

Исследование свойств полупроводниковых преобразователей на основе кремния для бета-вольтаических элементов

© М.А. Поликарпов⁺, Е.Б. Якимов^{*#†}

⁺ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

^{*} Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия

[#] Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,
119049 Москва, Россия

(Получена 20 октября 2014 г. Принята к печати 5 ноября 2014 г.)

Проведено экспериментальное исследование кремниевых $p-i-n$ -диодов в растровом микроскопе в условиях, имитирующих бета-излучение из радиоактивного источника Ni^{63} с активностью 10 мКи/см^2 , оценены достижимые параметры бета-вольтаических элементов с таким источником и преобразователем энергии бета-частиц в электрический ток на основе кремния. Показано, что мощность таких элементов может достигать значений $\sim 10 \text{ нВт/см}^2$ даже при сантиметровой площади элемента, что достаточно близко к расчетному значению.

1. Введение

Бета-вольтаические элементы на основе изотопа Ni^{63} с периодом полураспада 100 лет весьма перспективны в качестве долгоживущих источников тока для целого ряда применений. В качестве одного из перспективных направлений их использования можно рассматривать их применение в распределенных источниках питания в микроэлектронных и микроэлектромеханических устройствах, при этом слой радиоактивного Ni может одновременно служить для электрического соединения элементов. Важной составляющей таких элементов, помимо радиоактивного источника электронов, является полупроводниковая структура, преобразующая энергию излученных электронов в ток. При взаимодействии электронов с твердыми телами от 30 до 50% энергии, в зависимости от плотности материала, уносится обратно рассеянными электронами. Кроме того, электроны внутри твердых тел участвуют в различных процессах рассеяния, в результате чего только примерно треть поглощенной энергии идет на рождение электронно-дырочных пар, разделение которых в области пространственного заряда $p-n$ -перехода или барьера Шоттки и приводит к появлению тока во внешней цепи. Таким образом, эффективность преобразования в любом случае не может превысить 25–30% и при разработке полупроводникового преобразователя необходимо наиболее эффективно использовать эту часть энергии. Теоретические оценки показывают, что для наиболее эффективного преобразования энергии необходимо использовать широкозонные материалы, однако в реальности это далеко не всегда так, поскольку характеристики полупроводниковых структур, изготовленных на основе широкозонных материалов, в частности ток утечки, могут заметно отличаться от теоретических значений. Параметры же структур на основе кремния могут достигать значений,

близких к теоретическим. Кроме того, структуры на основе кремния намного дешевле, в настоящее время кремний является основным материалом для изготовления микроэлектронных и микроэлектромеханических устройств и поэтому более предпочтителен для изготовления распределенных источников питания. В этой связи и представляет интерес оценить возможности β -вольтаического элемента с металлическим источником β -частиц и полупроводниковым преобразователем на основе кремния. Наиболее перспективным источником β -излучения в таких устройствах является Ni^{63} . Расчеты тока, индуцированного в структуре на основе Si , при излучении из Ni^{63} с учетом реального спектра электронов, углов вылета и поглощения в пленке Ni проведены в [1,2]. Однако для расчета мощности, которая может быть получена с помощью преобразователя на основе Si , необходимо рассчитать или измерить напряжение холостого хода и коэффициент заполнения.

В настоящей работе для нескольких структур на основе кремния измерены напряжение холостого хода и коэффициент заполнения в условиях, соответствующих излучению из коммерческих источников с Ni^{63} . Эти данные позволяют оценить возможные параметры β -вольтаических элементов с радиоактивным источником Ni^{63} и преобразователем на основе кремния в широком диапазоне температур.

2. Методика

Как показали расчеты, проведенные в [2], для любой ширины области пространственного заряда и любой толщины пленки Ni (источника) можно подобрать энергию электрона в растровом электронном микроскопе (РЭМ), при которой зависимость индуцированного моноэнергетическим пучком тока от диффузионной длины в полупроводниковом преобразователе практически не отличается от соответствующей зависимости для

[†] E-mail: yakimov@iptm.ru

β -вольтаического элемента. Поскольку целью настоящей работы является оценка предельных значений полупроводниковых преобразователей на основе кремния, использовались структуры, в которых диффузионная длина превышала 50 мкм, при этом практически все неравновесные носители заряда, генерированные при облучении быстрыми электронами, вносят вклад в индуцированный ток. В этом случае энергия пучка, используемая в РЭМ для имитации β -излучения, в случае толстых (толщиной 40–50 мкм) структур не очень важна и единственным параметром для подгонки становится индуцированный ток. Как было показано в [2], для пленки Ni толщиной 3 мкм, при которой активность источника уже практически насыщается, и активности источника, равной 10 мКи/см², что примерно соответствует активности коммерчески доступных источников β -излучения с Ni⁶³, для структуры на основе кремния и площади источника 1 см² индуцированный ток равен $1.33 \cdot 10^{-7}$ А.

При возбуждении электронным пучком при указанных выше условиях были измерены вольт-амперные характеристики для ряда кремниевых структур, в результате чего было отобрано несколько $p-i-n$ -диодов площадью 0.64 см², на которых были получены максимальные значения напряжения холостого хода U_{oc} . Далее измерения проводились на этих диодах. Для измерений в РЭМ использовалась энергия пучка 25 кэВ и ток пучка $1.35 \cdot 10^{-11}$ А, при котором величина индуцированного тока равнялась $8.5 \cdot 10^{-8}$ А (что соответствовало $1.33 \cdot 10^{-7}$ А/см²). Затем в измерительную цепь вводилось переменное сопротивление и при его увеличении измерялись ток в цепи и падение напряжения на этом сопротивлении. Для сравнения были исследованы несколько диодов Шоттки Ni/n-SiC площадью 0.03 см² при токе пучка $1.5 \cdot 10^{-9}$ А, что соответствует току β -вольтаического элемента той же площади с активностью источника 10 мКи/см².

Для расчета значений напряжения холостого хода, тока короткого замыкания (I_{sc}) при максимальной мощности и коэффициента заполнения (FF) использовались выражения, приведенные в [3].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена вольт-амперная характеристика диода при его возбуждении электронным пучком. Видно, что коэффициент заполнения FF , т.е. отношение максимальной мощности к произведению ($I_{sc}U_{oc}$), достаточно мал. Для лучшего из исследованных диодов он составлял 0.58. Такое низкое значение коэффициента заполнения наблюдалось в других работах [4,5] и вполне соответствует теоретическим оценкам. Столь низкое значение коэффициента заполнения (в солнечных элементах на основе кремния он достигает значений 0.8–0.9) объясняется тем, что уровень возбуждения в β -элементе на много порядков ниже, чем уровень возбуждения при освещении солнечным све-

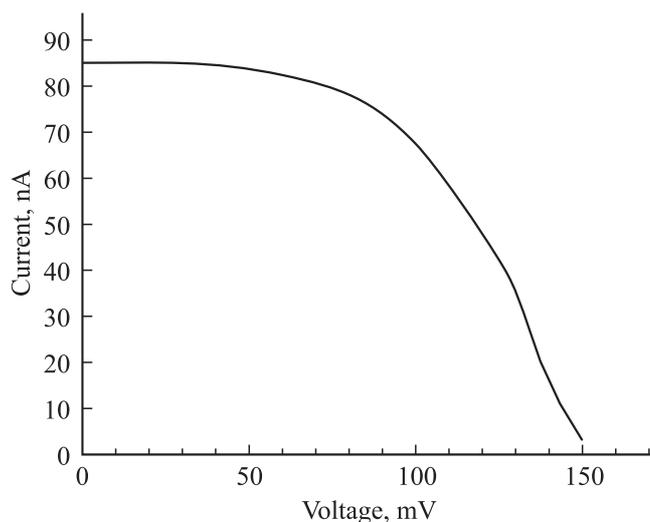


Рис. 1. Типичная вольт-амперная характеристика кремниевого $p-i-n$ -диода при его облучении в РЭМ в условиях, имитирующих β -излучение из источника с активностью 10 мКи/см².

том. При исследовании структур были получены следующие значения: $I_{sc} = 1.33 \cdot 10^{-7}$ А/см², напряжение холостого хода $U_{oc} = 150$ мВ и максимальная мощность $P_{max} = 1.16 \cdot 10^{-8}$ Вт/см². Эффективность преобразования в этих условиях составила 2.5%. Проведенные нами оценки показывают, что максимальные значения напряжения холостого хода и коэффициента заполнения в условиях нашего эксперимента могут достигать значений ~ 200 мВ и ~ 0.7 соответственно. При этом максимальная мощность $P_{max} = 1.86 \cdot 10^{-8}$ Вт/см², что превышает измеренное значение всего в 1.6 раза. Из этого следует, что на кремниевых структурах вполне могут быть достигнуты параметры, близкие к теоретическим, даже на структурах достаточно большой площади, и полученные результаты близки к предельным значениям для кремния при использовании источника с активностью 10 мКи/см².

Поскольку β -вольтаические элементы в принципе могут работать как при экстремально низких, так и при экстремально высоких температурах, представляло интерес исследовать зависимость характеристик полупроводникового преобразователя от температуры. Результаты таких измерений приведены на рис. 2. Видно, что при понижении температуры значение максимальной мощности возрастает примерно в 1.5 раза при 0°C и в 2.2 раза при -20°C, что объясняется уменьшением с понижением температуры тока утечки. При повышении температуры значение максимальной мощности быстро понижается, так при 40°C оно уменьшается в 2.6 раза по сравнению со значением при комнатной температуре. Для сравнения на рис. 2 приведены температурные зависимости максимальной мощности, измеренной на барьере Шоттки Ni/n-SiC. Видно, что при использовании в качестве преобразователя барьера Шоттки на SiC зависимость максимальной мощности от температуры

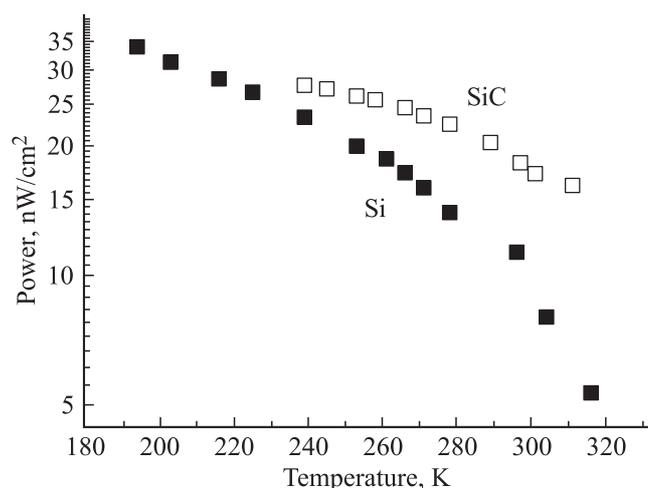


Рис. 2. Экспериментальные температурные зависимости максимальной электрической мощности, генерируемой при облучении в РЭМ $p-i-n$ диода из Si и барьера Шоттки Ni/n-SiC в условиях, имитирующих β -излучение из источника с активностью 10 мКи/см².

более слабая. При комнатной температуре эффективность таких элементов в 1.6 раза выше, чем $p-i-n$ -диода на кремнии, и при повышении температуры это соотношение возрастает. Однако при понижении температуры различие между значениями эффективности преобразователей на основе кремния и SiC уменьшается. Кроме того, следует отметить, что указанные параметры на барьерах Шоттки на основе 4H-SiC были получены на диодах площадью 3 мм². На диодах площадью ~ 1 см² значения напряжения холостого хода даже для самых лучших диодов были значительно (до 2–3 раз) ниже.

Следует также отметить, что хотя максимальная мощность β -элемента с источником Ni⁶³ и преобразователем на основе кремния составляет $\sim 10^{-8}$ Вт/см² при толщине слоя Ni ~ 3 мкм, активность радиоактивного источника не повышается с дальнейшим увеличением толщины из-за поглощения электронов в слое Ni [2]. Как показано в [2], 95% энергии β -излучения поглощается в слое кремния толщиной 10 мкм. Это позволяет, с одной стороны, формировать многоэлементные источники с толщиной отдельного элемента ~ 15 мкм, повышая их суммарную мощность. С другой стороны, излучение практически полностью экранируется слоем кремния 10–15 мкм, а для материалов с большей плотностью эта величина еще меньше. Если учесть, что полная доза излучения от толстой пленки радиоактивного Ni за 100 лет не превысит 0.1 Кл/см² и максимальная энергия подавляющего большинства электронов не превышает 10–15 кэВ, а также то, что значительная часть этого облучения будет поглощена в полупроводниковом преобразователе, радиационными повреждениями можно пренебречь, что позволяет действительно встраивать β -элементы в микросхемы, одновременно используя металлический слой для межсоединений, либо в мик-

роэлектромеханические устройства с низким уровнем электропотребления.

4. Заключение

Таким образом, в работе на основе экспериментального исследования кремниевых $p-i-n$ -диодов в растром электронном микроскопе в условиях, имитирующих β -излучение из радиоактивного источника Ni⁶³ с активностью 10 мКи/см², оценены достижимые параметры β -вольтаических элементов с таким источником и преобразователем энергии β -частиц в электрический ток на основе кремния. Показано, что такие источники могут генерировать ~ 10 нВт/см², однако мощность источника может быть повышена путем создания многоэлементных структур с толщиной отдельного элемента ~ 15 мкм. Показано, что вопреки сложившемуся мнению такие β -элементы вполне могут конкурировать с элементами на основе широкозонных полупроводников, особенно в условиях эксплуатации при пониженных температурах. Проведенные исследования помогут более реально оценить возможные области применения таких источников.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 14-29-04056 в части исследования свойств преобразователя на основе кремния и Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ „МИСиС“ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 гг. (№ K2-2014-055) в части исследования свойств преобразователя на основе широкозонного материала — карбида кремния.

Список литературы

- [1] М.А. Поликарпов, Е.Б. Якимов. Поверхность, № 1, 85 (2013).
- [2] В.Н. Павлов, В.Я. Панченко, М.А. Поликарпов, А.А. Свинцов, Е.Б. Якимов. Поверхность, № 9, 46 (2013).
- [3] S.S. Li. *Semiconductor Physical Electronics* (N.Y., Springer Science+Business Media, LLC, 2006) chap. 12.
- [4] M.V.S. Chandrashekar, C.I. Thomas, H. Li, M.G. Spencer, A. Lal. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 033 506 (2006).
- [5] X.-Y. Li, Y. Ren, X.-J. Chen, D.-Y. Qiao, W.-Z. Yuan. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **287**, 173 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of properties of semiconductor converter based on silicon for beta-voltaic elements

M.A. Polikarpov⁺, E.B. Yakimov^{#}*

⁺ National Research Centre „Kurchatov Institute“,
123182 Moscow, Russia

^{*} Institute of Microelectronics Technology,
Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Russia

[#] National University of Science and Technology
„MISIS“,
119049 Moscow, Russia

Abstract The experimental investigation of silicon based $p-i-n$ diodes in a scanning electron microscope in the conditions imitating beta-radiation from radiation source Ni^{63} with an activity of 10 mCi/cm^2 were carried out. Reachable parameters of beta-voltaic elements consisting of such source and silicon based converter of beta-particle energy in electric current are evaluated. It is shown that a power of such elements can approach the value of 10 nW/cm^2 even for elements with a size in the cm range that is rather close to the calculated value.