводника и его связи с металлом:

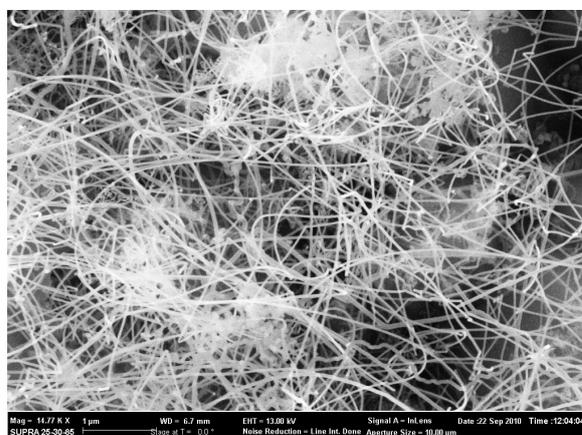


Рис. 3. Нанонити карбида кремния на поверхности пористой структуры SiC/Si

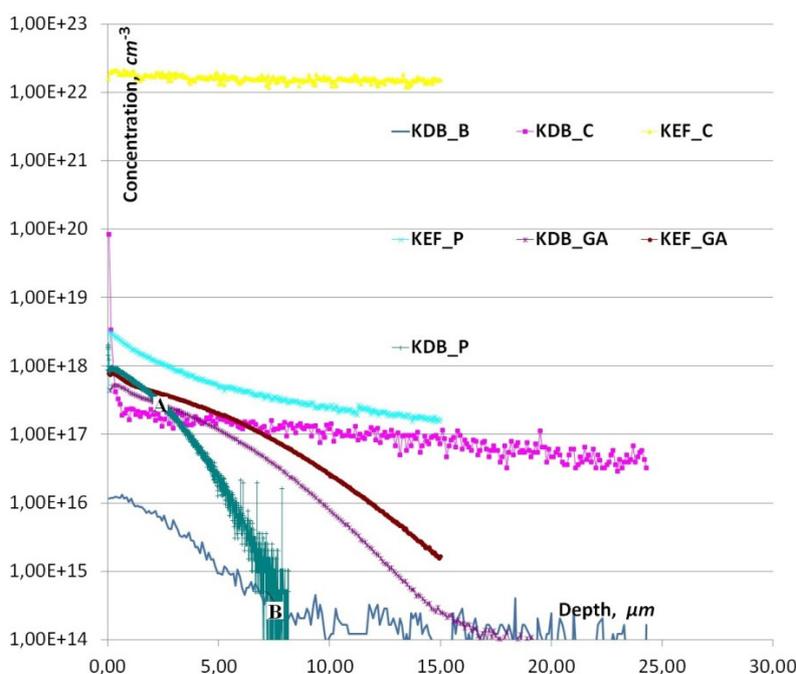


Рис. 4. Диаграмма зависимостей концентраций на глубине. Анализируют глубину в диапазоне от 5.3×10^{-8} до 24.3×10^{-6} м. Концентрация C-12 атомов (KDB_C кривая) в зависимости от анализируемого глубины находится в диапазоне от 8.4×10^{19} до 3.2×10^{16} [24]

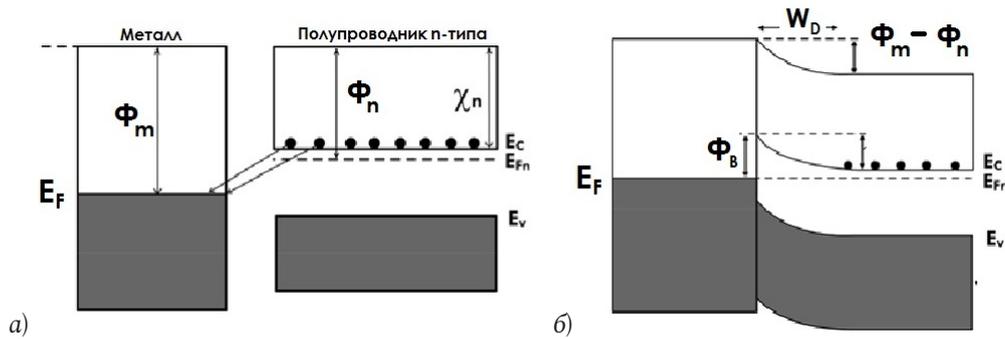


Рис. 5. а) Шоттки соединение между металлом и n-типа полупроводником перед контактом. Работа выхода в полупроводнике меньше металла, так что электроны могут переходить из полупроводника в металл, образуя контактный потенциал; б) Барьер Шоттки, показывающий диапазон изгиба на полупроводниковой стороне. Полупроводниковые полосы сгибаются до перехода от полупроводника (положительного) к металлу (отрицательной), так как это одно и то же направление, как у электрического поля

1. Шотки – $\Phi_m > \Phi_{пол}$.
2. Омическое – $\Phi_m < \Phi_{пол}$.

Рассмотрим переход, образованный между металлом и n-типа полупроводником, как показано на рис. 5 [25]. Уровень Ферми полупроводника выше, чем у металла. Подобно металл-металл-переходу, когда образуется переход металл-полупроводник, уровни Ферми должны выстраиваться в равновесии. Иначе можно понимать, что электроны в зоне проводимости полупроводника могут перемещаться в пустых энергетических состояниях выше уровня Ферми металла. Это оставит положительный заряд на полупроводниковой стороне, и из-за избыточных электронов – отрицательный заряд на металлической стороне.

Когда контакт образован между двумя металлами, заряды находятся на поверхности. Это происходит из-за высокой плотности электронов в металлах (обычно 10^{22} см^{-3}). Однако когда контакт образуется между металлом и полупроводником, то из-за низкой плотности заряда на полупроводниковой стороне (как правило, 10^{17} см^{-3}) электроны удаляются не только с поверхности, но и из определенной глубины внутри полупроводника. Это приводит к тому, что происходит формирование области обеднения внутри полупроводника.

Таким образом, когда барьер Шоттки сформирован между металлом и полупроводником, линии уровня Ферми в полупроводнике поднимаются вверх, а также положительный потенциал формируется на полупроводниковой стороне. Поскольку область истощения проходит внутри определенной глубины, то в полупроводнике есть изгиб энергетических зон на полупроводниковой стороне. Полосы изгибаются в направлении электрического поля (поле направлено от положительного заряда к отрицательному заряду). Это

означает, что энергетические зоны согнуты вверх, идущие из n-типа полупроводника к металлу, как показано на рис. 5, б. Уровни Ферми выстраиваются, и существует некоторая область в полупроводнике (обозначается W_D), где полосы изгиба – это обедненная область). Другое название обедненной области – слой пространственного заряда.

Так получается потенциал Шоттки, V_0 , и из рис. 5, б это соответствует разности функций работ выхода:

$$V_0 = \Phi_m - \Phi_{пол}. \quad (2)$$

Работа выхода металла является постоянной, а функция работы выхода полупроводника зависит от концентрации легирующей примеси. Контактный потенциал представляет собой барьер для электронов, чтобы перейти от n-типа полупроводника к металлу. Первоначально, когда барьер формируется, электроны движутся к металлу, чтобы создать обедненную область. Контактный потенциал таким образом предотвращает в дальнейшем движение электронов в металл. Поэтому так и проявляется барьер для электронов, при переходе от металла к полупроводнику. Это называется барьер Шоттки и обозначается Φ_B на рис. 5. Это дается формулой

$$\Phi_B = (\Phi_m - \Phi_n) + (E_c - E_{F_n}) = \Phi_m - \chi_n, \quad (3)$$

где χ_n соответствует глубине уровня для электрона из n-типа полупроводника (отмечено на рис. 5, а). При равновесии движение электронов из полупроводника с металлом уравнивается контактным потенциалом так, что нет результирующего тока. Потенциал Шоттки возможно компенсировать путем применения внешнего потенциала для случая снятия заряда, а не прохождения тока через полупроводник.

Омический переход-контакт. Шоттки-переход образуется, когда полупроводник имеет более низкую работу выхода, чем металл. Когда полу-

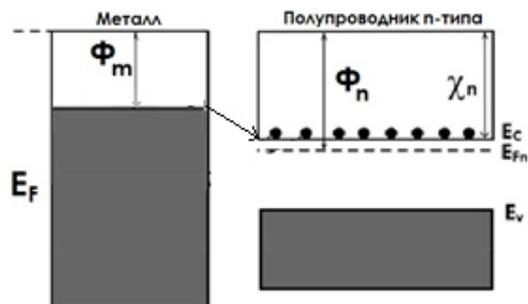


Рис. 6. Омический переход до контакта. Перед контактами уровни Ферми находятся в различных положениях, и они выстраиваются на контакт, чтобы дать область накопления в полупроводнике

проводник имеет более высокую работу выхода на стыке, то формируется так называемый омический контакт. Еще раз можно нарисовать схему энергетических зон перехода в равновесии (уровни Ферми выстраиваются в линию). Это показано на рис. 6. При равновесии электроны движутся от металла до свободных состояний в зоне проводимости, так что есть область накопления вблизи границы раздела (на полупроводниковой стороне). Область накопления имеет более высокую проводимость, чем основная масса полупроводника из-за высокой концентрации электронов. Таким образом, омический контакт ведет себя как резистор в прямом и обратном смещении. Сопротивление определяется объемным сопротивлением полупроводника.

2.2. Металлизация гетероструктур p-n-SiC с радионуклидом. Накопленный в структуре заряд снимают посредством металлизации контактных площадок. С образцов, имеющих структуру Me/n-SiC/p-SiC/p-Si (pK-60 мин, nK*-9 мин), была стравлена металлизация и измерены параметры структуры n-SiC/p-SiC/p-Si и p-Si/p-SiC/n-SiC. Измерялась вертикальная структура. Также были определены параметры образца с планарной структурой и вертикальной структурой.

Межсоединения структурных элементов энергопреобразователей были выполнены золотой проволочкой диаметром 30 мкм на технологической установке термокомпрессионной микросварки «Контакт-3М» посредством сдвоенного электрода. Микросоединение формируется при одновременном воздействии температуры и механического давления. Температура подогреваемого столика составляла 250 °С, давление обеспечивал груз 175 г, постоянный ток 7.5÷8 А пропускался импульсом длительностью 3 с через сдвоенный электрод. Выделяющееся джоулево тепло при этих условиях обеспечивало пластическую деформацию пары

сопрягаемых материалов, одним из которых была Au-проволочка, а другим – предварительно нанесенная и вожденная металлизация на структуре на технологической установке вакуумного напыления ВУП-4. Металлизация к слоям n-типа проводимости выполнялась напылением Ni с вольфрамового испарителя, к слоям вскрытого p-типа проводимости (Al-Ti) – с Mo-испарителя.

Был исследован спектр металлизационных композиций, обеспечивающих подлежащие, адгезионные, антидиффузионные свойства и слои внешней металлизации. Эта работа обусловлена тем, что введение радионуклида C-14 в слой n-SiC на уровне диффузионного легирования существенно изменило характеристический параметр – работу выхода электрона из полупроводника, следовательно, сделало эти исследования актуальными для нашего проекта.

Источник питания работает в низоваттном интервале, поэтому вольтамперные характеристики фото- и радио-ЭДС исследовались в диапазоне значений параметров: ток короткого замыкания до 1 мкА, напряжение холостого хода до 10 мВ.

Для тестирования p-n перехода посредством исследования фоточувствительности структур проводились измерения зависимости фототока от уровня освещенности рабочей поверхности структуры белым светом от лампы накаливания, имеющей спектр излучения, наиболее близкий к естественному освещению.

Было проведено вскрытие p-n-перехода. Исследована серия образцов по технологии, исключаяющей ионное травление. На пластинах кремния марки КСД-5 был выращен слой p-SiC. После окисления пластин и удаления с одной стороны пластины слоя окисла было произведено перелегирование слоя p-SiC в n-SiC с одновременным введением в структуру изотопа C-14. После лазерной резки с нерабочей стороны выполнена металлизация изготовленных структур путем осаждения химического никеля, затем напылялся слой меди и слой никеля. Были проверены параметры структур. Значения тока короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжения холостого хода $U_{хх}$ не превышали соответственно 0.01 нА и 0.001 мВ, что свидетельствует о закортках p-n-перехода и необходимости химической обработки торцевых поверхностей чипа. Для исключения влияния металлизации на параметры структуры с образцов с номерами К1, К3 был стравлен слой металла, кроме того, у структуры К-4 был стравлен слой n-SiC, после чего были проведены измерения параметров структур.

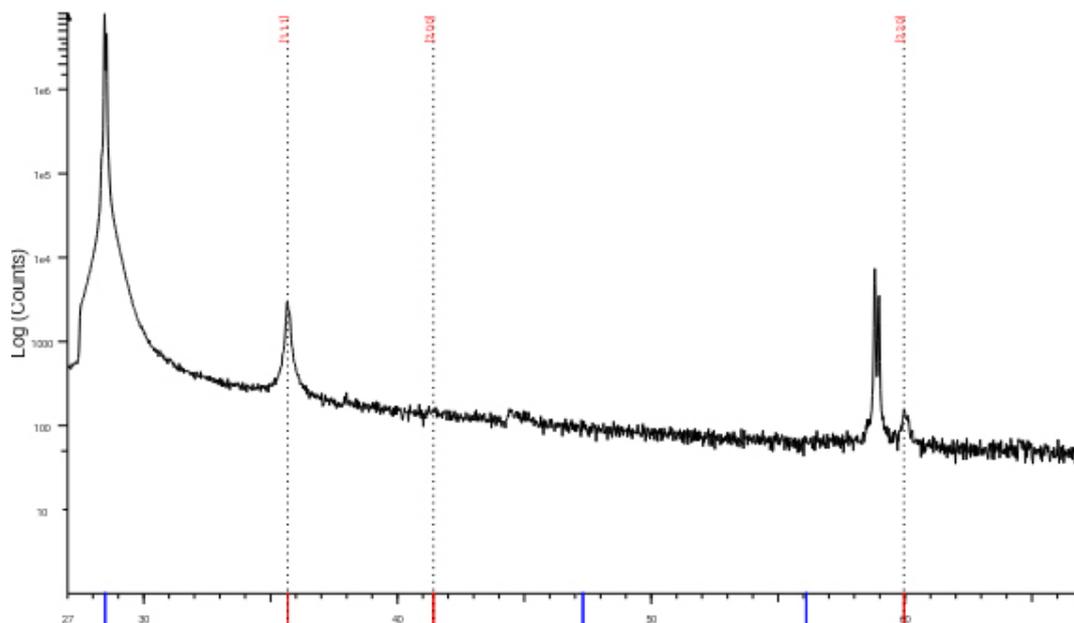


Рис. 7. Дифрактограмма p-SiC/Si, отражения от Si(111), 3C-SiC(111), 3C-SiC(220)

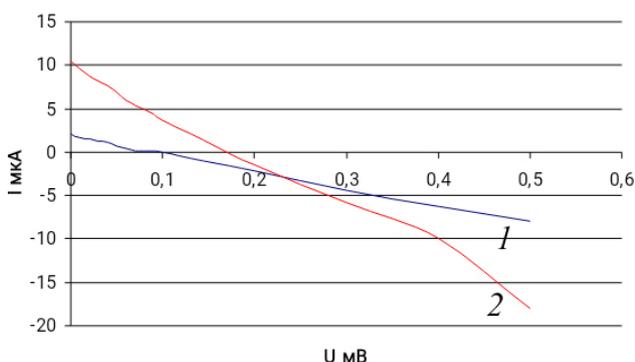


Рис. 8. Темновая (1) и световая (2) вольтамперные характеристики, измеренные на структуре n-SiC/p-SiC/p-Si

Далее на образцах К1, К3 со стороны слоя n-SiC на половину образца был нанесен слой фоторезиста, со второй половины поверхности был стравлен слой n-SiC до слоя p-SiC. Темновые характеристики свидетельствуют об эффективности введения углерода-14. Параметры измерялись на вертикальной и планарной структурах. Произведен замер $I_{кз}$ и $U_{хх}$ на свету (дневной свет) и в темноте.

Два образца с металлизированными окнами. Металлизация WSi + Au/Ag. $I_{кз}$ и $U_{хх}$ измерялись на вертикальной структуре. Исследуемые структуры: были произведены измерения параметров двух образцов с металлизированными окнами. Металлизация WSi + Au/Ag производилась методом напыления на установке ВУП-4. Параметры структур $I_{кз}$ и $U_{хх}$ измерялись на вертикальной структуре.

Следующим этапом было напыление на поверхность n-SiC и p-SiC никелевых контактов. Произведены аналогичные измерения тока и напряжения.

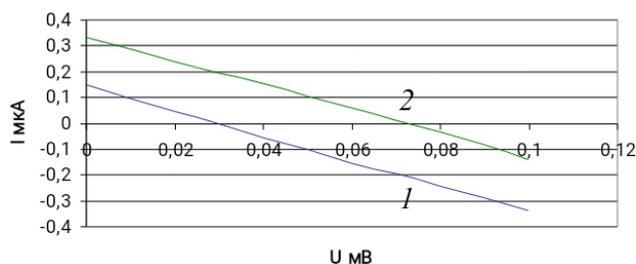


Рис. 9. Темновая (1) и световая (2) вольтамперные характеристики, измеренные на структуре p-SiC/p-Si

Результаты тестирования полученных поверхностей приведены ниже. Рис. 7 подтверждает, что структура действительно 3C-SiC, у которой надо вскрыть p-n-переход и изготовить контакты для измерений световой и темновой ЭДС. p-n-переход n-SiC/p-SiC работает как фотоэлектрический преобразователь, изотипный (гомопереход) p-SiC/p-Si имеет меньшие значения $I_{кз}$ и $U_{хх}$, но его параметры не зависят от освещения. Никелевый контакт на структуре n-SiC/p-SiC не ухудшил параметров структуры, наблюдается некоторое увеличение темнового тока короткого замыкания. Никелевый контакт на структуре p-SiC/p-Si привел к возникновению дополнительного перехода Шоттки.

Данные вольтамперных характеристик представлены на рис. 8 и 9. Было проведено измерение темновых и световых вольтамперных характеристик на примере образца К-3. В схеме измерения использовались источник питания постоянного тока Б5-46, вольтметр универсальный В7-21А и зондовая головка. При измерениях зондовая головка устанавливалась как на никелевом контакте, так и непосредственно на пленке n-SiC и p-SiC.



Рис. 10. Вариант исполнения экспериментальной структуры с металлизацией

Необходимо принять во внимание, что вольтамперные характеристики снимались с образцов, легированных радиоизотопом С-14. При освещении образцов использовалась лампа мощностью 1000 Вт.

Темновая и световая вольтамперные характеристики, измеренные на структуре Ni/n-SiC/p-SiC/p-Si, приведены на рис. 8.

Таким образом, в ходе экспериментального исследования выполнена оценка вклада металлизации на эффективность сбора неравновесных носителей заряда. Результаты измерений показали, что металлизация не выполняет своих функций и не повышает показателя эффективности $I_{кз}$ и U_{xx} . Однако отметим на вольтамперных характеристиках, что при нулевом напряжении отмечается ненулевой ток, что характерно для явления бета-вольтаического эффекта.

Фотография варианта исполнения структуры с металлизацией представлена на рис. 10.

Результаты световой фото-ЭДС свидетельствуют о качестве технологии вскрытия p-n-перехода (использован зондовый метод измерений: максимальные значения светового тока короткого замыкания $I_{с,кз} = 250$ нА; $U_{с,xx} = 25$ мВ).

Результаты темновых ЭДС свидетельствуют о легировании структуры радиоизотопом С-14 (использован зондовый метод измерений: максимальные значения $I_{т,кз} = 50$ нА; $U_{т,xx} = 1.6$ мВ).

Выявлено, что С-14 генерирует неравновесные носители как в n-области, так и в p-области SiC, включая гетеропереход, выступающий в качестве геттера С-14.

Измерения выполнены как для планарного изготовления структуры энергопреобразователя, так и непланарного исполнения, предпочтение по технологичности отдано планарному исполнению.

Для прижимных контактов используют практическую технологию, когда наносятся хорошо пружинящие и твердые металлы или сплавы: Wo, сплав ВК6 (Wo + 6%Co) и др.

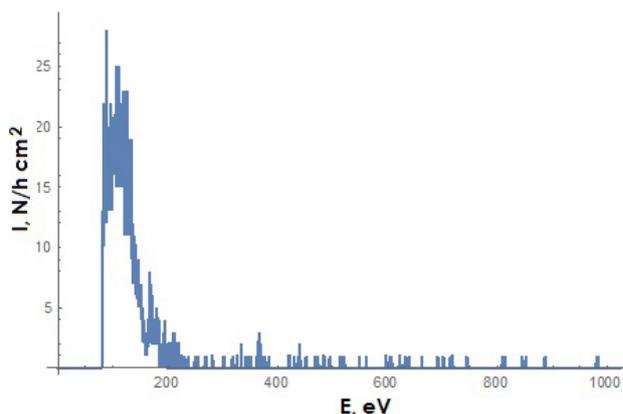


Рис. 11. Спектр С14 из программы эксперимента (практически совпадает): $t = 3600$ с, ус.256, $U = 90$ В

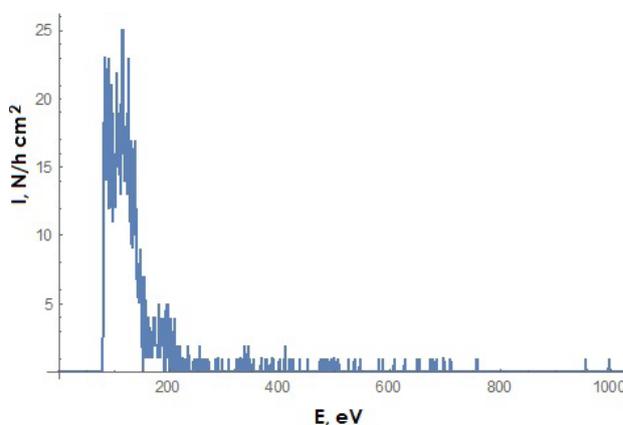


Рис. 12. Оригинальный график, соответствующий спектру С14

3. Исследование активности бета-излучения и измерение радио-ЭДС гетероструктуры

Исследование активности и снятие бета-спектра проходило на многоканальном детекторе как в резерфордовском обратном рассеянии для ионов. Датчик был откалиброван на данные по Висмуту-207 и далее применен к исследованию С-14 в структуре карбида кремния.

Была определена таким образом информация об энергиях и количестве электронов для гетероструктур SiC с С-14 для области 2 см^2 . Интенсивность измерялась в течение 9 минут. Спектр излучения представлен графиками зависимости интенсивности излучения от энергии (рис. 11, 12).

Спектр бета-излучения С-14 согласуется с ожидаемым.

Дополнительно был проведен эксперимент с пластинами, где измерение проводилось в области радиусом 5 мм при диффузии в течение часа для двух экспериментов (рис. 13).

Сравнение результатов позволяет судить об эффективной глубине залегания молекул С-14.

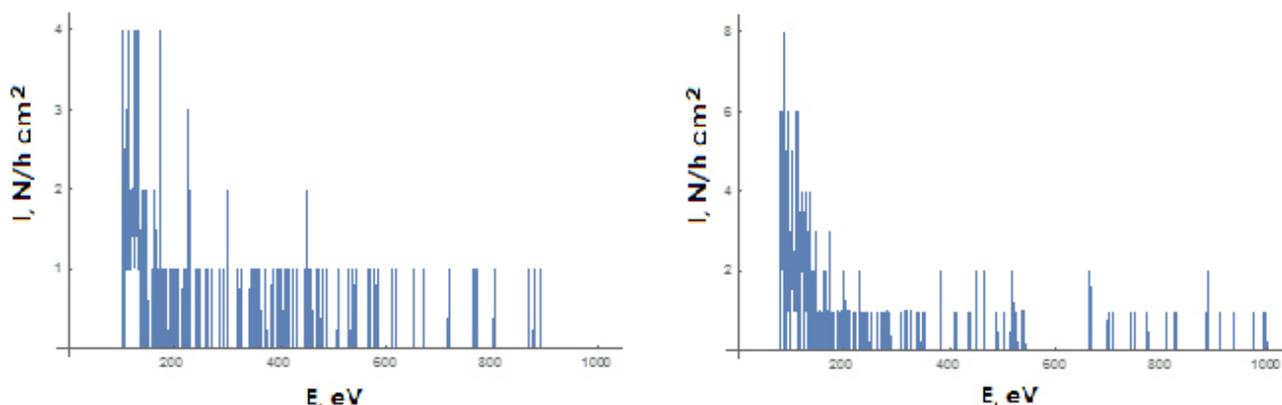


Рис. 13. Слева: моделирование эксперимента на маленькой пластине, соответствующее первому эксперименту; справа – второму эксперименту

Для случая, когда реактор работал 9 мин и образовался тонкий слой порядка 2 мкм, практически все наблюдаемые в спектре электроны являются первичными. Очевидно, что закон сохранения электрического заряда (с учетом образования пар) выполняется. Влияние вторичных электронов не существенно в течение данного промежутка времени.

Отметим, что на площадь чувствительного элемента датчика диаметром 5 мм регистрация электронов с энергией бета-распада С-14 при экспозиции 1 час является достаточной. Увеличение времени экспозиции и повторные измерения подтверждают данные результаты.

4. Анализ проведенных исследований и конструкция автономного источника питания

Готовое устройство содержит полупроводниковую структуру для прямого преобразования энергии планарного или вертикального исполнения с р-п-переходом и гетеропереходом для разделения неравновесных носителей внутренним электрическим полем. Структура включает пленку полупроводникового карбида кремния на подложке монокристаллического кремния, причем карбид кремния характеризуется тем, что в молекулярную форму карбида кремния входит радиоизотоп углерода-14, доля радиоуглеродного изотопа С-14 в структуре пленки карбида кремния по отношению к углероду С-12 в той же структуре составляет от 10^{-6} до 10^{-3} %, что оказывается выгодным в технико-экономическом отношении из-за относительно низкой стоимости данного радиоизотопа. Удельное содержание радиоизотопа в чипе $1\text{ мм} \times 1\text{ мм} \times 0.5\text{ мм}$ составляет не более 25×10^{-3} %. Энергия радиоизотопа с большим периодом и достаточной активностью

чисто бета-полураспада, напрямую преобразуется в электрическую энергию. Внутрискруктурный радиоизотопный источник исключает эффект самопоглощения бета-электронов в области диффузионной длины, что позволяет снизить концентрацию радиоизотопа до безопасного уровня.

В одном из вариантов устройства использована структура энергопреобразователя с развитой удельной поверхностью, во-первых, для увеличения плотности энергии с единицы площади пленки карбида кремния, при этом внутренняя периферия по образующей каждой поры (например, полученная электролитическим травлением подложки кремния), п- и р-типа проводимости, а радиоизотоп С-14 в молекулах карбида кремния содержится только в п- или р-области р-п-перехода в карбиде кремния. Во-вторых, поры, обладая развитой поверхностью, обеспечивают выход радиационно наведенных дефектов структуры и, следовательно, увеличивают радиационную пассивность.

В одном из вариантов устройства использована пористая структура энергопреобразователя с изотипным гетеропереходом с радиоизотопом С-14 в молекулярной форме SiC п- или р-типа проводимости на подложке кремния (например KEF-20 или KDB-20 соответственно). В данной структуре неравновесные носители (вторичные электроны и дырки) разделяются внутренним полем гетероперехода (полупроводник-полупроводник). Металлизация контактных площадок выполнена к полупроводникам с разной шириной запрещенной зоны (ширина запрещенной зоны кремния составляет 1.1 эВ, а карбида кремния – 2.2 эВ).

В одном из вариантов устройства использована пористая структура энергопреобразователя с анизотипным гетеропереходом с радиоизотопом С-14 в молекулярной форме SiC п- или р-типа

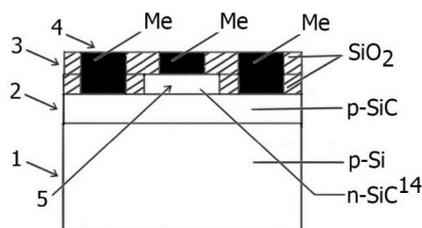


Рис. 14. Элемент устройства: «Гетероструктура карбида кремния с n-p-переходом на подложке кремния p-типа проводимости в планарном исполнении»

проводимости на подложке кремния (например, KDB-20 или KEF-20 соответственно). Неравновесные носители генерируются бета-электронами и разделяются внутренним полем гетероперехода и, кроме того, n-p или p-n-перехода в подложке кремния. При этом структура в устройстве может иметь i-область компенсации носителей в подложке кремния, что повышает эффективность генерации и разделения носителей.

Устройство со структурой, содержащей радиоизотоп C-14 с молекулой карбида кремния в концентрации от 10^{-6} до 10^{-3} % работает следующим образом. Бета-электроны имеют энергию выше, чем ширина запрещенной зоны сопряженных полупроводников. Данный факт приводит к генерации неравновесных носителей в полупроводниках. При этом полупроводниковые материалы могут быть n- или p-типа проводимости. Возбужденные вторичные электроны и дырки диффундируют в пределах длины свободного пробега попадая в область встроенного внутреннего поля области объемного пространственного заряда (ОПЗ) p-n-перехода или гетероперехода. Внутреннее поле принуждает диффундировать электроны и дырки направленно (электроны выносятся в n-область, а дырки – в p-область, выводя систему из равновесного состояния). Катодная и анодная области полупроводниковой структуры устройства имеют металлизацию/контакты, причем эти области могут иметь планарное или вертикальное исполнение. Электрические выводы соединены с металлизацией известными методами. При дискретном исполнении чипов структуры электрические выводы коммутируют, чтобы обеспечить заданное значение тока и напряжению по известным законам схемотехнических решений.

Чипы структуры в дискретном или интегральном исполнении соединяют в сборки и размещают в металлическом или пластиковом черном корпусе стандартного исполнения. Внешние выводы корпуса потребитель коммутирует по своему усмотрению под требуемые значения тока и напряжения.

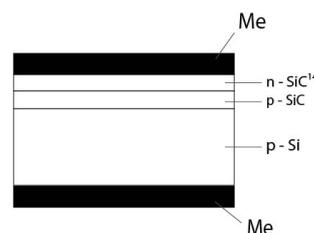


Рис. 15. Элемент устройства: «Гетероструктура карбида кремния с n-p-переходом на подложке кремния p-типа проводимости»

Дискретные элементы чипа энергопреобразователя имеют размеры в примере конкретного исполнения 1×1 мм, ток короткого замыкания в зависимости от концентрации радиоизотопа C-14 от 15 до 90 нА, а напряжения холостого хода – от 0.1 до 30 мВ.

Элементы устройства в интегральном/матричном исполнении имеют размеры 12×12 мм, количество чипов в нем 65 шт. Матрицы объединяют в сборки, которые размещают в корпусе, обеспечивающем экологическую безопасность для потребителя. Внешние выводы корпуса возможно коммутировать по своему усмотрению под требуемые значения тока и напряжения.

Использование устройства, содержащего полупроводниковую гетероструктуру карбида кремния на подложке монокристаллического кремния для прямого преобразования энергии реакции радиохимического распада в постоянный ток в технико-экономическом отношении, оправдано, использование радиоизотопа C-14 в молекулярной форме карбида кремния с содержанием в пленке карбида кремния на уровне от 10^{-6} до 10^{-3} % делает устройство с высокой удельной энергетической эффективностью и безопасным в применении для маломощных автономных энергосберегающих микросхем и микросистем. Гетероструктуру выращивают методом эндотаксии на технологической установке CVD-эпитаксии. В качестве подложки использован монокристаллический кремний, в том числе с пористой поверхностью.

На рис. 14 и 15 показана гетероструктура карбида кремния с n-p-переходом на подложке кремния p-типа проводимости в планарном исполнении (где условные обозначения 1 – подложка кремния обозначена p-Si; 2 – пленка карбида кремния p-типа проводимости обозначена p-SiC; 3 – изолирующая пленка обозначена SiO_2 ; 4 – контактная металлизация обозначена Me; 5 – пленка карбида кремния n-типа проводимости с радиоизотопом C-14 обозначена n-SiC), а также в вертикальном исполнении. На рисунке показана пленка пори-

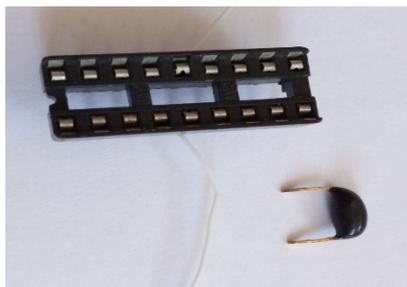


Рис. 16. Энергопреобразователь в дискретном исполнении рядом с панелькой для монтажа микросхем

стого карбида кремния на кремниевой подложке. На рис. 16 и 17 – фотографии энергопреобразователя в дискретном исполнении, смонтированные на панели для монтажа микросхем. Набор дискретных энергопреобразователей на панели (от 8 до 64 гнезд) позволяет выполнить внешнюю коммутацию элементов потребителем под нужные значения тока и напряжения.

Заключение

По итогам проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ была разработана технология изготовления бета-преобразователя. В представленной статье включены приведенные ниже результаты работ. Были достигнуты следующие основные результаты:

- сформированы гетероструктуры SiC^*/Si с радионуклидом;
- разработан процесс вскрытия р-п-перехода в фазе карбида кремния гетероструктуры SiC^*/Si ;
- изготовлены контактные площадки к п- и р-области карбида кремния;
- произведена разварка электрических выводов методом термокомпрессии;
- определены параметры фотовольтаического преобразования энергии квантов света в фото-ЭДС для подтверждения эффективности работы р-п-перехода и метода его вскрытия;
- проведена оценка эффективности введения углерода-14 в молекулу карбида кремния электрофизическими измерениями.

Дифрактограмма свидетельствует, что на подложке кремния сформирована SiC -фаза.

Распределение легирующей примеси в структуре свидетельствует о легировании пленки карбида кремния в процессе ее выращивания и о возможности формирования р-п-перехода в фазе SiC .

Апробирован процесс окисления, фотолитографии и лазерного скрайбирования структур энергопреобразователей на чипы. Показано, что толщина окисла должна составлять не менее 400 нм,

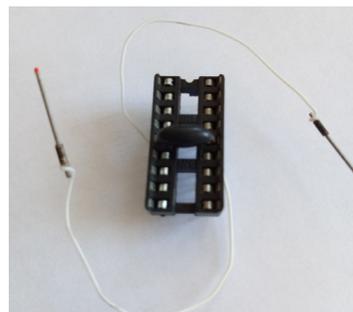


Рис. 17. Энергопреобразователь в дискретном исполнении, смонтированный на панели для монтажа микросхем

чтобы обеспечить рост фазы SiC только во вскрытых окнах.

Исследован вопрос металлизации контактных площадок к п- и р-типу проводимости структуры. Показано, что толщина покрытия, вид металла (с учетом работы выхода) свидетельствуют о недостаточной эффективности сбора неравновесных носителей, так как максимальные значения $I_{\text{с,кз}}$, темного $I_{\text{т,кз}}$, $U_{\text{с,хх}}$, $U_{\text{т,хх}}$ не увеличиваются. Вопрос связан с изменением характеристических свойств карбида кремния, легированного радиоизотопом С-14. Решение вопроса просматривается в применении процесса фотолитографии для обеспечения сбора носителей в пределах их длины свободного пробега (мультиэлементная конструкция энергопреобразователя).

Работы по вскрытию р-п-перехода посредством плазмохимического травления газовой смесью SF_6 и O_2 не дали положительного результата вследствие локальной неоднородности вскрытия п-фазы SiC . Исследованы альтернативные методы формирования структур, исключая процесс ионного травления, но использующих процессы формирования окисла и фотолитографии.

Последующая металлизация и тестирование структур на характернографе свидетельствует о коротках р-п-перехода.

Металлизация контактных площадок к п-области выполнена Ni с операцией отжига при температуре 500–600 °С в течение 15 мин, металлизация к р-области выполнена Al и Ti с отжигом при температуре 400–450 °С. Повышения сбора носителей по отношению к зондовым измерениям без контактной металлизации не отмечено. Данный эффект объясняется изменением работы выхода электрона из легированной радиоизотопом SiC -фазы. Поэтому для сильно легированных радиоизотопом образцов подбор металлов, их неорганических соединений и послойных комбинаций незакончен.

Исследование фотовольтаического преобразования энергии квантов света в фото-ЭДС. Тестирование гетероструктуры SiC/Si легированной радиоизотопом C-14 посредством фотоэлектрических измерений (световая и темновая характеристики) показал:

1) Световая характеристика свидетельствует об эффективности разделения неравновесных носителей энергетическими барьерами. Измерения структур планарного и вертикального исполнения показали:

1.1) Максимальные значения $I_{кз}$ в структурах вертикального исполнения. Образец К-3 для прямого включения структуры дает $I_{кз} = 275$ нА, $U_{xx} = 27.8$ мВ. Обратное включение дает $I_{кз} = 238.8$ нА, $U_{xx} = 24$ мВ;

1.2) Максимальные значения $I_{кз}$ в структурах планарного исполнения. Образец К-3 для прямого включения структуры дает $I_{кз} = 338.6$ нА, $U_{xx} = 35.1$ мВ. Обратное включение дает $I_{кз} = 317.7$ нА, $U_{xx} = 32.9$ мВ;

2) Темновая характеристика свидетельствует об эффективности разделения неравновесных носителей, генерируемых бета-излучением. Измерения выполнены для структур планарного и вертикального исполнения:

2.1) Максимальные значения $I_{кз}$ в структурах вертикального исполнения. Образец К-4 для прямого включения структуры дает $I_{кз} = 50.4$ нА, $U_{xx} = 11.6$ мВ. Обратное включение дает $I_{кз} = 29.5$ нА, $U_{xx} = 2.2$ мВ.

Образец К-3. Максимальные значения $I_{кз}$ в структуре планарного исполнения. Обратное включение структуры дает $I_{кз} = 32.9$ нА, $U_{xx} = 0.04$ мВ.

По итогам работ была разработана конструкция бета-преобразователя. Достигнуты следующие экспериментальные результаты:

- сформированы гетероструктуры SiC*/Si с радионуклидом;
- сформированы и нанесены контактные площадки к n- и p-области карбида кремния;
- произведена разварка электрических выводов методом термокомпрессии;
- определены параметры преобразования энергии бета-электронов в радио-и бета-ЭДС для подтверждения эффективности работы бета-преобразователя;
- проведена оценка эффективности энерговыделения углерода-14 в молекуле карбида кремния, измерен спектр бета-излучения, представлен анализ проведенных исследований;
- измерена радио-ЭДС гетероструктуры, представлен анализ проведенных исследований;
- разработана конструкция автономного источника питания;
- изготовлены экспериментальные образцы источника питания.

Работа выполнена при поддержке Программы «НТИ – СТАРТ», а также при поддержке измерений бета-спектра на базе Физико-технического института Академии наук Республики Узбекистан.

Список литературы

1. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / В.А. Миличко [и др.] // УФН. 2016. Т. 186. № 8. С. 801–852. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2016.02.037703>.
2. Nishino S., Powel J., Will N.A. Production of large area single crystal wafers of cubic SiC for semiconductor devices // Applied Physics Letters. 1983. Vol. 42. P. 460. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.93970>.
3. Латухина Н.В., Чепурнов В.И., Писаренко Г. Перспективы старых материалов: кремний и карбид кремния // Электроника: наука, технология, бизнес. 2013. № 4(126). С. 104–110.
4. Фотоэлектрические свойства структур с микро- и нанопористым кремнием / Н.В. Латухина [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 3(29). С. 66–71.
5. Ehrenberg W., Lang C.-S., West R. The electron voltaic effect // Proceedings of the Physical Society. Section A. 1951. Vol. 64. № 4. P. 424. DOI: <https://doi.org/10.1088/0370-1298/64/4/109>.
6. Moseley H.G.J., Harling J. The attainment of high potentials by the use of radium // Proc. R. Soc. Lond. A. 1913. Vol. 88. P. 471. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1913.0045>.
7. Rappaport P.I., Loferski J.J., Lindery E.G. A study program of possible uses new principle // Nucleonics. 1957. Vol. 15. P. 99.
8. A review of nuclear batteries / M.A. Prelas [et al.] // Progress in Nuclear Energy. 2014. Vol. 75. P. 117–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.04.007>.
9. Патент РФ №2005139163/28 от 15.12.2005. Чепурнов В.И. Способ самоорганизующейся эндотаксии моно 3C–SiC на Si подложке. Оpubл. 20.10.2009, 8 (RU2370851).
10. Долгополов М.В., Латухина Н.В., Чепурнов В.И., Гурская А.В. Способ получения пористого слоя гетероструктуры карбида кремния на подложке кремния. Патент № 2653398, получен 18.05.2018, приоритет 19.07.2016.
11. Study of surface defects on 3C–SiC films grown on Si (III) by CVD / M.J. Hernander [et al.] // Journal of Crystal Growth. 2003. Vol. 253. № 1–4. P. 95–101. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(03\)01024-8](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(03)01024-8).

12. Epitaxial growth of β -SiC single crystals by successive two-step CVD / A. Suzuki [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. Vol. 70. 1984. P. 287–290. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(84\)90275-6](https://doi.org/10.1016/0022-0248(84)90275-6).
13. Hong J.D., Davis R.F. Self-diffusion of carbon-14 in high-purity and N-doped α -SiC single crystals // *Journal of the American Ceramic Society*. 1980. Vol. 63. № 9–10. P. 546–552. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1980.tb10762.x>.
14. Hon M.H., Mater R.F. Self-diffusion of C-14 in polycrystalline β -SiC // *Journal of Materials Science*. 1979. Vol. 14. № 10. P. 2411–2421. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00737031>.
15. Lely J.A. Preparation of single crystals of SiC and the effect of the kind and amount of impurities on the lattice // *Ber. Dtsch. Ker. Ges.* 1955. Vol. 32. P. 229–234.
16. Addamiano A., Potter R.M., Ozarow V. Photoluminescence of α -SiC // *J. Electrochem. Soc.* 1963. Vol. 110. № 6. P. 517–520. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2425804>.
17. Potter R.M., Sattelle J.H. Induction-heated furnace for growth of α -silicon carbide crystals // *J. Cryst. Growth*. 1972. Vol. 12. P. 245–248. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(72\)90009-7](https://doi.org/10.1016/0022-0248(72)90009-7).
18. Покоева В.А., Сивакова К.П. Особенности диффузионного легирования структуры SiC/Si для полупроводниковых СВЧ-датчиков фосфором и бором под действием внутреннего электрического поля // *Физика волновых процессов и радиотехнических систем*. 2007. Т. 10. № 2. С. 110–114.
19. Тейтельбаум А.З., Ходунова А.В. Одновременное моделирование процессов ионного легирования и диффузионного перераспределения примесей в кремнии // *Электронная промышленность*. 1984. № 9. С. 41–45.
20. Галанин Н.П., Малкович Р.Ш. Математическое моделирование диффузии двух заряженных примесей в полупроводнике с учетом внутреннего электрического поля // *ФТП*. 1995. Т. 20. № 5. С. 1451–1456.
21. Гурская А.В., Долгополов М.В., Чепурнов В.И. 14С бета-преобразователь // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2017. Т. 48. № 6. С. 901–909
22. Чепурнов В.И., Сивакова К.П., Ермошкин А.А. Особенности наноточечного дефектообразования в структуре por-SiC/Si, полученной по диффузионной технологии для химических датчиков // *Вестник СамГУ. Естественная серия*. 2011. № 2 (83). С. 179–183.
23. Чепурнов В.И. Ассоциаты точечных дефектов различной природы в SiC-фазе полупроводниковой гетероструктуры SiC/Si, полученной методом эндотаксии // *Вестник СамГУ. Естественная серия*. 2014. № 7 (118). С. 145–162.
24. Betavoltaic device in por-SiC/Si C-nuclear energy converter / A. Akimchenko [et al.] // *EPJ Web of Conferences*. 2017. Vol. 158. P. 06004. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201715806004>.
25. Kasap S.O. *Principles of Electronic Materials and Devices*. N.-Y.: McGraw-Hill Education, 2006. 768 p.

References

1. Milichko V.A. [et al.] Solnechnaja fotovol'taika: sovremennoe sostojanie i tendentsii razvitiya [Solar photovoltaics: current state and development trends]. *UFN [UFN]*, 2016, no. 8, pp. 801–852. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.02.037703> [in Russian].
2. Nishino S., Powel J., Will N.A. Production of large area single crystal wafers of cubic SiC for semiconductor devices. *Applied Physics Letters*, 1983, vol. 42, pp. 460. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.93970> [in English].
3. Latuhina N.V., Chepurinov V.I., Pisarenko G. Perspektivy staryh materialov: kremnij i karbid kremnija [Prospects for old materials: silicon and silicon carbide]. *Elektronika: nauka, tehnologija, biznes [Electronics: Science, Technology, Business]*, 2013, no. 4(126), pp. 104–110 [in Russian].
4. Latuhina N.V. [et al.] Fotoelektricheskie svojstva struktur s mikro- i nano-poristym kremniem [Photovoltaic properties of structures with micro- and nano-porous silicon]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, 2009, vol. 11, no. 3(29), pp. 66–71 [in Russian].
5. Ehrenberg W., Lang C.-S., West R. The electron voltaic effect. *Proceedings of the Physical Society. Section A*, 1951, vol. 64, no. 4, pp. 424. DOI: <https://doi.org/10.1088/0370-1298/64/4/109> [in English].
6. Moseley H.G.J., Harling J. The attainment of high potentials by the use of radium. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1913, vol. 88, pp. 471. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1913.0045> [in English].
7. Rappaport P.I., Loferski J.J., Lindery E.G. A study program of possible uses new principle. *Nucleonics*, 1957, vol. 15, pp. 99 [in English].
8. Prelas M.A. [et al.] A review of nuclear batteries. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, vol. 75, pp. 117–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.04.007> [in English].
9. Patent RF №2005139163/28 от 15.12.2005 [RF Patent №2005139163/28 from 15.12.2005]. Chepurinov V.I. Sposob samoorganizujuschejsja endotaksii mono 3S-SiC na Si podlozhke [A method of self-organizing endotaksii mono 3C-SiC on Si substrate]. *Opubl.* 20.10.2009 [Publ. 20.10.2009], 8 (RU2370851) [in Russian].
10. Dolgopолов M.V. Latuhina N.V. Chepurinov V.I. Gurskaja A.V. Sposob poluchenija poristogo sloja geterostruktury karbida kremnija na podlozhke kremnija [A process for producing a porous silicon carbide layer of the heterostructure on a silicon substrate]. Patent № 2653398, poluchen 18.05.2018, prioritet 19.07.2016 [received 05.18.2018, priority 19.07.2016] [in Russian].
11. Hernander M.J. [et al.] Study of surface defects on 3C-SiC films grown on Si (III) by CVD. *Journal of Crystal Growth*, 2003, vol. 253, no. 1–4, pp. 95–101. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(03\)01024-8](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(03)01024-8) [in English].
12. Suzuki A. [et al.] Epitaxial growth of β -SiC single crystals by successive two-step CVD. *Journal of Crystal Growth*, 1984, vol. 70, pp. 287–290. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(84\)90275-6](https://doi.org/10.1016/0022-0248(84)90275-6) [in English].
13. Hong J.D., Davis R.F. Self-diffusion of carbon-14 in high-purity and N-doped α -SiC single crystals. *Journal of the American Ceramic Society*, 1980, vol. 63, no. 9–10, pp. 546–552. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1980.tb10762.x> [in English].

14. Hon M., Mater R.F. Self-diffusion of C-14 in polycrystalline β -SiC. *Journal of Materials Science*, 1979, vol. 14, no. 10, pp. 2411–2421. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00737031> [in English].
15. Lely J.A. Preparation of single crystals of SiC and the effect of the kind and amount of impurities on the lattice. *Ber. Dtsch. Ker. Ges.*, 1955, vol. 32, pp. 229–234 [in English].
16. Addamiano A., Potter R.M., Ozarow V. Photoluminescence of α -SiC. *J. Electrochem. Soc.*, 1963, vol. 110, no. 6, pp. 517–520. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2425804> [in English].
17. Potter R.M., Sattelle J.H. Induction-heated furnace for growth of α -silicon carbide crystals. *J. Cryst. Growth*, 1972, vol. 12, pp. 245–248. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(72\)90009-7](https://doi.org/10.1016/0022-0248(72)90009-7) [in English].
18. Pokoeva V.A., Sivakova K.P. Osobennosti diffuzionnogo legirovaniya struktury SiC/Si dlja poluprovodnikovyh SVCh-datchikov fosforom i borom pod dejstviem vnutrennego elektricheskogo polja [Features diffusion doping SiC/Si structures for semiconductor microwave sensors phosphorus and boron under the influence of the internal electric field]. *Fizika volnovyh protsessov i radiotekhnicheskikh sistem* [Physics of wave processes and radio systems], 2007, vol. 10, no. 2, pp. 110–114 [in Russian].
19. Tejtel'baum A.Z., Hodunova A.V. Odnovremennoe modelirovanie protsessov ionnogo legirovaniya i diffuzionnogo pereraspredeleniya primesej v kremnii [Simultaneous modeling of ion implantation processes and redistribution of impurity diffusion in silicon]. *Elektronnaja promyshlennost'* [Electronic Industry], 1984, no. 9, pp. 41–45 [in Russian].
20. Galanin N.P., Malkovich R.Sh. Matematicheskoe modelirovanie diffuzii dvuh zarjzhennykh primesej v poluprovodnike s uchetom vnutrennego elektricheskogo polja [Mathematical modeling of diffusion of two charged impurities in the semiconductor with the internal electric field]. *FTP*, 1995, vol. 20, no. 5, p. 1451–1456 [in Russian].
21. Gurskaja A.V., Dolgoplov M.V., Chepurnov V.I. 14C beta-preobrazovatel' [14C beta converter]. *Fizika elementarnyh chastits i atomnogo jadra* [Elementary particle physics and nuclear], 2017, vol. 48, no. 6, pp. 901–909 [in Russian].
22. Chepurnov V.I., Sivakova K.P., Ermoshkin A.A. Osobennosti nanotochechnogo defektoobrazovaniya v strukture por-SiC/Si, poluchenoj po diffuzionnoj tehnologii dlja himicheskikh datchikov [Properties nanotochechnogo defect in the structure por-SiC/Si, obtained by diffusion technology for chemical sensors]. *Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaja serija* [Vestnik of SSU. The natural science series], 2011, no. 2 (83), pp. 179–183 [in Russian].
23. Chepurnov V.I. Assotsiaty tochechnyh defektov razlichnoj prirody v SiC-faze poluprovodnikovoj geterostruktury SiC/Si, poluchenoj metodom endotaksii [Associates point defects of different nature in the SiC-phase SiC/Si semiconductor heterostructure obtained by endotaksii]. *Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaja serija* [Vestnik of SSU. The natural science series], 2014, no. 7(118), pp. 145–162 [in Russian].
24. Akimchenko A. [et al.] Betavoltaic device in por-SiC/Si C-nuclear energy converter. *EPJ Web of Conferences*, 2017, vol. 158, p. 06004. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201715806004> [in English].
25. Kasap S.O. *Principles of Electronic Materials and Devices*. N.-Y.: McGraw-Hill Education, 2006, 768 p. [in English].

UDC 620.98, 620.92, 620.3
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.3.55-67

Received: 10.09.2019
Accepted: 17.09.2019

Experimental investigation of semiconductor structures of the power source based on carbon-14

V.I. Chepurnov^{1,2}, G.V. Puzyrnaya^{1,2}, A.V. Gurskaya¹, M.V. Dolgoplov^{2,1}, N.S. Anisimov¹

¹ Samara National Research University

34, Moskovskoye Shosse

Samara, 443086, Russian Federation

² LLC «BetaVoltaika»

52/55, Ulyanovskaya Street

Samara, 443001, Russian Federation

The article presents the research results of semiconductor silicon carbide (porous) structures with the implanted carbon-14. The results of experimental measurements collected data on parameters of photovoltaic energy conversion of light quanta into a photo-EMF to confirm the efficiency of p-n junction, an evaluation of the effectiveness of the introduction of carbon-14 in the molecule silicon carbide electrophysical measurements. In the process used the technology of solid-phase transformation of the surface of the monocrystalline silicon substrate in the phase of monocrystalline silicon carbide by chemical transport of carbon in the environment of hydrogen.

Keywords: micro- and nanoelectronics, devices on quantum effects, betavoltaics, beta converter, carbon-14, heterostructure por-SiC/Si, endotoxemia, silicon carbide, p-n junction, metallization of the contact pads, solid-phase diffusion, solid-phase transformations, materials technology.