

БЕТА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

А. Л. Долгий

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, dolgyi@gmail.com*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все больше внимания уделяется созданию миниатюрных микроэлектронных устройств, которые способны работать автономно в течение длительного времени, таких как кардиостимуляторы, разнообразные датчики, оборудование для космических аппаратов и т. д. Для функционирования таких устройств необходимы элементы питания, которые позволили бы им функционировать без каких-либо вмешательств со стороны человека на протяжении всего цикла эксплуатации.

Над созданием таких миниатюрных источников энергии работают многие научные лаборатории и исследовательские группы. Одним из типов таких устройств являются полупроводниковые бета-преобразователи энергии. Принцип работы данного класса устройств основан на бета-вольтаическом эффекте, который заключается в разделении p - n -переходом зарядов, сгенерированных в полупроводнике проходящими через него бета-частицами [1]. Конструкция первой полупроводниковой бета-батареи была предложена в 1955 году Полом Раппопортом [2].

Для увеличения эффективной площади устройства возможно использование различных методов текстурирования поверхности полупроводника. Одним из наиболее простых и дешевых в реализации методов является формирование слоя структурированного макропористого кремния посредством анодной обработки в растворах фтористоводородной кислоты через маску.

В качестве источника бета-излучения возможно использование изотопа никеля-63. Период полураспада данного изотопа составляет 97 лет, а средняя энергия бета-частиц – 17 кэВ. Преимуществом никеля-63 перед другими бета-радиоактивными изотопами, такими как стронций-90 или тритий, является длительное время активности. Энергия бета-частиц никеля-63 ниже порога радиационных повреждений кремния, что препятствует преждевременному выходу устройства из строя. Кроме того, слои никеля можно наносить простым и дешевым методом электрохимического осаждения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Было разработано и изготовлено 2 типа бета-преобразователей и изучены их токи короткого замыкания и напряжения холостого хода, а также сняты вольтамперные характеристики. Для изучения данных параметров в качестве источника электронов использовалась электронная пушка с энергиями частиц 15 кэВ. В качестве измерительных приборов использовались высокоомные вольтметры и наноамперметры. Запись вольтамперных характеристик проводилась при помощи 12-разрядного ЦАП/АЦП фирмы National Instruments. Во время измерений образец помещался в вакуумную камеру.

Изучались следующие типы бета-преобразователей:

1) **Тип 1:** планарный $p-n$ -переход в кремнии p -типа.

$P-n$ -переход был сформирован методом диффузии фосфора. На поверхность образца электрохимическим методом наносился слой никеля, который по электрическим параметрам не отличается от изотопа никель-63. Затем через маску проводилось травление слоя металла для создания контактной сетки, позволяющей проникать в образец бета-излучению и обеспечивающей в то же время омический контакт к поверхности. Для создания омического контакта к обратной стороне была проведена имплантация ионов бора для формирования слоя p^+ -типа и напыление алюминия (рис. 1).

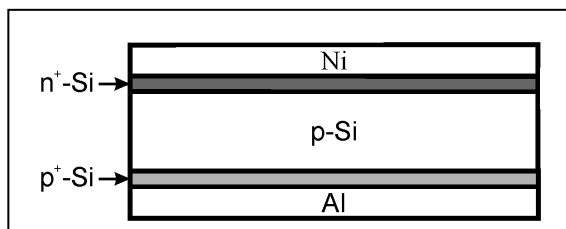


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения бета-преобразователя с планарным $p-n$ -переходом в подложке кремния p -типа проводимости

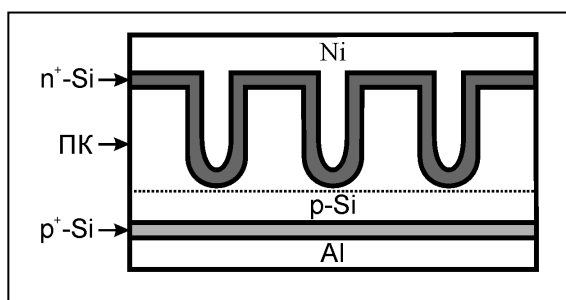


Рис. 2. Схематическое изображение поперечного сечения бета-преобразователя с $p-n$ -переходом, сформированным в слое макропористого кремния

В данном случае перед диффузией в кремниевой подложке методом электрохимического анодирования был сформирован слой макропористого кремния толщиной 5 мкм, а затем по стенкам пор был сформирован $p-n$ -переход. Такой вид обработки позволяет увеличить эффективную площадь $p-n$ -перехода на 46 % (рис. 2).

2) **Тип 2:** $p-n$ -переход, сформированный в слое макропористого кремния.

Для получения экспериментальных образцов использовали кремниевые пластины марки КДБ-12 с ориентацией (100) и диаметром 100 мм. Пластины были вырезаны из монокристаллических слитков, выращенных методом Чохральского. Слой макропористого кремния толщиной 5 мкм и пористостью 45 % формировался методом электрохимического анодирования в 8 % растворе фтористоводородной кислоты в диметилсульфосиде (ДМСО). Диаметр пор составлял 1,5 мкм.

Слой никеля осаждался на пористый кремний из водного электролита состава $0,6M NiSO_4 \cdot 7H_2O + 0,3M H_3BO_3$ в гальваностатическом режиме при плотности тока 10 mA/cm^2 . Применение данного режима осаждения позволяет заполнять поры в слоях макропористого кремния.

Для получения омического контакта к обратной стороне была проведена имплантация ионов бора для формирования слоя p^+ -типа и напыление алюминия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 приведены вольтамперные характеристики полученных образцов бета-преобразователей.

Из рисунка 3 видно, что вольт-амперные характеристики образца с планарным $p-n$ -переходом и обычным $p-n$ -переходом схожи. Таким образом, слой макропористого кремния не вносит существенного влияния на качество $p-n$ -перехода в лабораторных структурах. Довольно высокое сопротивление структуры обусловлено использованием слаболегированного материала в качестве подложки.

На рисунке 4 приведены участки ВАХ лабораторных образцов под облучением.

Напряжения холостого хода для обоих образцов практически совпадают и составляют 118 мВ для образца с планарным $p-n$ -переходом и 123 мВ для образца со слоем макропористого кремния. В то же время, плотность тока короткого замыкания различна и составляет 13 и 18 нА/см² соответственно. Разница составляет 38 %, что хорошо согласуется с оценкой увеличения эффективной площади образца со слоем макропористого кремния на 46 %.

Если принять фактор заполнения равным 0,5, то можно оценить максимальную мощность образцов, используя их вольтамперные характеристики. Максимальная удельная мощность для образца с планарным $p-n$ -переходом составляет 0,5 нВт/см². Для образца со слоем макропористого кремния максимальная удельная мощность составляет 0,75 нВт/см².

Таким образом, введение в конструкцию образца слоя макропористого кремния позволяет увеличить активную площадь поверхности, и как следствие, увеличить удельную мощность устройства на 50 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были изготовлены 2 типа бета-преобразователей и исследованы их электрические характеристики. Установлено, что эффективность устройств на основе макропористого кремния значительно превосходит таковую для планарных конструкций. Данные устройства могут использо-

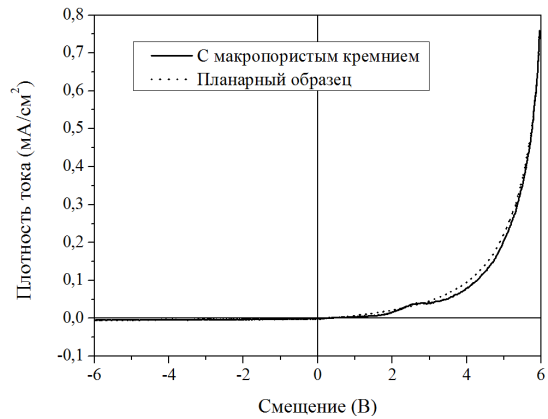


Рис. 3. Вольтамперные характеристики лабораторных образцов бета-преобразователей

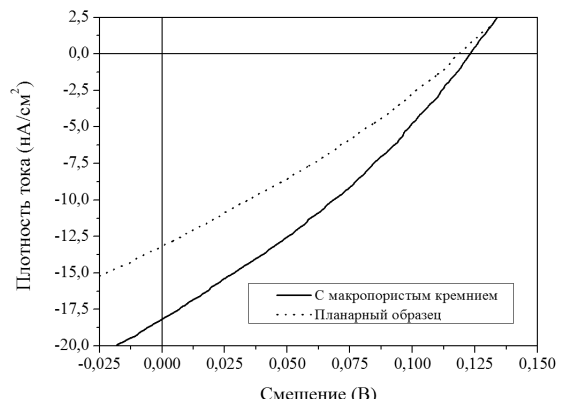


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики лабораторных образцов бета-преобразователей под облучением

ваться в приборах, работающих длительное время автономно и не требующих большой мощности источника питания. Ввиду простоты предложенной конструкции возможно проведение исследований, направленных на ее усложнение для увеличения выходной мощности приборов.

Работы проводились в рамках задания «Нанотех 4,15» ГКПНИ «Нanomатериалы и нанотехнологии».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rappaport, P.* The Electron-Voltaic Effect in *p-n* Junctions Induced by Beta-Particle Bombardment / P. Rappaport // Phys. Rev. 1954. V. 93. P. 246.
2. *Rappaport, P.* Radioactive battery employing intrinsic semiconductor / P. Rappaport // US Patent 2,745,973. 1956.
3. *Резнев, А. А.* Перспективы создания миниатюрного источника тока на бета-вольтаическом эффекте с использованием в качестве активного элемента изотопа никеля-63 / А. А. Резнев [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2009. №3. С. 14.