

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ БЕТА-ИСТОЧНИКА

© 2012 Е.С. Пчелинцева, Б.М. Костишко

Ульяновский государственный университет

Поступила в редакцию 20.11.2012

В работе проведено теоретическое исследование бетавольтаического эффекта кремниевых рpn-структур на основе изотопа ^{63}Ni различной активности. Создана модель бетавольтаического элемента питания, учитывающая процессы генерации, рекомбинации, а также диффузионного и дрейфового переноса в области пространственного заряда.

Ключевые слова: Бетавольтаический эффект, радиационно-стимулированная генерация тока, радиоизотопы, микроэлектромеханические системы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Новое поколение микроэлектромеханических систем нуждаются в миниатюрных источниках электрического питания, работающих достаточно продолжительное время и обладающими малыми габаритами. Преимущества энергетических источников на основе радиоизотопов являются большой срок работы (свыше 10 лет в зависимости от изотопа), малый вес, небольшой размер, широкий температурный диапазон и высокая надежность. Именно поэтому реализация бетавольтаического элемента питания и исследование бетавольтаического эффекта представляется актуальной задачей [1-3].

Бетавольтаический эффект возникает благодаря попаданию бета-частиц в область пространственного заряда (ОПЗ) р-n-перехода, где встроенное электрическое поле разделяет генерированные носители заряда, в результате чего возникает наведенный потенциал, также как это происходит при облучении светом. В случае если р⁻ и n⁺ области замкнуть накоротко или через внешнее сопротивление нагрузки, в цепи потечет ток. Таким образом, генерированная энергия может быть использована в электрических схемах.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕТАВОЛЬТАИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Известно, что количество генерируемых электронно-дырочных пар определяется энергией бета-частицы $N = E_0/E_i$, где E_0 – энергия бета-

частицы, а $E_i = 3,8 \text{ эВ}$ – характеристическая энергия для кремния, определяемая как линейная функция запрещенной зоны [4]. При этом генерация носителей заряда должна быть пропорциональна функции энерговыделения, определяемой из табличных данных [5, 6] (рис. 1). Данные по энерговыделению аппроксимировались функцией Гаусса $G(z) = Ae^{-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma^2}}$, которая содержит три параметра – z_0 , σ и A . Параметр A определяется из условия нормировки:

$$A = \frac{NI_e}{2\pi e \int_0^d \int_0^d e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma^2}} (1 - H(r - r_e)) r dr dz}$$

здесь N – число электронов, генерируемых одной бета-частицей, I_e – поток бета-частиц, y – определяется из справочных данных, z_0 – глубина проникновения электронов с максимальным энерговыделением, $H(r - r_0)$ – функция Хэвисайда.

Из справочных данных для энергий электронного облучения 0.1, 0.5, 2 и 3 МэВ были определены величины z_0 и σ . Аппроксимация полученных зависимостей линейной и квадратичной функциями (рис. 1) позволила рассчитать значения величин z_0 и σ для электронного пучка с энергиями, используемыми в эксперименте с электронным микроскопом, т.е. 15, 30 и 40 кэВ. Как видно, аппроксимация достаточно хорошо описывает справочные экспериментальные данные, при этом значения максимального пробега R рассчитывались по эмпирической зависимости от энергии E [6]:

$$R\left(\frac{\text{МэВ}}{\text{см}}\right) = 412E^n, n = 1,265 - 0,0954 \ln E (\text{МэВ}).$$

Значения глубины максимального энерговыделения и полуширины функции энерговыделения определялись по зависимостям (рис. 01):

Пчелинцева Екатерина Сергеевна, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории зондовой и электронной микроскопии научно-исследовательского технологического института. E-mail: nanolabniti@gmail.com
Костишко Борис Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, ректор, заведующий кафедрой физических методов в прикладных исследованиях. E-mail: kost@sv.uwen.ru

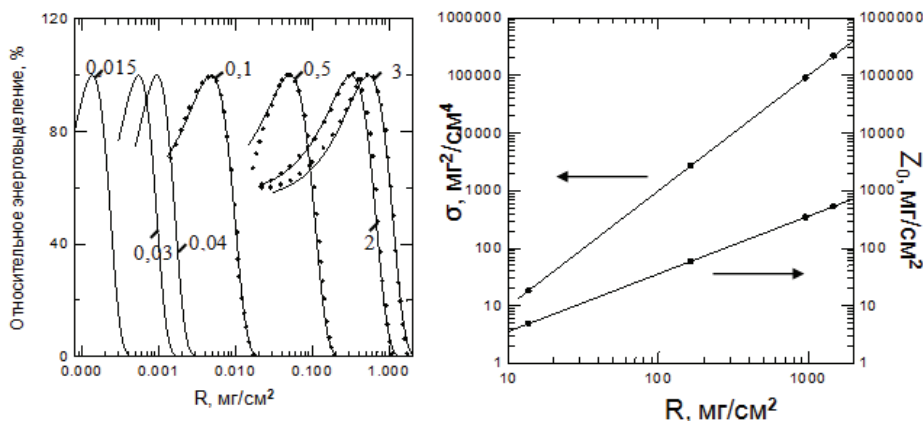


Рис. 1. Слева – распределение энергосвечения по глубине для электронов различной энергии. Цифры 0,015-3 показывают энергию облучения в единицах МэВ. Точки – справочные данные, линии – результат аппроксимации функцией Гаусса. Справа – зависимость глубины максимального энергосвечения и полуширины функции энергосвечения от глубины проникновения электронов. Точки – результаты расчетов, линии – аппроксимация

$$Z_0 = 0,36 \cdot R \text{ и } \sigma = 0,1 \cdot R^2 .$$

Моделирование генерации носителей заряда в ОПЗ при облучении электронами и бета-частицами учитывало следующие процессы: генерация электронно-дырочных пар за счет ионизации атомов кремния при электронном облучении, диффузия электронов в объеме ОПЗ, дрейфовый перенос носителей заряда электрическим полем в ОПЗ, а также рекомбинацию. В модели предполагалось, что носители, сгенерированные в p+ области, не вносят вклад в ток, поскольку практически сразу рекомбинируют, таким образом, исключалась возможность диффузии дырок из p+ области в ОПЗ. Плотность тока сгенерированных носителей и их распределение в ОПЗ определялось из решения уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\text{div} \vec{j} - uR + G ,$$

где R – коэффициент рекомбинации, G – функция генерации электронов, j – плотность тока, u – концентрация сгенерированных электронов. Решение уравнения непрерывности находилось численным способом. В двумерном случае численное решение уравнения непрерывности целесообразно получать методом явной схемы. При этом необходимо помнить, для того чтобы явная схема была сходящейся, на шаг по времени накладывается ограничение сверху.

На основе математической модели и измеренных параметров была создана компьютерная программа по моделированию генерации носителей заряда. Для проверки полученной модели радиационно-стимулированного источника тока был проведено физическое моделирование на электронном микроскопе РЭМ-100У. Энергия первичных электронов при этом варьировалась в диапазоне 5-40 кэВ, ток пушки зависел от коэф-

фициента рассеяния электронов и автоматически регулировался системой управления пушкой, так что его значение было в диапазоне от 20 до 300 нА. Остаточный вакуум в камере микроскопа при измерениях было порядка 10 мПа. В ходе эксперимента сопротивление нагрузки менялось от 0 (короткое замыкание) до бесконечности (разрыв). Промежуточные значения сопротивления выбирались из принципа наибольшего изменения тока генерации диода в процессе облучения электронами. Необходимо отметить, что при облучении электронами с энергиями 5 кэВ генерации тока в образцах не наблюдалось. Сравнение численных и экспериментальных значений тока генерации представлено на рис. 2. Некоторое расхождение экспериментальных точек с теоретическим расчетом связано с наблюдаемой зарядкой поверхности образцов. Подтверждением этого явления может быть то, что при электронном облучении ток пушки возрастал в несколько раз при увеличении сопротивления нагрузки и увеличении напряжения источника соответственно.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕТАВОЛЬТАИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА ОСНОВЕ ИЗОТОПА ⁶³Ni

Для расчета оптимальной структуры радиационно-стимулированного источника тока в процессе моделирования менялись такие параметры как глубина залегания рp-перехода и ширина ОПЗ. Перед проведением численного эксперимента из справочных данных определялся энергетический спектр бета-частиц ⁶³Ni, для каждой энергии бета-частицы проводилось моделирование тока генерации в структуре с заданной шириной ОПЗ и глубиной залегания рp-перехода при фиксированном коэффициенте рекомбинации [7].

На рис. 3 представлена зависимость тока ге-

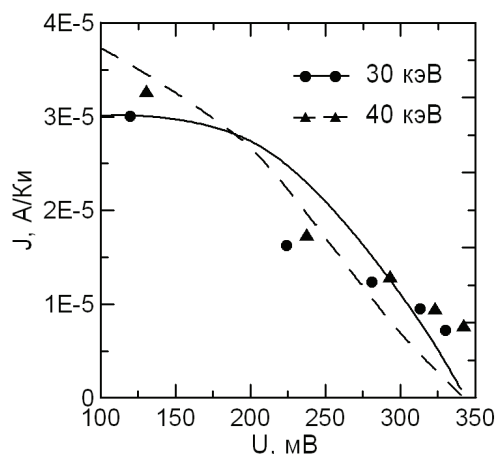


Рис. 2. Вольтамперная характеристика рin-диода при электронном облучении с энергией луча 30-40 кэВ. Ток генерации был нормирован на ток электронной пушки, выраженный в единицах Ки. Точки – экспериментальные значения; линии – численный расчет

нерации носителей от глубины залегания перехода для различных значений ширины ОПЗ. Как видно, с увеличением ширины ОПЗ наблюдается повышение значения выходного тока. Для ширины ОПЗ 10 мкм выходной ток для глубины залегания рp-перехода 0,001 и 8 мкм составил 63 нА и 8 нА соответственно, а для ширины ОПЗ 4 мкм при тех же условиях 30 нА и 8 нА соответственно.

Таким образом, результаты моделирования свидетельствуют, что глубина залегания перехода влияет на ток генерации существенно больше, чем ширина ОПЗ, при условии, что ширина ОПЗ больше 4 мкм. Для создания структуры с максимальным выходным током необходимо, чтобы глубина залегания перехода была как можно меньше, ширина области генерации носителей заряда была порядка нескольких микрометров и залегала в области максимальной генерации.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 годы

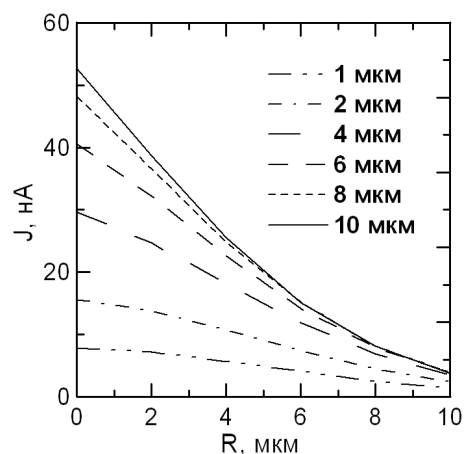


Рис. 3. Зависимость тока генерации носителей заряда от глубины залегания рp-перехода для ширины ОПЗ от 4 до 10 мкм с применением изотопа ^{63}Ni активностью 40 мКи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guo H., Lal A. Nanopower betavoltaic microbatteries // the 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems (Boston, 2003). Boston, 2003. P. 36-39.
2. Ануфренко В.Б., Михайлова А.М., Палагушкин А.Н. и др. Использование сверхмногослойных наноструктур для прямого преобразования ядерной энергии в электрическую // Нано- и микросистемная техника. 2008. №8. С 30-38.
3. Нагорнов Ю.С., Пчелинцева Е.С., Костишко Б.М., Корнилов Д.А., Радченко В.М., Рисованный В.Д. Моделирование радиационно-стимулированного источника тока на рin-структурах // Известия вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2009..№3. С.113-125.
4. Церbst М. Контрольно-измерительная техника. М.: Энергоатомиздат, 1989. 320 с.
5. Таблицы физических величин. Справочник. // Под ред. акад.И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
6. Справочник физических величин / под редакцией И.С. Григорьева, Е.З Мейлихова. М.:Энергоатомиздат, 1991.1232 с.
7. Моделирование радиационно-стимулированного источника тока на рin структурах / Е.С. Пчелинцева [и др.] // Известие вузов. Поволжский регион. 2009. №3(11). С.113-125.

THE RADIATIO-INDUCED BATTERY BASED ON BETA-SOURCE

© 2012 E.S. Pchelintseva, B.M. Kostishko

Ulyanovsk State University

In a theoretical study of the effect of silicon betavoltaicheskogo pin-structures based on the isotope ^{63}Ni different activity. The model betavoltaicheskogo battery, which takes into account the processes of generation, recombination, and diffusion and drift transport in the space charge.

Keywords: Betavoltaichesky effect of radiation-induced current generation, radioisotopes, microelectromechanical systems.

Ekaterina Pchelintseva, Candidate of Physics and Mathematics, Head at the Probe and Electron Microscopy Laboratory in Research Institute of Technology. E-mail: nanolabniti@gmail.com
Boris Kostishko, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Rector, Head at the Physical Methods in Applied Researches Department. E-mail: kost@sv.uven.ru