

УДК 621.3.049.77.002.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЭМС-ГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГИИ СО ВСТРОЕННЫМ ЗАРЯДОМ\*

В.П. ДРАГУНОВ<sup>1</sup>, Д.И. ЛОЙКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: drag@adm.nstu.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: the\_strongest\_1994@mail.ru

Электреты – электрические аналоги постоянных магнитов – в настоящее время нашли широкое применение. Диапазон их использования простирается от бытовой техники (электретные микрофоны) до техники специального назначения (например, электретные дозиметры, гидрофоны и т. п.). Относительно недавно электреты стали применять и в электростатических микроэлектромеханических генераторах энергии, преобразующих энергию механических колебаний в электрическую энергию. Наличие электрета в конструкции данных преобразователей обеспечивает их автономность, так как в роли источника напряжения выступает внутреннее электрическое поле.

Основной характеристикой электрета, определяющей величину выходных характеристик преобразователя, является эффективное напряжение электрета. В процессе изготовления преобразователей достаточно сложно контролировать воздействие многочисленных факторов, определяющих окончательные характеристики устройства. В результате у данных преобразователей наблюдается большой разброс выходных параметров.

В данной статье проведено теоретическое и экспериментальное исследование характеристик электростатических преобразователей энергии со встроенным зарядом. Предложена методика определения величины эффективного напряжения электрета и жесткости упругого подвеса с помощью измерения зависимости емкости преобразователя от массы подвижного электрода. Показано, что разброс величины жесткости упругого подвеса не превышает 10 %. Установлено, что в процессе сборки преобразователей происходит уменьшение величины эффективного напряжения электрета, которое может возникать из-за повышенной влажности в помещении, где производятся сборочные операции. Для того чтобы величина эффективного напряжения сохраняла свое изначальное значение, необходимо тщательно контролировать процесс сборки преобразователей.

---

\* Статья получена 27 октября 2015 г.

**Ключевые слова:** электростатический преобразователь, переменный конденсатор, подвижный электрод, электрет, эффективное напряжение электрета, емкость переменного конденсатора, жесткость упругого подвеса, масса подвижного электрода

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-76-89

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие микросистемной техники в последние годы позволило начать разработки полупроводниковых преобразователей с использованием принципиально новой технологии изготовления, основанной на совмещении кремниевой объемной и электретной технологий с использованием слоев диоксида и нитрида кремния, которые после электризации способны к длительному хранению заряда.

Относительно недавно электреты нашли свое применение и в электростатических микроэлектромеханических генераторах энергии, преобразующих энергию механических колебаний в электрическую энергию. Разработка данных преобразователей обусловлена необходимостью обеспечения питания различных микроомощных датчиков.

Принцип действия электростатических преобразователей основан на совершении механическими силами работы против электростатических сил притяжения разноименно заряженных пластин конденсатора. Наличие электрета в конструкции преобразователя обеспечивает его автономность, так как в роли источника напряжения выступает внутреннее электрическое поле  $E(x, t)$ . Данное поле возникает после электризации диэлектрика в коронном разряде и обусловлено сформированным распределением заряда. Основной характеристикой такого распределения заряда является электретная разность потенциалов  $V_3$  (эффективное напряжение электрета). Уровень стабильности  $V_3$  определяет уровень воспроизводимости характеристик электростатических преобразователей, а также срок их службы. Однако при воздействии на электреты таких внешних факторов, как температура, влажность, радиация и т. д., электрический заряд электретов уменьшается и они теряют свои свойства [1–13].

Так как в процессе изготовления преобразователей достаточно сложно отследить воздействие перечисленных факторов, возникает необходимость контроля (определения) характеристик электрета в изготовленных устройствах.

В данной статье проведено исследование характеристик электростатических преобразователей энергии со встроенным зарядом и предложена методика определения эффективного напряжения электрета  $V_3$  в изготовленных преобразователях.

## 1. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Преобразователь представляет собой переменный конденсатор, изготавливаемый с использованием интегральных технологий. Его основными элементами являются подвижный и неподвижный электроды, вибрационный элемент и дополнительная масса (сейсмомасса) (рис. 1).

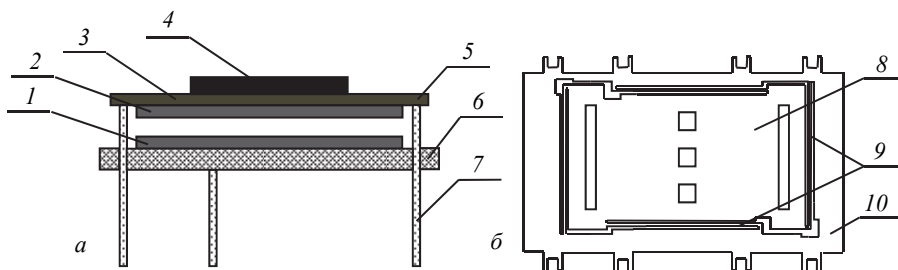


Рис. 1. Конструкция переменного конденсатора (а): 1 – неподвижный электрод, 2 – подвижный электрод, 3 – вибрационный элемент, 4 – сейсмомасса (металлическая пластина), 5 – места крепления вибрационного элемента к ножкам корпуса, б – основание корпуса, 7 – ножки корпуса; вибрационный элемент (б): 8 – подвижная часть, 9 – кремниевые балочки, 10 – рамка

Подвижный электрод соединяется с вибрационным элементом и сейсмомассой при помощи клея. Неподвижный электрод и рамка вибрационного элемента жестко закрепляются на основании корпуса. В качестве неподвижного электрода используется пластина кремния с нанесенными на нее слоями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  со встроенным зарядом (электрет).

Под действием внешних механических колебаний за счет прогиба кремниевых балочек вибрационного элемента подвижный электрод совершает механические колебания относительно поверхности неподвижного электрода (электрета), в результате чего происходит изменение межэлектродного зазора конденсатора. При изменении величины межэлектродного зазора в электродах, диэлектрике и воздушном зазоре происходит перераспределение напряженности электрического поля  $E(x, t)$ , сопровождающееся протеканием тока в цепи нагрузки. При прохождении тока через нагрузку выделяется энергия, определяющая выходные характеристики преобразователя.

## 2. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В случае, когда можно пренебречь массой балочек вибрационного элемента по сравнению с сейсмомассой, механическую модель данного преобразователя можно представить в виде простейшей электромеханической системы (рис. 2) [14].

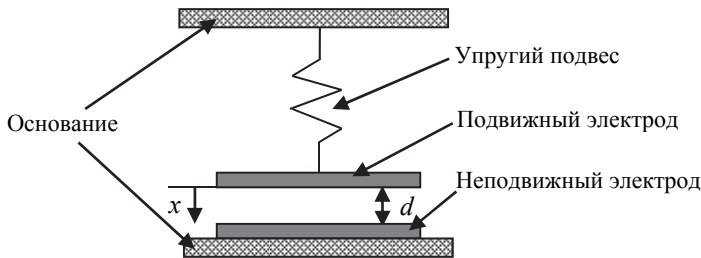


Рис. 2. Упрощенная механическая модель электростатического преобразователя

Уравнение равновесия (баланса сил), описывающее данную систему в статическом режиме, когда на подвижный электрод будут действовать только сила упругого подвеса, сила тяжести и электростатическая сила притяжения, обусловленная наличием заряда на неподвижном электроде, будет выглядеть следующим образом:

$$F_{\text{упр}} + F_{\text{эл}} = F_{\text{тяж}} . \quad (1)$$

Найдем выражение для расчета электростатической силы, используя электрическую модель, показанную на рис. 3.

Представленная модель описывается системой уравнений

$$-\varepsilon_1 E_1 + \varepsilon_2 E_2 = \sigma / \varepsilon_0 , \quad (2)$$

$$d_1 E_1 + d_0 E_2 = V_0 , \quad (3)$$

где  $d_0$  и  $d_1$  – толщины межэлектродного зазора и нижнего электрода соответственно;  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – относительные диэлектрические проницаемости материала нижнего электрода и газа в межэлектродном зазоре;  $\sigma$  – плотность поверхностного заряда электрета;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $V_0$  – приложенное или появляющееся между электродами напряжение (в рассматриваемой модели при измерениях емкости системы  $V_0 = 0$ ).

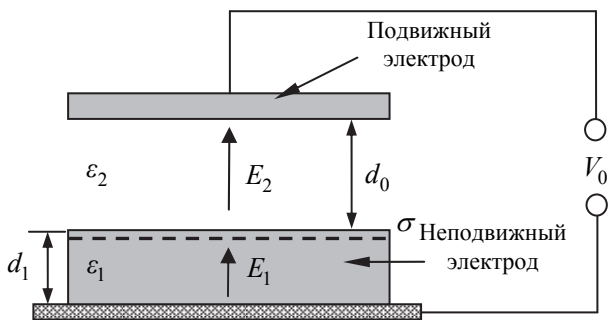


Рис. 3. Электрическая модель преобразователя со встроенным зарядом

Согласно (2) и (3) получим, что напряженность электрического поля в межэлектродном зазоре равна

$$E_2 = (d_1 / \varepsilon_0 \varepsilon_1) \sigma / (d_0 + (\varepsilon_2 / \varepsilon_1) d_1).$$

Отсюда для электростатической силы, действующей на подвижный электрод, имеем

$$F_{эл} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2^2 S = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_2 S \left[ V_{\Xi} / \left( d_0 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} d_1 \right) \right]^2,$$

здесь  $S$  – площадь подвижного электрода, а  $V_{\Xi} = (d_1 / \varepsilon_0 \varepsilon_1) \sigma$  – эффективное напряжение электрета. Как правило, величина  $(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) d_1$  много меньше  $d_0$ , поэтому ею можно пренебречь.

В результате уравнение равновесия для такой системы можно записать в виде

$$kx = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S V_{\Xi}^2}{2 d_0^2} + mg,$$

где  $k$  – жесткость упругого подвеса;  $x$  – смещение подвижного электрода относительно неподвижного;  $m$  – масса подвижного электрода;  $g$  – ускорение свободного падения.

Чтобы определить величину  $V_{\Xi}$ , предлагается проводить измерения емкости преобразователя при смещении подвижного электрода под действием дополнительно нагружаемой массы.

### 3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРЕТА

В рамках модели (1), когда система находится в статическом равновесии, выражение для зависимости смещения подвижного электрода от нагружаемой массы можно записать в виде

$$x_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S V_{\text{Э}}^2}{2(d_0 - x_n)^2 k} + \frac{g}{k} m_n, \quad (4)$$

где  $x_n$  – смещение подвижного электрода под действием нагружаемой массы  $m_n$ .

Величину  $x_n$  можно определить с помощью измерения емкости преобразователя. Выражение, связывающее величину смещения подвижного электрода с емкостью преобразователя, будет выглядеть следующим образом:

$$x_n = d_0 z_n = d_0 (1 - C_0 / C_n), \quad (5)$$

где  $d_0$  – максимальный (начальный) межэлектродный зазор;  $z_n = x_n / d_0$  – относительное смещение подвижного электрода;  $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 S / d_0$  – начальная емкость, соответствующая максимальному межэлектродному зазору;  $C_n = \varepsilon_0 \varepsilon_2 S / (d_0 - x_n)$  – емкость, измеренная после нагружения.

Начальную емкость  $C_0$  можно измерить, когда преобразователь находится в перевернутом состоянии, в результате чего подвижный электрод ложится на рамку вибрационного элемента и межэлектродный зазор становится максимальным. Однако необходимо учитывать, что во время сборочных операций в промежутки между вибрационным элементом и подвижным электродом могут попадать различные микрочастицы (пылинки, ворсинки, кремниевая крошка после резки), которые при измерении начальной емкости не позволяют балочкам выпрямиться до конца. В результате чего между подвижным электродом и вибрационным элементом может остаться микрозазор  $\Delta d$ .

С учетом  $\Delta d$  и уравнения (4) выражение (5) можно представить в виде

$$z_n^* = (1 - C_0^* / C_n^*) = \frac{C_0^* (C_n^*)^2 V_{\text{Э}}^2}{2(\varepsilon_0 \varepsilon_2 S)^2 k} - \frac{\Delta d C_0^*}{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S} + \frac{g C_0^*}{k \varepsilon_0 \varepsilon_2 S} m_n, \quad (6)$$

где  $z_n^* = x_n^* / d_0^*$ ;  $C_0^* = \varepsilon_0 \varepsilon_2 S / d_0^*$  – начальная емкость, соответствующая максимальному межэлектродному зазору, с учетом  $\Delta d$ ;  $d_0^*$  – начальный меж-

электродный зазор с учетом  $\Delta d$ ;  $C_n^* = C_0^* / (1 - z_n^*)$  – емкость, измеренная после нагружения массы, с учетом  $\Delta d$ ;  $x_n^* = x_n + \Delta d$ .

Согласно (6), при учете встроенного заряда зависимость относительного смещения подвижного электрода  $z_n^*$  от дополнительно нагружаемой массы  $m_n$  имеет нелинейный характер, так как  $C_n^*$  зависит от  $z_n^*$ . На рис. 4. представлены зависимости  $z_n^*$  от массы  $m_n$ , рассчитанные с использованием экспериментальных данных  $C_n^*(m_n)$  для трех образцов с максимальными межэлектродными зазорами 236, 234 и 225 мкм соответственно.

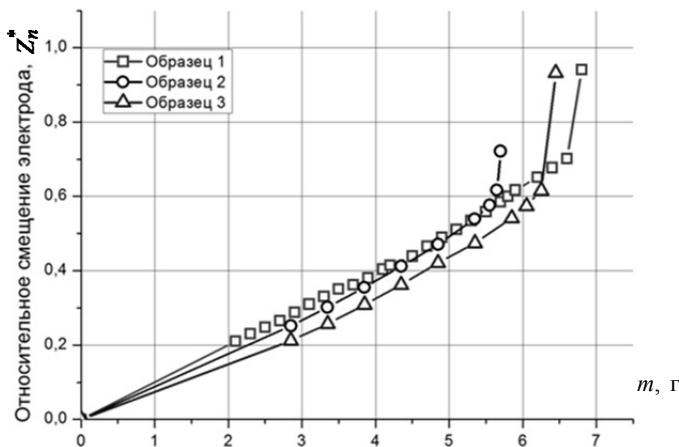


Рис. 4. Экспериментальные зависимости  $z_n^*$  от массы  $m_n$  для трех образцов с максимальными межэлектродными зазорами  $d_0^*$ :

1 – 236 мкм, 2 – 234 мкм, 3 – 225 мкм

Чтобы определить величину  $V_{\Xi}$  по экспериментальным данным, предлагается строить не зависимость  $z_n^* = (1 - C_0^* / C_n^*)$  от  $m_n$ , а зависимость величины  $F_n$

$$F_n = \left(1 - C_0^* / C_n^*\right) - \frac{C_0^* (C_n^*)^2 V_{\Xi}^2}{2(\epsilon_0 \epsilon_2 S)^2 k} \quad (7)$$

от  $m_n$ , которая должна иметь линейный характер, так как

$$F_n = -\frac{\Delta d C_0^*}{\epsilon_0 \epsilon_2 S} + \frac{g C_0^*}{k \epsilon_0 \epsilon_2 S} m_n. \quad (8)$$

Однако, как показывают исследования, в вибрационных элементах электростатических преобразователей, изготовленных при помощи интегральных технологий, имеется 10 %-й разброс величины жесткости кремниевых балочек (упругого подвеса), возникающий из-за примерно 3 %-го разброса толщины кремниевых балочек [15]. Таким образом, помимо  $V_{\text{Э}}$ , возникает необходимость определения и величины  $k$ .

Для определения этих двух параметров введем величину  $\delta = V_{\text{Э}}^2/k$ . В результате ввода величины  $\delta$  уравнение (7) запишется в виде

$$F_n = \left(1 - C_0^*/C_n^*\right) - \frac{C_0^* (C_n^*)^2}{2(\epsilon_0 \epsilon_2 S)^2} \delta. \quad (9)$$

Поскольку экспериментальные данные имеют разброс, связанный с погрешностью измерений, то для более точного определения  $V_{\text{Э}}$  и  $k$  проведем аппроксимацию зависимости  $F_n$  от  $m_n$  методом наименьших квадратов (МНК).

Так как ожидаемая зависимость (8) должна иметь линейный характер, аппроксимирующую зависимость представим прямой линией

$$F_{\text{аппр}} = b_0 + b_1 m_n, \quad (10)$$

где  $b_0$  и  $b_1$  – определяемые коэффициенты, которые согласно МНК будут равны

$$b_0 = \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N F_n - b_1 \sum_{n=1}^N m_n \right), \quad b_1 = \frac{\sum_{n=1}^N m_n \sum_{n=1}^N F_n - N \sum_{n=1}^N m_n F_n}{\left( \sum_{n=1}^N m_n \right)^2 - N \sum_{n=1}^N m_n^2},$$

здесь  $N$  – количество шагов нагружения массы.

Далее методом простых итераций осуществляем определение величины  $\delta$  по наилучшему совпадению результатов расчета и эксперимента. Так как ос-



новным показателем в МНК, характеризующим степень приближения экспериментальной зависимости к аппроксимирующей, является среднее квадратичное отклонение, равное

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N [F_n - (b_0 + b_1 m_n)]^2}{N - 1}},$$

то наилучшим будет значение  $\delta_{\text{опт}}$ , при котором величина  $\sigma$  будет наименьшей.

В результате получим

$$V_{\text{Э}} = \sqrt{\delta_{\text{опт}} k},$$

где из сопоставления выражений (8) и (10) получим

$$k = gC_0^* / b_1 \varepsilon_0 \varepsilon_2 S.$$

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Согласно предложенной методике были проведены расчеты  $V_{\text{Э}}$  и  $k$  для трех образцов, экспериментальные данные которых представлены на рис. 4. Исходя из технологического маршрута изготовления преобразователей, в качестве начальных значений были приняты  $V_{\text{Э}} = 300$  В и  $k = 300$  кг/с<sup>2</sup>.

Графики зависимостей  $F_n$ , рассчитанные на основе экспериментальных данных с использованием (9), и аппроксимирующих зависимостей (10) представлены на рис. 5.

В результате расчетов величины эффективного напряжения электрета и жесткости упругого подвеса для трех образцов с межэлектродными зазорами 236 мкм, 234 мкм и 225 мкм составили:  $V_{\text{Э}} = 130$  В и  $k = 444$  кг/с<sup>2</sup>,  $V_{\text{Э}} = 204$  В и  $k = 459$  кг/с<sup>2</sup>,  $V_{\text{Э}} = 173$  В и  $k = 462$  кг/с<sup>2</sup> соответственно.

Как видно из представленных данных, эффективное напряжение электрета  $V_{\text{Э}}$  и жесткость упругого подвеса  $k$  у исследованных образцов имеют разные значения, несмотря на то что их элементы изготавливались в едином процессе. Согласно экспериментальным данным, разброс значений  $k$  не превышает 10 %. При этом разброс значений  $V_{\text{Э}}$  у изготовленных преобразователей может достигать 50 %, а сами значения существенно меньше 300 В – величины, до которой изначально заряжали электреты. На основании этого можно сделать вывод,

что во время процесса сборки преобразователей различные внешние факторы приводят к существенному уменьшению величины  $V_3$ .

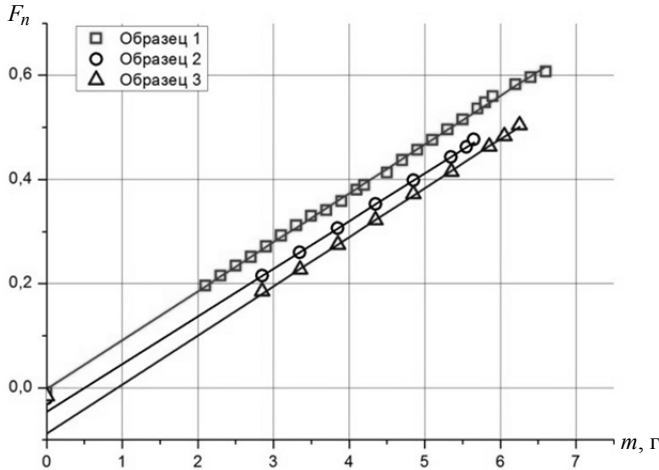


Рис. 5. Экспериментальные (маркеры) и аппроксимирующие (сплошные линии) зависимости для трех образцов. Обозначения соответствуют рис. 4

Одним из этих факторов может являться повышенная влажность в помещении, где проводятся сборочные операции. В результате это приводит к разбросу выходных характеристик преобразователей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье проведено исследование характеристик электростатических преобразователей энергии со встроенным зарядом. Предложена методика определения величины эффективного напряжения электрета  $V_3$  и величины жесткости упругого подвеса  $k$  на изготовленных преобразователях. Установлено, что в процессе сборки преобразователей величина эффективного напряжения электрета  $V_3$ , определяющая выходные характеристики преобразователей, уменьшается. Неповторяемость величины  $V_3$  приводит к разбросу выходных характеристик. Показано, что у изготовленных преобразователей разброс величины жесткости упругого подвеса не превышает 10 %, а разброс величины  $V_3$  может достигать 50 %.

Поскольку свойства электрета, от которого зависят выходные характеристики преобразователей, ухудшаются при воздействии на него влаги, то для

того чтобы величина  $V_3$  сохраняла свое изначальное значение, необходимо тщательнее контролировать уровень влажности в помещении, где проводятся сборочные операции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козодаев Д.А. Электретный эффект в структурах Si-SiO<sub>2</sub> и Si-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07. – СПб., 2002. – 196 с.
2. Tada Y. Theoretical characteristics of generalized electret generator using polymer film electrets // IEEE Transactions on Electrical Insulations. – 1986. – Vol. 21. – P. 457–464.
3. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Трехэлектродная двухконденсаторная МЭМС со встроенным зарядом // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 2. – С. 33–38.
4. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. 1. Расчет емкостей // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 7. – С. 37–41.
5. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. 2. Расчет электростатических сил // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 8. – С. 40–47.
6. Micro electrets power generator / J. Boland, C.-H. Chao, Y. Suzuki, Y.-C. Tai // IEEE the Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. MEMS-03: proceedings, Kyoto, Japan, 19–23 January 2003. – Piscataway, NJ: IEEE, 2003. – P. 538–541.
7. Seismic power generator using high-performance polymer electrets / T. Tsutsumino, Y. Suzuki, N. Kasagi, Y. Sakane // IEEE 19<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2006, Istanbul, Turkey, 22–26 January 2006. – Piscataway, NJ: IEEE, 2006. – P. 98–101.
8. Доржиев В.Ю., Драгунов В.П., Остертак Д.И. Расчет емкости МЭМС в 2D-приближении // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 4 (62). – С. 73–80.
9. Arakawa Y., Suzuki Y., Kasagi N. Micro seismic power generation using electret polymer film // Proceedings of PowerMEMS 2004, Kyoto, Japan, 28–30 November 2004. – Kyoto, Japan, 2004. – N 11. – P. 187–190.
10. Tsutsumino T., Suzuki Y., Kasagi N. Electromechanical modeling of micro electret generator for energy harvesting // Proceedings 14<sup>th</sup> International Conference Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers'07). – Lyon, France, 2007. – Vol. 2. – P. 863–866.
11. A concept of an electret power generator integrated with a rectifier / H. Okamoto, T. Suzuki, K. Mori, H. Kuwano // Proceedings of PowerMEMS 2009, Washington, DC, USA, 1–4 December 2009. – Washington, DC, USA, 2009. – P. 292–295.

12. Micro seismic electret generator for energy harvesting / T. Tsutsumino, Y. Suzuki, K. Kasagi, K. Kashiwagi, Y. Morizawa // Proceedings of PowerMEMS 2006, Berkeley, CA, USA, 29 November–1 December, 2006. – Berkeley, CA, 2006. – N 1. – P. 279–282.

13. Lo H.-W., Whang R., Tai Y.-C. A simple micro electret power generator // IEEE 20<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2007. Technical Digest, Hyogo, Japan, 21–25 January 2007. – Piscataway, NJ IEEE Service Center, 2007. – P. 859–861.

14. Dragunov V.P., Kostsov E.G. Specific features of operation of electrostatic microgenerators of energy // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2009. Vol. 45, N 3. – P. 234.

15. Драгунов В.П., Лойко Д.И. Исследование МЭМС-генераторов энергии // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 4 (82). – С. 108–121.

**Драгунов Валерий Павлович**, доктор технических наук, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: наноэлектроника, физика низкоразмерных структур, нано- и микросистемная техника. Имеет более 140 научных работ. E-mail: drag@adm.nstu.ru

**Лойко Данил Иванович**, магистрант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – нано- и микросистемная техника. E-mail: the\_strongest\_1994@mail.ru

## Research of MEMS-generators of energy with the built-in charge\*

V.P. Dragunov<sup>1</sup>, D.I. Loiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, Russia, Novosibirsk, PR. Karla Marksa, 20, Novosibirsk state technical University, doctor of technical sciences, professor of department of semiconductor devices and microelectronics. E-mail: drag@adm.nstu.ru

<sup>2</sup> 630073, Russia, Novosibirsk, PR. Karla Marksa, 20, Novosibirsk state technical University, undergraduate of department of semiconductor devices and microelectronics. E-mail: the\_strongest\_1994@mail.ru

Now electrets (electric analogs of permanent magnets) have found wide application. The range of their use stretches from household appliance (electret microphones) to equipment of a special purpose special purpose equipment (for example, electret dosimeters, electret hydro-

---

\* Received 27 October 2015.

phones, etc.). Recently electrets have been used in electrostatic microelectromechanical power generators converting the energy of mechanical vibrations into electrical energy. The presence of the electret in the design of these converters ensures their autonomy because the internal electric field acts as a voltage source. The main characteristic of the electret, which determines the magnitude of the output characteristics of the converter is the effective voltage of the electret. It is rather difficult to monitor the influence of numerous factors in the manufacturing process that determine the final characteristics of the device. As a result, there is a large variation of output parameters in the converters.

In this article the theoretical and experimental research of electrostatic converters of energy with an electret has been conducted. The method of determining the fine of value of effective voltage of electrets and value of rigidity of flexible suspension is proposed. It is shown that dispersion of rigidity of flexible suspension is less than 10%. It is found that effective voltage of electrets is decreasing during manufacturing process of converters. It can arise due to the high level of humidity in placement, where assembly operations are carried out. In order to save initial value of effective voltage of electrets it is necessary to monitor the manufacturing process of converters.

**Keywords:** electrostatic converter, variable capacitor, movable electrode, electrets, effective voltage of electrets, capacity of variable capacitor, flexible suspension, mass of movable electrode

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-76-89

## REFERENCES

1. Kozodaev D.A. *Elektretnyi effekt v strukturakh Si-SiO<sub>2</sub> i Si-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>*. Diss. kand. tekhn. nauk [The electrets effect in the Si-SiO<sub>2</sub> and Si-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> structures. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2002. 196 p.
2. Tada Y. Theoretical characteristics of generalized electret generator using polymer film electrets. *IEEE Transactions on Electrical Insulations*, 1986, vol. 21, pp. 457–464.
3. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Trekhelektrodnaya dvukhkondensatornaya MEMS so vstroennym zaryadom [Three-electrodes two-capacitor MEMS with built-in charge]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2014, no. 2, pp. 33–38.
4. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskie vzaimodeistviya v MEMS s ploskoparallel'nymi elektrodami. Ch. 1. Raschet emkosteï [Electrostatic interactions in MEMS with out-of-plane electrodes. Pt. 1. Capacities calculations]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2010, no. 7, pp. 37–41.
5. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskie vzaimodeistviya v MEMS s ploskoparallel'nymi elektrodami. Ch. 2. Raschet elektrostaticheskikh sil [Electrostatic interactions in MEMS with out-of-plane electrodes. Pt. 2. Electrostatic fields calculations]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2010, no. 8, pp. 40–47.

6. Boland J., Chao C.-H., Suzuki Y., Tai Y.-C. Micro electrets power generator *IEEE the Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. MEMS-03: proceedings*, Kyoto, Japan, 19–23 January 2003, pp. 538–541.
7. Tsutsumino T., Suzuki Y., Kasagi N., Sakane Y. Seismic power generator using high-performance polymer electrets. *IEEE 19<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2006*, Istanbul, Turkey, 22–26 January 2006, pp. 98–101.
8. Dorzhiev V.Yu., Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet emkosti MEMS v 2D-priblizhenii [Calculation of MEMS capacity in 2D-approximation]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 4 (62), pp. 73–80.
9. Arakawa Y., Suzuki Y., Kasagi N. Micro seismic power generation using electret polymer film. *Proceedings of PowerMEMS 2004*, Kyoto, Japan, 28–30 November 2004, no. 11, pp. 187–190.
10. Tsutsumino T., Suzuki Y., Kasagi N. Electromechanical modeling of micro electret generator for energy harvesting. *Proceedings 14<sup>th</sup> International Conference Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '07)*, Lyon, France, 2007, vol. 2, pp. 863–866.
11. Okamoto H., Suzuki T., Mori K., Kuwano H. A concept of an electret power generator integrated with a rectifier. *Proceedings of PowerMEMS 2009*, Washington, DC, USA, 1–4 December 2009, pp. 292–295.
12. Tsutsumino T., Suzuki Y., Kasagi K., Kashiwagi K., Morizawa Y. Micro seismic electret generator for energy harvesting. *Proceedings of PowerMEMS 2006*, Berkeley, CA, USA, 29 November–1 December, 2006, no. 1, pp. 279–282.
13. Lo H.-W., Whang R., Tai Y.-C. A Simple Micro Electret Power Generator. *IEEE 20<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2007. Technical Digest*, Hyogo, Japan, 21–25 January 2007, pp. 859–861.
14. Dragunov V.P., Kostsov E.G. Specific features of operation of electrostatic microgenerators of energy. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, vol. 45, no. 3, p. 234.
15. Dragunov V.P., Loiko D.I. Issledovanie MEMS-generatorov energii [Research of MEMS-generators of energy]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 4 (82), pp. 108–121.