

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНОГО КРЕМНИЯ И БЕТА-ИСТОЧНИКА НИКЕЛЬ-63

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для полупроводниковых приборов нового поколения необходимы миниатюрные источники электрического питания, работающие достаточно продолжительное время и обладающие малыми габаритами. Внедрение планарных структур с радиационно-стимулированными элементами питания возможно в области, где традиционные источники энергии не доступны. Например, датчики утечки газа в шахтах, глубоководные элементы контроля, подземные датчики и т.д. В связи с этим разработка эффективного и коммерчески привлекательного источника энергии на основе бета-источников представляется актуальной задачей. Бета-источник никель-63 обладает огромным периодом полураспада (100,1 года) и достаточно высокой активностью, поэтому применение изотопа никеля позволит создать принципиально новые планарные элементы и датчики. Одним из наиболее интересных способов увеличения эффективности является применение микроканального кремния, в поры которого помещен бета-источник. Расчету эффективности элементов питания на микроканальном кремнии и бета-источнике на основе никеля-63 посвящена настоящая работа. *Материалы и методы.* В работе принята следующая модель микроканального радиационно-стимулированного источника тока. Каналы в кремнии проходят вдоль всего образца, что проще создать технологически и не изменяет логики расчетов. При этом все каналы имеют одинаковые размеры глубиной h и шириной l , а также периодически отстоят друг от друга на расстоянии m . Понятно, что наиболее эффективные структуры будут содержать наиболее глубокие каналы, поэтому этот параметр можно исключить из подбора, приняв h равным 400 мкм – максимальной глубине, доступной современной технологии. В настоящее время соотношение ширина/глубина также определяется технологией травления, но в наших расчетах примем, что оно независимо, поскольку технология ионного и электрохимического травления развивается достаточно быстро. Метод для расчета тока генерации численный. *Результаты.* Задача расчета эффективности является многопараметрической, поэтому для анализа полученных результатов были построены зависимости тока генерации от параметров структуры. Были получены зависимости тока генерации от геометрических параметров микроканального кремния. Оказалось, что оптимальное значение ширины канала l лежит в районе 2,5 мкм, при этом с ростом расстояния между каналами m происходит выход на насыщение тока генерации. С точки зрения эффективности оптимальными параметрами модельной структуры являются ширина микроканала, равная 2,5–3 мкм и расстояние между каналами, равное 10–12 мкм. *Выводы.* Рассмотрена возможность создания радиационно-стимулированных элементов на основе микроканального кремния с помещенным бета-источником в микроканалы. В качестве бета-источника взят никель-63 с активностью 40 мКи/см². Показана технологическая готовность современного производства к созданию подобных структур на основе вертикальных p - n -переходов. Проведенный расчет эффективности этих структур показал, что токи генерации могут быть достигнуты в 1600 нА/см², что в 20 раз больше, чем тот же показатель у монокристаллических структур.

Ключевые слова: бетавольтаический эффект, эффективность элементов питания, микроканальный кремний, макропористый кремний.

THE CALCULATION OF THE EFFICIENCY OF BATTERIES BASED ON MICROCHANNEL SILICON AND NICKEL-63 AS A BETA-SOURCE

Abstract. *Background.* Semiconductor devices of the new generation require miniature sources of electric power that work for quite a long time and have small dimensions. The introduction of planar structures with radiation-stimulated batteries is possible in the area where traditional sources of energy are not available. For example, gas leak detectors in mines, deep-water control elements, underground sensors, etc. In this regard, the development of an effective and commercially attractive source of energy based on beta sources is an urgent task. Nickel-63 as a beta source has a very long half-life (100.1 years) and relatively high activity, so the use of nickel isotope will create fundamentally new planar elements and sensors. One of the most interesting ways of increasing efficiency is the use of microchannel silicon, into the pores of which a beta source is placed. The present work is devoted to the calculation of the efficiency of batteries based on microchannel silicon and nickel-63 as a beta-source. *Materials and methods.* The following model of microchannel radiation-stimulated current source is accepted in the paper. Channels in silicon extend along the entire sample, which is technologically easier to create and does not change the calculation logic. Thus all channels have the same depth h and the width l , and periodically spaced apart by the distance m . It is clear that the most effective structures will contain the most profound channels, so this option can be excluded from the selection, taking h equal to 400 μm which is the maximum depth available in the modern technology. At present, the ratio of width / depth is also determined by etching technology, but in our calculations we assume that they are independent, as the technology of ion and electrochemical etching is developing quite quickly. The method for calculating the generation current is numerical. *Results.* The task of calculating the efficiency is multi-parameter, so for the analysis of the results current generation versus structure parameters were plotted down. Dependencies of current generation on microchannel silicon geometric parameters were obtained. The optimum channel width l was found to be about 2.5 μm , while current generation saturation is registered when the distance between the channels m increases. In terms of efficiency the optimal parameters of the model structure are the microchannel width equal to 2.5–3 μm and channel spacing equal to 10–12 μm . *Conclusions.* The possibility of the creation of radiation-stimulated batteries based on microchannel silicon with a beta-source placed into the microchannels was considered. Nickel-63 with the activity of 40 mCi/cm^2 was taken as a beta-source. The technological readiness of modern production to create similar structures based on vertical p-n junctions was shown. The calculation of efficiency of these structures showed that generation currents could be achieved at 1600 nA/cm^2 that was 20 times greater than the same index in monocrystal structures.

Key words: betavoltaic effect, battery efficiency, microchannel silicon, macroporous silicon.

Введение

Бетавольтаический эффект был открыт в 60–70-х гг. прошлого столетия, но в последнее время интерес к нему существенно вырос по причине перспективы внедрения в технологию микроэлектромеханических систем. Для полупроводниковых приборов нового поколения необходимы миниатюрные источники электрического питания, работающие достаточно про-

должительное время и обладающие малыми габаритами. Внедрение планарных структур с радиационно-стимулированными элементами питания возможно в области, где традиционные источники энергии не доступны. Например, датчики утечки газа в шахтах, глубоководные элементы контроля, подземные датчики и т.д. В связи с этим разработка эффективного и коммерчески привлекательного источника энергии на основе бета-источников представляется актуальной задачей [1–6].

Бета-источник никель-63 обладает огромным периодом полураспада (100,1 года) и достаточно высокой активностью, поэтому применение изотопа никеля позволит создать принципиально новые планарные элементы и датчики. Активность никеля-63 по порядку составляет десятки мКи/см², что существенно ограничивает область применения подобных элементов. Здесь на первый план выходят задачи повышения эффективности элементов, работающих на бетавольтаическом эффекте. Одним из наиболее интересных способов увеличения эффективности является применение микроканального кремния, в поры которого помещен бета-источник. Расчету эффективности элементов питания на микроканальном кремнии и бета-источнике на основе никеля-63 посвящена настоящая работа.

1. Модель микроканального источника тока

В настоящее время разработаны технологии получения в пластине кремния глубоких цилиндрических пор или каналов диаметром 0,6–20 мкм и глубиной до 500 мкм [7]. Макропористый кремний, в отличие от нано- и микропористого кремния, имеет малую пористость (порядка 10 %) и во многом сохраняет свойства монокремния. Поэтому макропористый или микроканальный кремний можно рассматривать как новый материал с эффективными значениями макропараметров: удельного сопротивления, диэлектрической проницаемости и т.д. В частности, в нем можно проводить глубокое диффузионное легирование, получать фотонные кристаллы с запрещенной зоной в инфракрасной области, получать микроколбочки из стенок каналов после их длительного окисления.

В работе [7] были получены микроканалы шириной 10 мкм и глубиной 120 мкм, получающиеся последовательным щелочным и электрохимическим травлением монокремния. В этом случае эффективная поверхность в 6,3 раза больше, чем у монокристаллического образца. Существуют технологические сложности по созданию образцов с глубиной каналов до 400 мкм, а шириной всего 1–5 мкм, но принципиальных ограничений здесь нет, и в ближайшее время ожидается развитие технологии и получение подобных структур. В этом случае возможно увеличивать эффективную площадь более чем в 2000 раз, что при условии помещения радиоактивного источника в микроканалы позволит во столько же раз поднять плотность тока генерации.

Поместить радиоактивный источник в микропоры – достаточно трудная и высокотехнологичная задача, однако на примере меди Д. Г. Громов и С. А. Гаврилов разработали технологию металлизации глубоких каналов в оксиде кремния [8]. Заполнение каналов при этом полное, для чего была применена технология нанесения буферного слоя титана толщиной 20 нм. При этом сначала проводят операцию диспергирования на капли в результате термообработки пленки меди при 1123 К, что позволяет получать шарики

с размерами порядка толщины канавки. При введении смачивающего подслоя титана толщиной 20 нм на поверхность происходит сначала диспергирование пленки, а затем затекание меди в каналы.

Технологическая перспектива создавать элементы электрического питания на основе микроканального кремния с заполнением каналов изотопом ^{63}Ni позволяет провести расчет эффективности подобных структур. При этом надо учесть несколько возможностей и ограничений. С одной стороны, с уменьшением ширины каналов происходит рост удельной поверхности структуры, в которой генерируются носители заряда. С другой стороны, при достижении размеров каналов менее 3 мкм происходит уменьшение активности бета-источника в канале, поскольку глубина выхода бета-электронов из никеля составляет примерно 4 мкм.

Необходимо также учитывать, что эффективная генерация в p - n -переходе происходит в области пространственного заряда (ОПЗ) шириной более 4 мкм, что накладывает ограничения на расстояние между каналами. Именно поэтому в расчет эффективности структуры элементов питания на основе микроканального кремния необходимо взять все параметры: ширину ОПЗ, глубину залегания p - n -перехода, активность бета-источника, а также удельную площадь.

Поглощение частиц от бета-источника с максимальной энергией $E_{\max}$ в материале происходит практически экспоненциально, при этом на глубине d поток ослабляется в два раза в соответствии с выражением [9]:

$$d \approx \frac{0,095ZE_{\max}^{3/2}}{A}, \quad (1)$$

где Z , A – соответственно заряд и массовое число ядра-мишени.

Таким образом, принимая во внимание, что самопоглощение для ^{63}Ni равно $d = 0,883$ мкм (вычислено по формуле (1)), а также что поток бета-частиц учитывается вплоть до ослабления примерно в 20 раз, выход бета-частиц никеля будет происходить с глубины не более 3,8 мкм от поверхности [9].

Для определенности примем следующую модель микроканального радиационно-стимулированного источника тока. Положим, что каналы в кремнии проходят вдоль всего образца, это проще создать технологически и не изменяет логики расчетов. При этом все каналы имеют одинаковые размеры глубиной h и шириной l , а также периодически отстоят друг от друга на расстоянии m . Понятно, что наиболее эффективные структуры будут содержать наиболее глубокие каналы, следовательно, этот параметр можно исключить из подбора, приняв h равным 400 мкм – максимальной глубине, доступной современной технологии. В настоящее время соотношение ширина–глубина также определяется технологией травления, но в наших расчетах примем, что оно независимо, поскольку технология ионного и электрохимического травления развивается достаточно быстро.

В предыдущих работах [10, 11] было проведено численное моделирование процесса генерации и переноса в ОПЗ носителей при моноэнергетическом электронном облучении. Модель генерации носителей заряда в ОПЗ при электронном облучении учитывала следующие процессы:

– генерацию электронно-дырочных пар за счет ионизации атомов кремния в процессе электронного облучения;

- диффузию электронов в объеме ОПЗ;
- дрейфовый перенос носителей заряда электрическим полем в ОПЗ;
- рекомбинацию в ОПЗ.

В модели предполагалось, что носители, сгенерированные в n^+ области, не вносят вклад в ток, поскольку практически сразу рекомбинируют, что исключало возможность диффузии дырок из n^+ области в ОПЗ. Плотность тока сгенерированных носителей и их распределение в ОПЗ определялось из решения уравнения непрерывности в цилиндрических координатах. Сравнение численных и экспериментальных значений тока генерации показало состоятельность принятой модели и допущений, сделанных в ней [10, 12].

В работе [11] был проведен расчет оптимальной структуры радиационно-стимулированного источника тока на основе ^{63}Ni . В процессе моделирования менялись такие параметры, как глубина залегания p - n -перехода и ширина области пространственного заряда. Перед проведением численного эксперимента из справочных данных определялся энергетический спектр бета-частиц, для каждой энергии бета-частицы проводилось моделирование тока генерации в структуре с заданной шириной ОПЗ и глубиной залегания p - n -перехода при фиксированном коэффициенте рекомбинации.

При моделировании зависимости тока генерации (при глубине залегания перехода 2 мкм) от ширины ОПЗ показано, что максимальная генерация тока происходит для значения ширины ОПЗ, равной 4 мкм. Вариация этой величины в пределах 6–10 мкм практически не влияет на генерацию тока [11]. В нашей модели примем наиболее оптимальные значения глубины залегания p - n -перехода и ширины ОПЗ, равные 2 и 4 мкм соответственно. Данные значения оставляют свободу для изменения параметров микроканального кремния и увеличения эффективной площади. В расчетах эффективности при различных параметрах модели были взяты результаты предыдущих расчетов тока генерации для монокристаллического кремния.

2. Расчет тока генерации при различных параметрах модели

Учитывая, что с уменьшением толщины изотопа никеля с 3,8 мкм и ниже его удельная активность будет снижаться, очевидно, что функция уменьшения удельной активности в микроканалах равна разнице исходной активности бета-источника на поверхности образца и функции самопоглощения, экспоненциально зависящей от толщины никелевого поглотителя бета-частиц. Данная зависимость представлена на рис. 1 при условии, что исходный бета-источник в соответствии с нашими экспериментальными результатами взят с активностью 40 мКи/см².

Рассчитаем зависимость удельной площади каналов по отношению к площади образца от размеров микроканалов l и m . Легко получить, что удельная площадь поверхности будет равна

$$S = \frac{2h + m + l}{m + l}. \quad (2)$$

Результаты расчета по формуле (2) представлены на рис. 2, причем на графике представлен расчет изменения площади при $l, m > 1$ мкм, поскольку генерация носителей происходит в объеме и дальнейшее уменьшение ширины каналов нецелесообразно. Из графика видно, что при выбранных параметрах

рах наибольший спад удельной площади происходит до 4 мкм, поэтому варьировать размеры каналов целесообразно от 1 до 8 мкм.

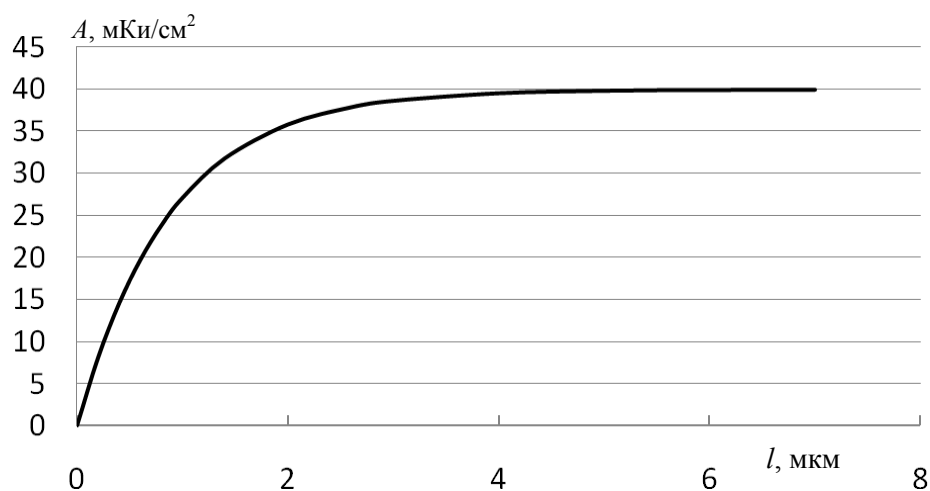


Рис. 1. Зависимость удельной активности бета-источника внутри микроканала от его ширины l . Исходный источник взят с активностью 40 мКи/см²

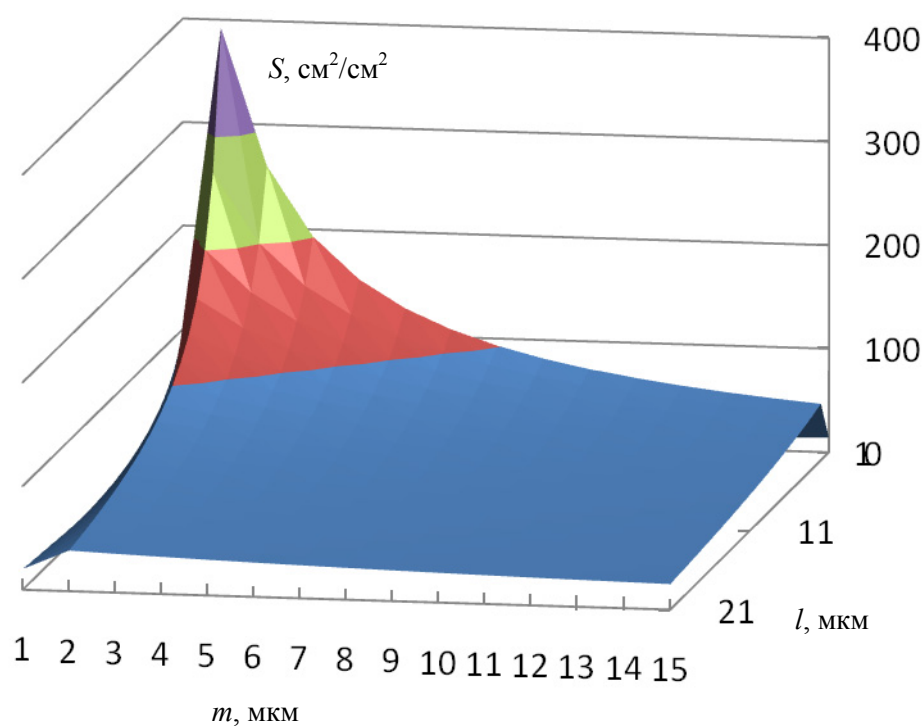


Рис. 2. Зависимость удельной площади микроканального кремния от размеров l и t при условии, что $h = 400$ мкм

Для проведения окончательного расчета необходимо принять во внимание, что глубина залегания p - n -перехода не может быть менее 0,1–0,3 мкм,

а также то, что ширина ОПЗ должна быть порядка $1/3$ от кремниевого остова шириной m , чтобы обеспечить сбор носителей заряда. Следовательно, можно принять, что глубина залегания p - n -перехода равна $0,1$ мкм, а ширина ОПЗ подбирается уровнем легирования подложки так, чтобы ее значение строго равнялось $1/3 m$.

Результаты численных расчетов представлены на рис. 4–6. Из рис. 3 видно, что наиболее эффективными структурами с максимальным током генерации являются структуры с минимальным значением l – шириной микроканала и максимальными значениями m – расстоянием между каналами. Действительно, с уменьшением l происходит рост удельной площади структуры и, следовательно, эффективности, а с ростом m происходит увеличение ОПЗ – области сбора носителей заряда.

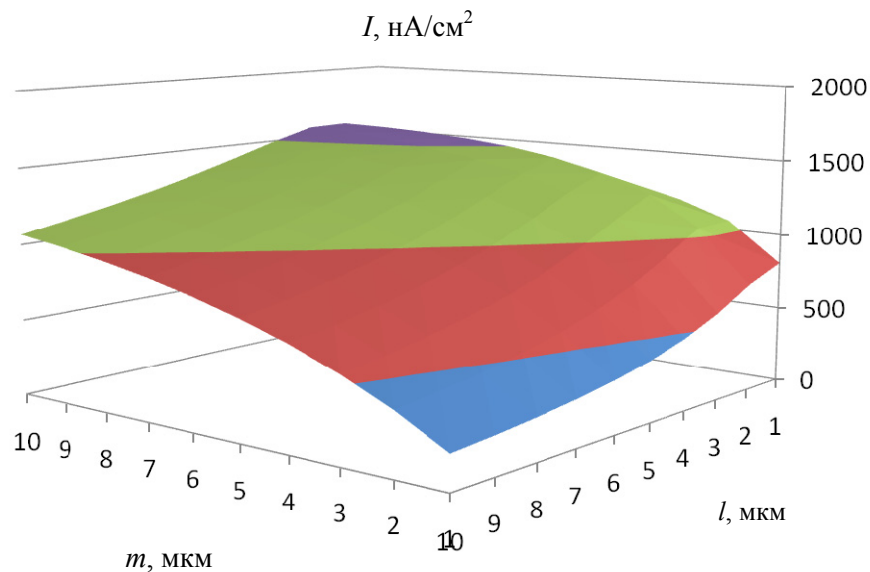


Рис. 3. Зависимость дополнительного тока, генерируемого в микроканалах, в зависимости от их геометрических размеров m и l

Из рис. 4 видно, что при $m > 3$ мкм график зависимости тока от ширины микроканала l имеет ярко выраженный максимум в районе $l = 2$ – $2,5$ мкм. Наличие максимума определяется двумя зависимостями: с одной стороны, с уменьшением l растет эффективная площадь; с другой стороны, с уменьшением l в области 3 мкм и ниже экспоненциально снижается активность бета-источника в микроканалах.

Таким образом, оптимальное значение ширины канала l лежит в районе 2,5 мкм, что также подтверждает зависимости, представленные на рис. 5. Видно, что с ростом расстояния между каналами m происходит выход на насыщение тока генерации, поскольку рост тока при фиксированном l определяется только ростом ширины ОПЗ, для которой рост тока наблюдается до значения 4 мкм, что эквивалентно $m = 12$ мкм. Дальнейший рост $m > 12$ мкм приведет к очевидному снижению тока генерации из-за снижения плотности каналов и удельной поверхности образца.

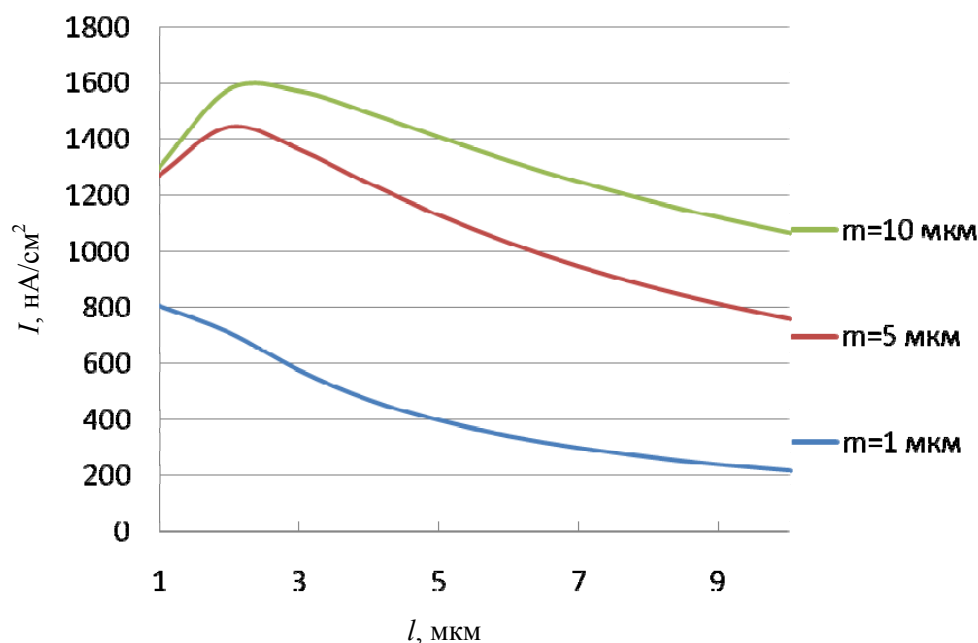


Рис. 4. Зависимость тока, генерируемого в микроканалах, в зависимости от ширины микроканала l при различных m

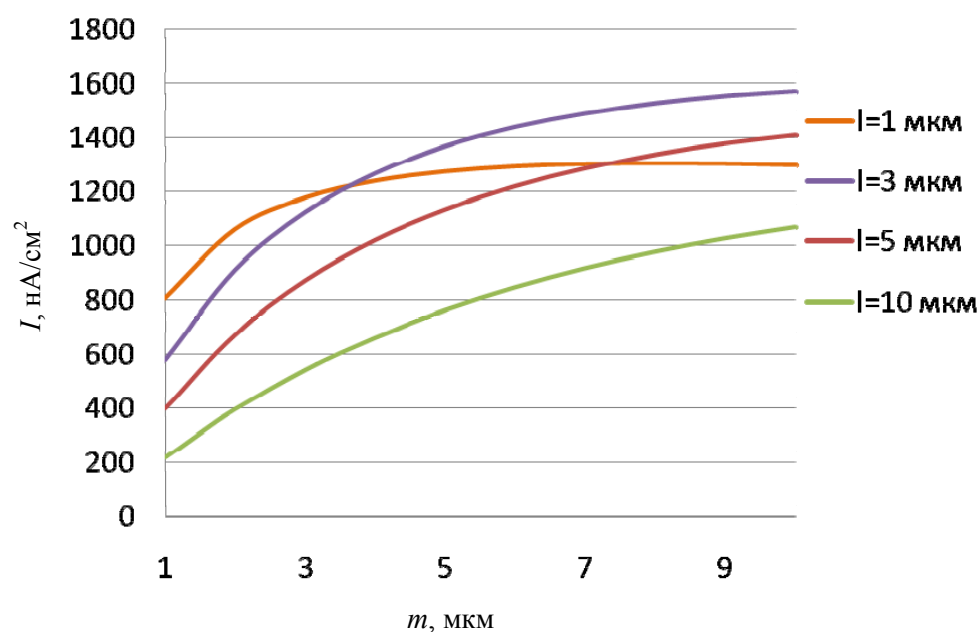


Рис. 5. Зависимость тока, генерируемого в микроканалах, в зависимости от расстояния между микроканалами m при различных l

При $l = 3 \mu\text{m}$ наблюдается выход на насыщение тока генерации до значений $1600 \text{ нА}/\text{см}^2$ (рис. 5). При больших или меньших значениях l также наблюдается постепенный выход на насыщение, но на меньшие значения тока генерации. В результате можно заключить, что с точки зрения эффектив-

ности оптимальными параметрами структуры являются ширина микроканала, равная 2,5–3 мкм, и расстояние между каналами, равное 10–12 мкм.

Заключение

В работе рассмотрена возможность создания радиационно-стимулированных элементов на основе микроканального кремния с помещенным бета-источником в микроканалы. В качестве бета-источника взят никель-63 с активностью 40 мКи/см². Показана технологическая готовность современного производства к созданию подобных структур на основе вертикальных *p-n*-переходов. Проведенный расчет эффективности этих структур показал, что наиболее оптимальными значениями ширины микроканала являются 2,5–3 мкм, а расстояния между каналами – 10–12 мкм. При этом могут быть достигнуты токи генерации в 1600 нА/см², что в 20 раз больше, чем тот же показатель у монокристаллических структур.

Список литературы

1. **Wang, Z. L.** Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays / Z. L. Wang, J. Song // *Science*. – 2006. – Vol. 312. – P. 243.
2. **Bower, K.** Polymers Phosphors and Voltaics for Radioisotope Microgenerators / K. Bower et al. // CRC Press, Boca Raton, FL. – 2002. – P. 441.
3. **Ануфриенко, В. Б.** Использование сверхмногослойных наноструктур для прямого преобразования ядерной энергии в электрическую / В. Б. Ануфриенко А. М. Михайлова, А. Н. Палагушкин и др. // *Нано- и микросистемная техника*. – 2008. – № 8. – С. 30–38.
4. **Ануфриенко, В. Б.** Преобразователи ядерной энергии в электрическую на вторичных электронах / В. Б. Ануфриенко, В. П. Ковалев, А. В. Куликов, В. А. Чернов // *Российский химический журнал*. – 2006. – Т. 1, № 5. – С. 120–125.
5. **Scott, A.** Improving power density and efficiency of miniature radioisotopic thermoelectric generators / A. Whalen Scott, A. Applett Christopher, L. Aselage Terrence // *Journal of Power Sources*. – 2008. – Vol. 180. – P. 657–663.
6. **Guo, H.** Nanopower betavoltaic microbatteries / H. Guo, A. Lal // *The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems*. – Boston, 2003. – P. 36–39.
7. **Астрова, Е. В.** Глубокое диффузионное легирование макропористого кремния / Е. В. Астрова, В. Б. Воронков, И. В. Грехов // *Письма в Журнал технической физики*. – 1999. – Т. 25, № 23. – С. 72–79.
8. **Громов, Д. Г.** Проявление гетерогенного механизма при плавлении малоразмерных систем / Д. Г. Громов, С. А. Гаврилов // *Физика твердого тела*. – 2009. – Т. 51, № 10. – С. 2012–2021.
9. **Кикоин, И. К.** Таблицы физических величин. Справочник / И. К. Кикоин. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.
10. Моделирование радиационно-стимулированного источника тока на *pin*-структурах / Ю. С. Нагорнов, Е. С. Пчелинцева, Б. М. Костишко, Д. А. Корнилов, В. М. Радченко, В. Д. Рисованый // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. – 2009. – № 3. – С. 113–125.
11. **Нагорнов, Ю. С.** Радиационно-стимулированный источник энергии на основе изотопа никель-63 / Ю. С. Нагорнов // *Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. – 2011. – № 1. – С. 65–69.

12. **Нагорнов, Ю. С.** Влияние зарядки на бетавольтаический эффект с использованием радионуклида никель-63 / Ю. С. Нагорнов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2011. – № 1 (87). – С. 90–92.

References

1. Wang Z. L., Song J. *Science*. 2006, vol. 312, p. 243.
2. Bower K. et al. *CRC Press, Boca Raton, FL*. 2002, p. 441.
3. Anufrienko V. B., Mikhaylova A. M., Palagushkin A. N. et al. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem technology]. 2008, no. 8, pp. 30–38.
4. Anufrienko V. B., Kovalev V. P., Kulikov A. V., Chernov V. A. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal* [Russian chemical journal]. 2006, vol. L, no. 5, pp. 120–125.
5. A. Whalen Scott, A. Apblett Christopher, L. Aselage Terrence *Journal of Power Sources*. 2008, vol. 180, pp. 657–663.
6. Guo H., Lal A. *The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems*. Boston, 2003, pp. 36–39.
7. Astrova E. V., Voronkov V. B. et al. *Pis'ma v ZhTF* [Letters to the Journal of applied physics]. 1999, vol. 25, no. 23, pp. 72–79.
8. Gromov D. G., Gavrilov S. A. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics]. 2009, vol. 51, no. 10, pp. 2012–2021.
9. Kikoin I. K. *Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik*. [Table of physical quantities. Reference book]. Moscow: Atomizdat, 1976, 1008 p.
10. Nagornov Yu. S., Pchelintseva E. S., Kostishko B. M. et al. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences]. 2009, no. 3, pp. 113–125.
11. Nagornov Yu. S. et al. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyuyu apparaturu* [Problems of atomic science and technology. Physics of radiative effect on radio electronic equipment]. 2011, no. 1, pp. 65–69.
12. Nagornov Yu. S. et al. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [University proceedings. Electronics]. 2011, no. 1 (87), pp. 90–92.

Нагорнов Юрий Сергеевич

кандидат физико-математических наук,
доцент, старший научный сотрудник,
научно-исследовательская часть,
Тольяттинский государственный
университет (Россия, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14)

E-mail: rq-georg@rambler.ru

Nagornov Yuriy Sergeevich

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor, senior
research fellow, research department,
Togliatti State University (14 Belorusskaya
street, Togliatti, Russia)

УДК 621.31

Нагорнов, Ю. С.

Расчет эффективности элементов питания на основе микроканального кремния и бета-источника никель-63 / Ю. С. Нагорнов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 136–145.