

Моделирование бетавольтаического эффекта на кремниевых *pin*-структурах при облучении β -источником никель-63

© Ю.С. Нагорнов*, В.Н. Мурашев⁺

* Тольяттинский государственный университет,
445667 Тольятти, Россия

⁺ Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,
119991 Москва, Россия

E-mail: Nagornov.Yuri@gmail.com

(Получена 13 апреля 2015 г. Принята к печати 13 мая 2015 г.)

Рассмотрены возможности бетавольтаики в качестве источников питания для полупроводниковых схем. Экспериментальные исследования показали существенную роль зарядки поверхности и снижение эдс. Проведено моделирование бетавольтаического эффекта от источника никель-63 для кремниевых *pin*-структур и показано, что коэффициент сбора сгенерированных носителей заряда может достигать значения 13%. Определены дозовые зависимости эффективности работы кремниевых бетавольтаических структур от α - и γ -облучений, показано, что дозы $1.3 \cdot 10^{14}$ и 10^{20} см^{-2} соответственно являются пороговыми, выше которых происходит резкое снижение работоспособности. Определены оптимальные параметры микроканальных структур бетавольтаики, в которых ширина каналов и расстояние между ними соответствуют 3 и 10 мкм.

1. Введение

Миниатюризация полупроводниковых схем и развитие микроэлектромеханических систем привели к понижению энергопотребления. Сейчас наиболее экономные промышленные полупроводниковые микросхемы потребляют порядка 1–10 наноампера в ждущем режиме. В этой связи большой интерес представляет разработка источников электрической энергии на β -изотопах с длительным сроком эксплуатации. Такие источники не требуют подзарядки и могут использоваться в экстремальных условиях Крайнего Севера, космоса, повышенной радиоактивности (в реакторах, хранилищах отходов и т. д.), а также в труднодоступных местах, таких как шахты полезных ископаемых, при глубоководных работах, в пещерах и т. п.

В последних работах по исследованию бетавольтаического эффекта на изотопе никель-63 были достигнуты токи генерации в десятки наноампер, что достаточно близко для коммерческого применения [1–6]. Среди β -источников наиболее интересным с практической точки зрения представляется никель-63. Во-первых, он обладает периодом полураспада, равным 100.1 год, во-вторых, не представляет опасности ни как радиоактивный источник, ни как токсическое вещество, в-третьих, никель является технологическим материалом и легко может быть интегрирован в полупроводниковые структуры. В четвертых, спектр энергии β -частиц имеет максимум в области 17.1 кэВ и ограничен энергией 67 кэВ, что существенно ниже порога дефектообразования кремния (150 кэВ). Таким образом, срок эксплуатации элементов бетавольтаики ограничен только периодом полураспада, так за 30–50 лет в случае деградации только по причине распада изотопа никель-63 ухудшение электрических параметров будет не более чем на 30–40%.

Активность никеля-63 составляет 1–40 мКи/см², однако наиболее распространенными являются источники с активностью 10 мКи/см², интегрируя спектр которых по энергии, можно получить, что выделяемая мощность будет порядка 1 мкВт. Эффективность преобразования энергии β -распада в настоящее время достаточно низка и не превышает 0.3% [3–7]. Низкая эффективность связана с несколькими причинами: неупругое рассеяние β -частиц, поглощение β -частиц в слоях, где не происходит генерации электронно-дырочных пар, рекомбинация носителей заряда и т. д. [8,9]. Действительно, количество электронно-дырочных пар, сгенерированных от одной β -частицы с энергией E , равно E/E_i , где E_i — характеристическая энергия, которая для кремния равна 3.8 эВ. От одной β -частицы никеля-63 в среднем число таких пар составляет 4500–5000. При условии, что все сгенерированные электронно-дырочные пары разделяются полем p - n -перехода и вносят вклад в ток, а напряжение эдс составляет порядка 0.35 В, можно найти, что теоретический предел КПД для кремниевых структур не превышает 10–15%.

Пути поиска повышения эффективности преобразования энергии явились подбор структур с большими ширинами запрещенных зон, чем у кремния. Например, используются p - n -переходы на основе GaN, GaAs и SiC [1,3,7,9], которые позволяют повысить эдс структур по сравнению с кремниевыми структурами. Другим направлением повышения энергоемкости структур является использование структур, в которых увеличена полезная площадь p - n -перехода, например, на микроканальном или пористом кремнии [8,9]. В этом направлении возникают сложности с помещением радиоактивного источника в микроканалы, а также увеличение токов утечки, возникающих вследствие дефектности поверхности после травления. Поэтому, с одной стороны, представляет интерес и является целью на-

стоящей работы моделирование и подбор параметров структур бетавольтаических элементов с топологией, которая собирала бы максимальное число электронно-дырочных пар, с другой — необходимо рассмотреть полученные экспериментальные данные в предыдущих работах, чтобы учесть все эффекты, которые возникают в $p-n$ -переходе при облучении β -частицами никель-63.

2. Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования бетавольтаического эффекта на γ -источнике никель-63 проводятся по двум направлениям — разработка миниатюрных структур для МЭМС и повышение КПД pin -структур. Если при миниатюризации структур на первый план выходит задача совмещения изотопа с $p-n$ -переходом в микроканалах или гетероструктурах [8,9], то при повышении КПД необходимо добиться токов генерации, приемлемых для коммерческого использования в микроэлектронике.

Так, в работе [7] была исследована работа бетавольтаической ячейки на основе $4H-SiC$ с применением изотопа никель-63 активностью 1 мКи. В результате на $p-n$ -диоде были получены ток короткого замыкания 42 пА и эдс 0.72 В (рис. 1). В наших предыдущих работах [4,10] при активности источника 40 мКи ток короткого замыкания составил 80–100 нА и эдс 20 мВ. В работе [6] были получены несколько лучшие значения коэффициента сбора носителей заряда (рис. 1), однако токи не превышали 3 нА при активности источника 2 мКи. На рис. 1 результаты экспериментальных исследований для сравнения представлены в нормированном виде — зависимости коэффициента сбора сгенерированных носителей заряда от напряжения. Коэффициент сбора (рис. 1) рассчитывался как отношение тока генерации к максимально возможному току при данном уровне облучения β -частицами, т.е. коэффициент $K = I_g / (4500 \cdot e \cdot A)$, где I_g — ток генерации, e — заряд электрона, A — активность источника никель-63, при этом учтено, что среднее число электронно-дырочных пар от одной β -частицы примерно равно 4500.

Наиболее интересные результаты были получены при исследовании влияния длительного воздействия β -излучения активностью 20 мКи на генерацию тока и эдс [5]. Ток генерации составлял 40–50 нА и не деградировал более года, при этом напряжение эдс уменьшалось более чем в 3 раза за первые 15 сут, затем испытывало скачки в диапазоне 6–17 мВ. Учитывая, что интенсивность излучения никелем-63 отрицательно заряженных β -частиц составляет примерно 10 мкКл в сутки, данный эффект связывают с зарядкой поверхности образца. Численная оценка накопленного заряда на границе в течение первых десяти суток дает значение порядка 10^{-10} С, что приблизительно равно $1/10^5$ от всех β -частиц, попавших за это время на образец [5].

Для повышения эффективности бетавольтаического преобразования энергии в настоящей работе были ре-

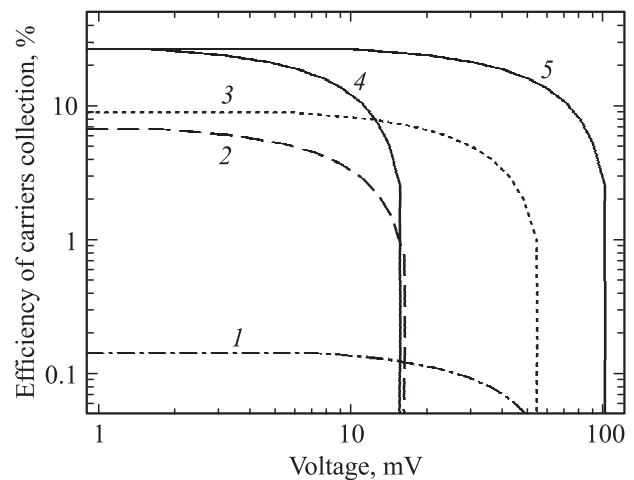


Рис. 1. Зависимость коэффициента сбора носителей заряда от напряжения по данным различных авторов: 1 — работа [7], 2 — работа [10], 3 — работа [6], а также данные настоящей работы для pin -диодов с геттером (5) и без него (4).

ализованы pin -структуры двух типов — с геттером на границе с p -слоем и без него. Формирование геттера было реализовано по технологии, описанной в работе [11], и было необходимо для достижения двух целей — уменьшения токов утечки и уменьшения концентрации ловушек для зарядов на границе с p -слоем, что обеспечивало условия стока заряда обратно на пластину никель-63 через контактную площадку. Видно (рис. 1, кривые 4 и 5), что образцы с геттером показывают не только высокие значения токов генерации, но и эдс, а также не подвержены зарядке в процессе длительного (несколько дней) облучения под действием β -изотопа. При этом токи генерации для структур с геттером и без оказываются одинаковыми, а напряжение эдс отличается в 6.5 раза.

Анализ экспериментальных данных показал, что при моделировании бетавольтаического эффекта необходимо учитывать не только генерационно-рекомбинационные процессы в области пространственного заряда (ОПЗ), а также процессы зарядки и ее влияния на встроенное поле ОПЗ, его ширину и на диффузионные процессы вблизи положительно заряженного β -источника никель-63.

3. Моделирование генерации тока

Наиболее простым является моделирование генерационно-рекомбинационных процессов в ОПЗ $p-n$ -перехода и расчет коэффициента сбора носителей заряда. Оценку влияния зарядки на эдс и ток генерации можно сделать на основании результатов расчета генерации тока в ее отсутствии. В соответствии с моделью, развитой в работах [4,10], ток генерации в области пространственного заряда определяется из решения системы уравнений

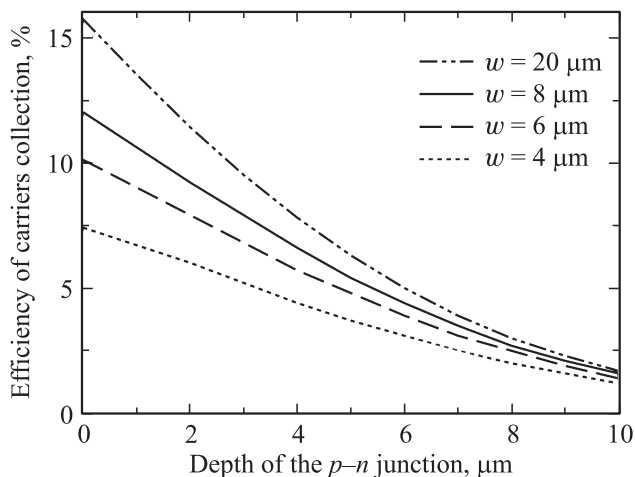


Рис. 2. Зависимость коэффициента сбора сгенерированных носителей заряда от глубины залегания *p-n*-перехода для разной ширины ОПЗ, которая варьировалась в диапазоне 4–20 мкм и указана рядом с графиком.

непрерывности и выражения для плотности тока:

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = -\text{div } \mathbf{j} - nR + G \\ \mathbf{j} = e\mu n\mathbf{E} - eD\nabla n \end{cases}, \quad (1)$$

где n — концентрация сгенерированных электронов, R — коэффициент рекомбинации, G — коэффициент генерации электронов, взятый в виде полинома от расстояния до β -источника [4,10] и учитывающий поглощение β -частиц в кремнии, их угловое распределение и энерговыделение, \mathbf{j} — плотность тока, μ — подвижность носителей заряда, E — величина встроенного поля ОПЗ, e — заряд электрона, D — коэффициент диффузии.

Уравнение решалось в области пространственного заряда численным методом с использованием неявной схемы при нулевых граничных условиях. На основе полученной модели был рассчитан ток генерации и коэффициент сбора сгенерированных носителей заряда η для структур с различной шириной ОПЗ w и глубиной залегания *p-n*-перехода d от β -источника изотопа ^{63}Ni (рис. 2). При этом коэффициент рекомбинации соответствовал времени жизни 5.7 мкс, а встроенное поле менялось линейно и определялось из контактной разности потенциала и ширины ОПЗ.

Результаты моделирования свидетельствуют, что глубина залегания перехода влияет на ток генерации существенно больше, чем ширина ОПЗ, при условии, что ширина ОПЗ больше 4 мкм [4,10]. Для создания структуры с максимальным коэффициентом сбора носителей заряда необходимо, чтобы глубина залегания перехода была как можно меньше, ширина области генерации носителей заряда была порядка нескольких микрометров и залегала в области максимальной генерации. В работах [4,12] показано, что скорость генерации G практически экспоненциально убывает с расстоянием

от β -источника. С одной стороны, глубина проникновения β -частиц никеля-63 с энергией до 67 кэВ может достигать значений более 30 мкм, а с другой стороны, учитывая угловое распределение β -частиц и их спектр с максимумом 17.1 кэВ, оказалось что 60–80% сгенерированных носителей заряда в кремнии возникают на глубине не более 10–15 мкм, а после 20 мкм генерации носителей практически не происходит. Именно поэтому эффективный сбор носителей заряда происходит при глубинах залегания *p-n*-перехода не более 10–15 мкм.

В работах [4,5,10] были использованы твердотельные β -источники активностью 10–40 мКи и образцы *pin*-диодов двух типов: А — с глубиной залегания *p-n*-перехода 1.2 мкм и шириной ОПЗ 8 мкм, В — с глубиной залегания *p-n*-перехода 6.5 мкм и шириной ОПЗ 3.6 мкм. Как показали измерения [5,10], коэффициент сбора изменялся не линейно при увеличении активности β -источника от 10 до 40 мКи: для структур типа А — от 3.8 до 9.4%, а для структур типа В — от 5.7 до 3.6%. В соответствии с полученными численными результатами (рис. 2) коэффициент сбора для структуры А равен 10.5%, а для структуры В — 3.5%, что близко к экспериментальным значениям. Видно, что экспериментальные значения лежат как выше расчетных, так и ниже, что может быть связано как с явлением зарядки, так и с генерацией тока в области, лежащей на расстоянии длины свободного пробега от границ ОПЗ.

Структуры, полученные в настоящей работе, с коэффициентом сбора 28%, имеют ширину ОПЗ 19–20 мкм и глубину залегания *p-n*-перехода 0.5–0.7 мкм. При этом экспериментальные значения превышают численные (15%) почти в 2 раза, что можно объяснить двумя причинами. Во-первых, дополнительной генерацией носителей заряда в области вблизи ОПЗ, что существенно при больших временах жизни и длине свободного пробега. Во-вторых, заявленная активность источника β -изотопа может отличаться от фактической, поскольку определяется временем электрохимического осаждения изотопа на пластину никеля и зависит от условий осаждения. Таким образом, по порядку величины численный расчет соответствует экспериментальным данным, полученным на различных образцах, и позволяет определить способы повышения КПД структур. Так, на рис. 2 видно, что глубина залегания *p-n*-перехода не должна превышать 1–2 мкм, поскольку в верхних слоях происходит поглощение β -частиц, что уменьшает коэффициент сбора носителей заряда.

Реализация неглубоких *p-n*-переходов — технологически решенная задача, однако создание *pin*-структур с широкой ОПЗ зависит от качества кремниевой подложки и технологии ее обработки. При применении механической шлифовки или электрохимического травления собственного полупроводника могут возникать дефекты на поверхности и трещины, которые существенно уменьшают длину свободного пробега и увеличивают токи утечки, что резко снижает эффективность бетавольтаического преобразования. Именно этот аспект существен-

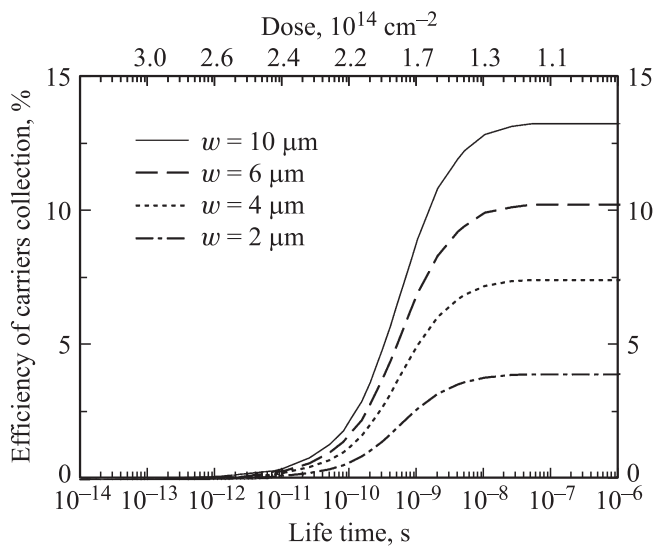


Рис. 3. Зависимость коэффициента сбора сгенерированных носителей заряда от времени жизни для разной ширины ОПЗ w (указана на графике). Верхняя ось показывает дозу α -облучения кремниевой подложки.

но сокращает возможности технологических операций по обработке собственного кремния для бетавольтаики.

При использовании бетавольтаических элементов в условиях повышенной радиации возникает задача моделирования снижения эффективности КПД за счет уменьшения времени жизни носителей заряда под действием радиации, что в будущем определит срок эксплуатации таких элементов. На рис. 3 приведены данные моделирования эффективности сбора носителей от времени жизни и дозы α -облучения с энергией 5.4 МэВ. При этом зависимость времени жизни от дозы была взята в виде $\tau [\text{с}] = 5.6 \cdot 10^{-3} \exp(-8.12 \cdot 10^{-14} F [\text{см}^2])$ [13].

Видно, что до доз α -облучения $1.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ изменений в эффективности бетавольтаического преобразования не происходит, при этом время жизни носителей заряда уменьшается до значений 10^{-8} с, соответственно длина свободного пробега электронов уменьшается до 6 мкм, т.е. до значений порядка ширины ОПЗ. При увеличении дозы облучения наблюдается резкое снижение эффективности сбора носителей заряда и при длине свободного пробега 0.6 мкм (времени жизни 10^{-10} с) генерации электрической энергии практически не происходит.

В случае облучения γ -квантами, например, от источника кобальт-60 уменьшение времени жизни до значений 10^{-9} – 10^{-10} с будет достигаться при дозах 10^{20} – 10^{22} см^{-2} [14]. γ -облучение может быть существенным препятствием на пути использования бетавольтаики в космических исследованиях, поскольку γ -лучи обладают высокой проникающей способностью и составляют срок эксплуатации бетавольтаических элементов будет

определяться не периодом полураспада никель-63, а поглощенной дозой внешнего радиоактивного излучения.

Для оценки влияния зарядки на эффективность сбора носителей заряда воспользуемся полученными результатами расчетов. Как показало моделирование, изменение контактной разности потенциалов на величину зарядки, наблюдаемую в эксперименте, не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на ток генерации в ОПЗ. При этом очевидно, что изменение потенциала на поверхности одного из контактов приведет к соответствующему изменению эдс. Одновременно с этим зарядка поверхности пластины никеля-63 будет создавать электрическое поле в верхнем слое p - n -перехода и частично уменьшать генерацию за счет снижения диффузионного потока в ОПЗ. Учитывая, что длина свободного пробега в собственном кремнии достаточно большая — единицы микрометров, а генерация носителей заряда происходит неравномерно, в верхнем p -слое p - n -перехода возникает диффузионный профиль, который создает диффузионный поток в ОПЗ, и на длину свободного пробега оказывает существенное влияние ток генерации.

Положительная зарядка пластины никеля-63 создает электрическое поле, которое будет препятствовать диффузионному потоку, уменьшая его вклад в ток генерации и коэффициент сбора носителей заряда. Именно поэтому с ростом активности β -источника, а соответственно и с ростом потенциала зарядки, происходит замедление роста тока генерации. Единственным приемлемым решением для устранения отрицательного влияния зарядки на ток генерации и потенциал эдс является создание каналов стока заряда с кремниевой подложки на пластину никеля-63 при помощи контакта, например, через контактную площадку из подслоя титана или алюминия с p^+ -областью p - n -перехода.

В настоящее время наиболее перспективным способом увеличения эффективности бетавольтаического преобразования энергии является использование 3D структур и, в частности, микроканальных структур с развитой поверхностью, которые позволяют увеличить площадь p - n -перехода и эффективность сбора носителей заряда [8,9].

4. Микроканальные структуры на никеле-63

Технологическая перспектива создания бетавольтаических элементов на основе микроканального кремния с заполнением каналов изотопом никель-63 позволяет провести расчет эффективности подобных структур. Для определенности примем модель микроканальной структуры бетавольтаического элемента, показанного на рис. 4, где l_c — длина каналов, равная размеру образца, h_c — глубина каналов, d_c — ширина каналов, в которые помещен β -источник никель-63, а w_c — расстояние между каналами, контактные площадки и области механического крепления не показаны. Понятно, что наибо-

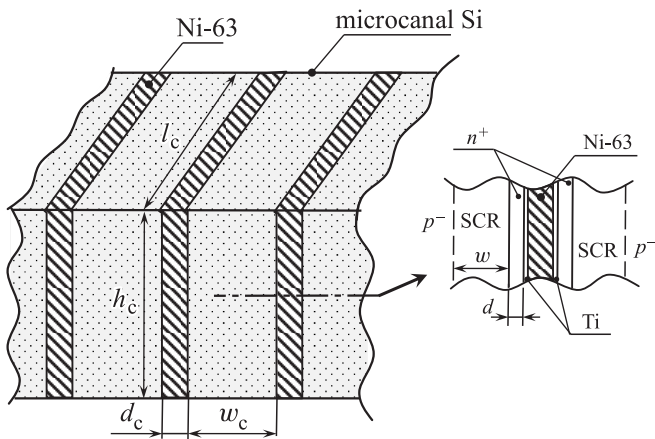


Рис. 4. Структура бетавольтаического элемента на микроканальном кремнии и β -источнике никель-63.

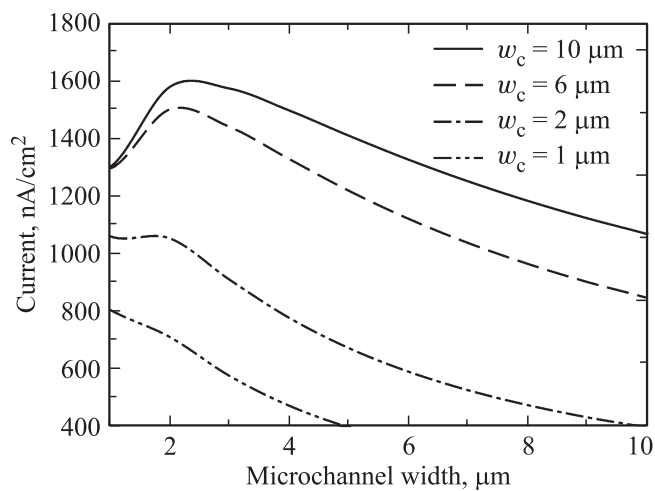


Рис. 5. Зависимость тока, генерируемого в микроканалах, в зависимости от ширины микроканала d_c при различных расстояниях между каналами w_c .

лее эффективные структуры будут содержать наиболее глубокие каналы, поэтому этот параметр можно исключить из подбора, приняв h_c равным 400 мкм и считая, что каналы проходят насквозь всю пластину кремния (щелевая технология). В результате варьируемыми параметрами будут ширина микроканала и расстояние между ними. Здесь существует несколько ограничений. С одной стороны, с уменьшением ширины каналов и расстояния между ними происходит рост удельной поверхности структуры, в которой генерируются носители заряда, а с другой — при достижении толщины каналов менее 3 мкм происходит уменьшение активности β -источника в канале, поскольку глубина выхода β -электронов из канала составляет 3.8 мкм [12,15].

Необходимо также учитывать, что эффективная генерация в $p-n$ -переходе происходит в ОПЗ шириной более 4 мкм (рис. 2), что накладывает естественное условие, что ширина ОПЗ равна половине расстояния

между каналами, т.е. $w = 0.5w_c$, что принималось во всех дальнейших расчетах. При расчете тока генерации элементов питания на основе микроканального кремния учитывались следующие параметры: ширина ОПЗ w , активность β -источника, зависящая от ширины канала, удельная площадь, при этом глубина залегания $p-n$ -перехода считалась минимальной.

На планарных структурах были достигнуты токи генерации порядка 80–90 нА/см² при активности изотопа 40 мКи/см² [4,5]. Для сравнения с полученными экспериментальными результатами были рассчитаны токи генерации микроканальных структур из условия, что используется изотоп никель-63 такой же удельной активности. Результаты численных расчетов представлены на рис. 5, из которого видно, что наиболее эффективной структурой с максимальным током генерации 1600 нА/см² является структура с минимальным значением ширины микроканала 2–3 мкм и расстоянием между каналами, равным 10 мкм. Полученные зависимости объясняются результатами предыдущих расчетов (рис. 2). С ростом расстояния между каналами происходит рост ширины ОПЗ, соответственно увеличение тока генерации, что наиболее заметно до расстояний между каналами 6 мкм. Затем рост ширины ОПЗ не играет существенной роли, а падение удельной площади поверхности микроканалов начинает уменьшать ток генерации. В результате дальнейшего увеличения расстояния между каналами приведет к резкому снижению тока генерации из-за уменьшения удельной поверхности.

Из рис. 5 также видно, что при расстоянии между микроканалами более 3 мкм зависимость тока генерации от ширины микроканала имеет ярко выраженный максимум в районе $d_c = 2-3$ мкм. Наличие максимума определяется двумя зависимостями: с одной стороны, с уменьшением d_c растет эффективная площадь, а с другой — с уменьшением d_c менее 3 мкм экспоненциально снижается активность β -источника никель-63 в микроканалах. Полученные значения ширины канала и расстояния соответствуют наиболее оптимальному соотношению никеля-63 и микроканального кремния с точки зрения эффективности преобразования β -излучения.

5. Заключение

В работе проведено исследование и моделирование бетавольтаического эффекта на кремниевых *pin*-структурах и β -источнике никель-63. Продемонстрирована возможность получения кремниевых *pin*-структур с коэффициентом сбора носителей заряда, равным 28%. Проведено моделирование бетавольтаического эффекта, которое согласуется с экспериментальными данными и позволило оценить влияние различных параметров на КПД структур.

Показано также, что срок эксплуатации бетавольтаических элементов будет зависеть не только от периода

полураспада изотопа, но и от поглощенной дозы внешнего излучения. При этом изменения в эффективности бетавольтаического преобразования происходят при дозах α -облучения более $1.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, в результате чего время жизни носителей заряда уменьшается до значений $10^{-9} - 10^{-10} \text{ с}$. Как показал расчет, в случае облучения γ -квантами от источника кобальт-60 уменьшение времени жизни и соответствующее снижение эффективности будет происходить при дозах $10^{20} - 10^{22} \text{ см}^{-2}$.

Моделированием бетавольтаического эффекта на микроканальных кремниевых структурах была показана возможность генерации токов до значений 1600 нА/см^2 . При этом оптимальным соотношением радиоактивного изотопа и кремния в микроканальных структурах является величина Ni-63 : Si = 3 : 10 по объему.

Список литературы

- [1] M. Lu, G. Zhang, K. Fu, G. Yu, D. Su, J. Hu. *Energy Conversion and Management*, **52** (4), 1955 (2011).
- [2] Sh. Yao, Z. Song, X. Wang, H. San, Yu. Yu. *Appl. Radiation and Isotopes*, **70** (10), 2388 (2012).
- [3] H. Chen, L. Jiang, X. Chen. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44** (21), 215303 (2011).
- [4] Ю.С. Нагорнов. *Современные аспекты применения бетавольтаического эффекта* (Ульяновск, УлГПУ, 2012).
- [5] Ю.С. Нагорнов, В.М. Радченко, Е.С. Пчелинцева, В.В. Светухин, Б.М. Костишко, В.Д. Рисованный. *Изв. вузов. Электроника*, № 1, 90 (2011).
- [6] H. Guo, A. Lal. *The 12th Int. Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems* (Boston, USA, 2003) p. 36.
- [7] M.V.S. Chandrashekhar. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 033506 (2006).
- [8] J.P. Clarkson, W. Sun, K.D. Hirschman, L.L. Gadeken, P.M. Fauchet. *Phys. Status Solidi A*, **204** (5), 1536 (2007).
- [9] M.V.S. Chandrashekhar, Ch.I. Thomas, M.G. Spencer. *USA Patent*. US7939986B2 (2011).
- [10] Ю.С. Нагорнов, Е.С. Пчелинцева, В.М. Радченко, Б.М. Костишко, В.В. Светухин, В.Д. Рисованный. *Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектрон. аппаратуру*, № 1, 65 (2011).
- [11] А.В. Зеленцов, З.М. Поварницына, Е.С. Сельков, В.Д. Ходжаев, А.И. Черный, В.П. Яромский. *Патент РФ № 2308119 от 10.10.2007* (2007).
- [12] В.Н. Павлов, В.Я. Панченко, М.А. Поликарпов, А.А. Свинцов, Е.Б. Якимов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 9, 46 (2013).
- [13] С.В. Булярский, В.М. Радченко, О.В. Скаляух. *Изготовление и применение источников альфа-излучения* (Ульяновск, УлГУ, 2005).
- [14] О.К. Барановский, П.В. Кучинский, В.М. Лутковский, А.П. Петрунин, Е.Д. Савенок. *ФТП*, **35** (3), 352 (2001).
- [15] С.И. Зайцев, В.Н. Павлов, В.Я. Панченко, М.А. Поликарпов, А.А. Свинцов, Е.Б. Якимов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 9, 9 (2014).

Редактор А.Н. Смирнов

Simulation of betavoltaic effect on silicon *pin*-structures under irradiation from β -source of nickel-63

Yu.S. Nagornov*, V.N. Murashev+

* Togliatti State University,
445667 Togliatti, Russia

+ National research technological University „MISIS“,
119991 Moscow, Russia

Abstract We discussed the possibilities of betavoltaics as power sources for semiconductor circuits. Experimental studies have shown a significant role charging surface and reducing electromotive force. Betavoltaics effect under source of nickel-63 was simulated for silicon *pin*-structures and we showed that the efficiency of carrier collection can reach value 13%. The dose dependence of the efficiency of silicon structures under alpha and gamma irradiation are defined and it was shown that dose of $1.3 \cdot 10^{14}$ and 10^{20} см^{-2} , respectively, are threshold above which there is a sharp reduced efficiency. We calculated the optimal parameters of the betavoltaics microchannel structures in which the width of the channel and the distance between them corresponds to 3 and $10 \mu\text{m}$.