

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

УДК 621.3.049.77.002.5

ИССЛЕДОВАНИЕ МЭМС-ГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГИИ*

В.П. ДРАГУНОВ¹, Д.И. ЛОЙКО²

¹ 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

² 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

В процессе разработки электростатических микрогенераторов энергии измерения выходных характеристик опытных образцов показали, что наблюдается разброс выходного напряжения микрогенераторов в диапазоне от 3 до 18 В. Поскольку основной элемент преобразователя – переменный конденсатор – изготавливался с использованием интегральных технологий в одинаковых условиях, столь большие разбросы выходного напряжения трудно объяснить.

В данной статье проведено теоретическое и экспериментальное исследование электростатических микрогенераторов энергии. Установлено, что основными факторами, влияющими на разброс выходного напряжения микрогенератора, являются разброс жесткости кремниевых балочек вибрационного элемента и различная глубина модуляции емкости переменного конденсатора. Предложена методика, позволяющая определить жесткость кремниевых балочек на полностью собранных преобразователях путем нагружения подвижного электрода дополнительной массой и измерения емкости переменного конденсатора, соответствующей каждому шагу нагружения. В результате было установлено, что разброс жесткости балочек составляет 10 %, который может быть обусловлен 3 %-м разбросом толщины кремниевых балочек вибрационного элемента. Обнаружено наличие микрочастиц на поверхности нижнего электрода, ограничивающее смещение подвижного электрода и не позволяющее добиться максимальной модуляции емкости. Выяснено, что для минимизации разброса выходного напряжения в партии микрогенераторов необходимо повысить точность контроля толщины балочек при изготовлении вибрационного элемента; обеспечить высокий класс чистоты помещения, в котором производятся сборочные операции; осуществлять более тщательный контроль процесса сборки микрогенераторов. Предложено оптимизировать эффективность работы микрогенератора с помощью индивидуального подбора массы подвижного электрода. Данная методика позволяет увеличить эффективность работы почти в два раза.

* Статья получена 30 сентября 2015 г.

Ключевые слова: электростатический микрогенератор энергии, переменный конденсатор, подвижный электрод, неподвижный электрод, жесткость балочек, емкость переменного конденсатора, вибрационный элемент, разброс выходного напряжения

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-4-108-121

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач современной микроэлектроники является обеспечение электропитанием различных датчиков. Решение данной задачи было найдено с появлением таких устройств, как микрогенераторы энергии. В настоящее время одними из наиболее перспективных считаются микроэлектромеханические преобразователи энергии механических колебаний в электрическую [1–12].

Одним из факторов, сдерживающих широкое использование таких преобразователей, является достаточно большой разброс их выходных параметров. Так, например, в процессе разработки электростатических микрогенераторов энергии измерения выходных характеристик опытных образцов показали, что наблюдается разброс выходного напряжения микрогенераторов в диапазоне от 3 до 18 В. Поскольку основной элемент преобразователя – переменный конденсатор – изготавливался с использованием интегральных технологий в одинаковых условиях, столь большие разбросы выходного напряжения трудно объяснимы.

В данной работе проводится теоретическое и экспериментальное исследование электростатических микрогенераторов энергии с целью выявления факторов, влияющих на разброс их характеристик, и разработка методики повышения эффективности работы микрогенераторов.

1. КОНСТРУКЦИЯ ПЕРЕМЕННОГО КОНДЕНСАТОРА

Как отмечалось выше, основным элементом преобразователя является переменный конденсатор, изготавливаемый с использованием интегральных технологий. Именно разброс его параметров в наибольшей степени и определяет разброс характеристик всего преобразователя.

При проведении экспериментальных исследований использовался переменный конденсатор, изготовленный из 100 Si, конструкция которого показана на рис. 1, а. Его основными элементами являются: неподвижный и подвижный электроды, вибрационный элемент и дополнительная масса. Неподвижный электрод и рамка вибрационного элемента жестко закрепляются на основании корпуса. Подвижный электрод соединяется с вибрационным элементом (рис. 1, б) и сейсмомассой при помощи клея.

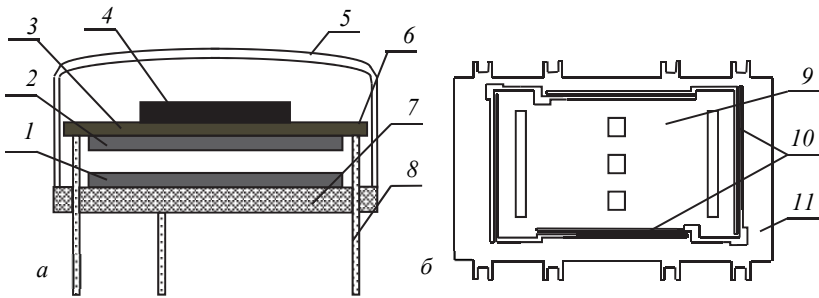


Рис. 1. Конструкция переменного конденсатора (а), вибрационный элемент (б):

1 – неподвижный электрод; 2 – подвижный электрод; 3 – вибрационный элемент; 4 – сейсмомасса (металлическая пластина); 5 – крышка корпуса; 6 – места крепления вибрационного элемента к ножкам корпуса; 7 – основание корпуса; 8 – ножки корпуса; 9 – подвижная часть; 10 – кремниевые балочки; 11 – рамка

Для уменьшения демпфирования подвижный электрод содержит сквозные отверстия.

Под действием внешних механических колебаний за счет прогиба кремниевых балочек вибрационного элемента подвижный электрод смещается относительно неподвижного, в результате чего происходит изменение межэлектродного зазора конденсатора. Генерация выходного напряжения происходит при совершении работы внешними механическими силами против электростатической силы при подаче напряжения между электродами.

2. МОДЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО КОНДЕНСАТОРА

Если пренебречь массой балочек по сравнению с сейсмомассой, то механическую модель переменного конденсатора можно представить в следующем виде (рис. 2) [13].

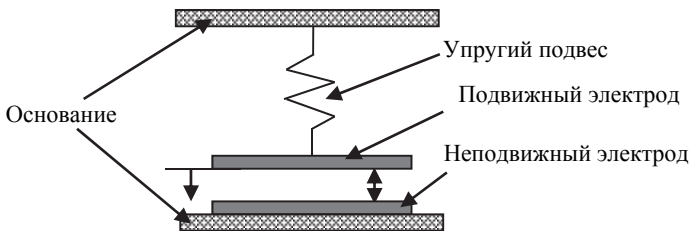


Рис. 2. Упрощенная механическая модель переменного конденсатора

Уравнение равновесия (баланса сил), описывающее данную систему при кинематическом возбуждении, имеет вид [14]

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + kx = -ma_0, \quad (1)$$

где m – масса подвижного электрода; β – коэффициент демпфирования; k – жесткость упругого подвеса; a_0 – ускорение, соответствующее колебаниям основания; x – смещение подвижного электрода относительно неподвижного.

В статическом режиме в данной системе на подвижный электрод будут действовать только возвращающая сила упругого подвеса и сила тяжести. Тогда уравнение равновесия для такой системы можно записать в виде

$$kx = mg, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения.

Для данной конструкции переменного конденсатора величина генерируемого напряжения зависит от таких параметров, как масса подвижного элемента (центральная подвижная часть вибрационного элемента + подвижный электрод + сейсмомасса); коэффициент демпфирования; жесткость кремниевых балочек вибрационного элемента; глубина модуляции емкости (отношение C_{\max} / C_{\min}).

Для выявления параметров, в наибольшей степени влияющих на разброс выходного напряжения, рассмотрим вклад каждого из них.

Было установлено, что величина массы подвижного элемента при используемых технологических процессах могла варьироваться в пределах от 2,71 до 2,74 г. Такая погрешность вносит незначительный вклад в разброс выходных напряжений, который составляет менее 1 %.

Подвижный электрод содержит сквозные отверстия, размер и расположение которых выбирались таким образом, чтобы минимизировать влияние демпфирования движения, вызванного внешними механическими колебаниями. В результате вклад от неповторяемости эффективности демпфирования в данном случае, на наш взгляд, также мал.

Следующим фактором, который может влиять на разброс выходного напряжения, является разброс значений жесткости балочек вибрационного элемента. В случае, когда в упругом подвесе используются четыре кремниевые балочки, общая жесткость упругого подвеса будет равна

$$k = \frac{48EJ}{L^3} = \frac{4Ebh^3}{L^3}, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга; J – момент инерции; L , b , h – длина, ширина и толщина одной балочки соответственно [15].

Из выражения (3) видно что, величина жесткости зависит от длины, ширины и толщины кремниевых балочек. Однако провести непосредственные измерения и установить разброс этих параметров на изготовленных преобразователях не представляется возможным. Для решения этой задачи была разработана специальная методика, позволяющая определить жесткость балочек на полностью собранных преобразователях путем нагружения подвижного электрода дополнительной массой и измерения емкости переменного конденсатора, соответствующей каждому шагу нагружения.

3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ БАЛОЧЕК

В рамках модели (1), когда система находится в статическом равновесии, жесткость упругого подвеса, согласно выражению (2), будет равна

$$k = m_n g / x_n, \quad (4)$$

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

Величину смещения подвижного электрода x_n можно определить с помощью измерения емкости переменного конденсатора

$$C_n = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0 - x_n} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0(1 - x_n / d_0)} = \frac{C_0}{1 - z_n}, \quad (5)$$

где C_n – емкость, измеренная после смещения подвижного электрода; d_0 – максимальный (начальный) межэлектродный зазор; $C_0 = \varepsilon \varepsilon_0 S / d_0$ – начальная емкость, соответствующая максимальному межэлектродному зазору; S – площадь подвижного электрода; ε_0 – электрическая постоянная; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами; z_n – относительное смещение подвижного электрода.

Откуда следует, что

$$z_n = x_n / d_0 = 1 - C_0 / C_n. \quad (6)$$

Таким образом, смещение подвижного электрода x_n может быть найдено по формуле

$$x_n = m_n g / k = d_0 z_n = d_0 (1 - C_0 / C_n). \quad (7)$$

В результате, согласно (4) и (7), жесткость балочек может быть выражена через значения емкости, полученные в результате эксперимента

$$k = \frac{m_n g}{d_0 z_n} = \frac{m_n g}{d_0 (1 - C_0 / C_n)} = \frac{m_n g C_0}{\varepsilon \varepsilon_0 S (1 - C_0 / C_n)}. \quad (8)$$

Таким образом, зная площадь подвижного электрода S , измерив начальную емкость C_0 и емкость переменного конденсатора C_n при смещении подвижного электрода под действием массы m_n , можно определить жесткость.

4. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментального определения жесткости балочек измерялась емкость переменного конденсатора при смещении подвижного электрода под действием нагружаемой на него дополнительной массы. Схематическое изображение конструкции переменного конденсатора при измерении его емкости представлено на рис. 3.

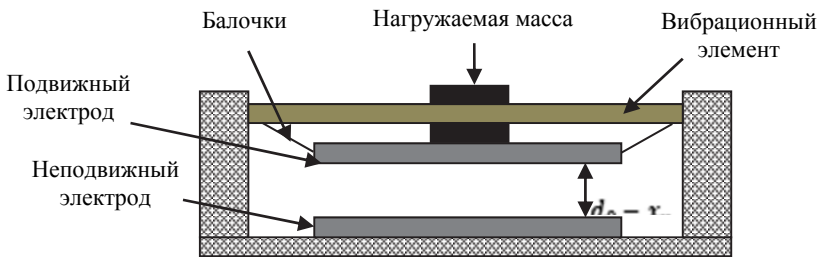


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции переменного конденсатора с нагружаемой массой при измерении его емкости

Начальная емкость C_0 , соответствующая максимальному межэлектродному зазору d_0 , измерялась в перевернутом состоянии конденсатора, в результате чего подвижный электрод ложился на неподвижную рамку вибрационного элемента. Соответствующая величина межэлектродного зазора вычислялась по формуле

$$d_0 = \varepsilon \varepsilon_0 S / C_0. \quad (9)$$

Для более точного определения жесткости по полученным экспериментальным данным строилась зависимость относительного смещения подвижного электрода от его массы

$$z_n = 1 - C_0 / C_n = \frac{g}{kd_0} m_n. \quad (10)$$

Согласно выражению (10) данная зависимость должна иметь вид прямой, угол наклона которой определяет величину жесткости кремниевых балочек.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 4 приведены графики зависимости относительного смещения подвижного электрода z_n от массы m_n для трех образцов с максимальными межэлектродными зазорами 262, 404 и 182 мкм соответственно. Значения зазоров вычислялись по измеренным значениям C_0 .

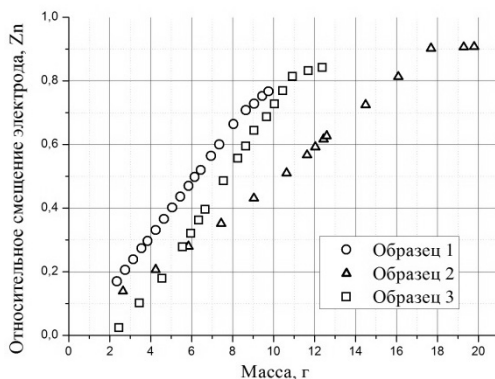


Рис. 4. Экспериментальная зависимость относительного смещения подвижного электрода от массы для образцов с зазорами:

1 – 262 мкм; 2 – 404 мкм; 3 – 182 мкм

Из представленных графиков видно, что зависимости имеют разный угол наклона, что говорит о наличии разброса жесткости; тенденцию к насыщению при максимальных смещениях подвижного электрода (0.8...0.9), т. е. что-то не дает подвижному электроду сместиться до конца; берут свое начало не от нуля.

Так как подвижный электрод смещается не до конца под действием дополнительной массы, то между электродами остается микрозазор Δd_1 . Данный микрозазор может быть обусловлен попаданием микрочастиц (пылинок, ворсинок, кремниевых крошек и т. д.) на поверхность неподвижного электрода во время сборочных операций.

Экспериментально определить величину Δd_1 можно с учетом того, что:

$$\Delta d_1 = d_{\min} = \varepsilon \varepsilon_0 S / C_{\max}, \quad (11)$$

где C_{\max} – максимальное значение емкости; d_{\min} – величина зазора, при котором емкость перестает расти.

Во время приклеивания подвижного электрода к вибрационному элементу возможно также попадание микрочастиц в промежуток между ними, вследствие чего образуется микрозазор Δd_2 . Наличие этих микрочастиц не позволяет кремниевым балочкам полностью выпрямиться при переворачивании микрогенератора во время измерения начальной емкости C_0 . В результате при измерении емкости C_0 кремниевые балочки оказываются деформированными, из-за чего зависимость z_n от массы m_n будет начинаться не из нуля.

С учетом наличия микрозазора Δd_2 начальная емкость и емкость, измеренная после смещения подвижного электрода, будут соответственно равны

$$C_0^* = \varepsilon \varepsilon_0 S / d_0^*, \quad (12)$$

$$C_n^* = \varepsilon \varepsilon_0 S / (d_0^* - x_n^*), \quad (13)$$

где $x_n^* = x_n - \Delta d_2$.

В результате в новых переменных зависимость относительного смещения подвижного электрода от его массы примет вид

$$z_n = \left(1 - C_0^* / C_n^*\right) = -\Delta d_2 / d_0^* + \left(g / k d_0^*\right) m_n. \quad (14)$$

Полученное выражение более соответствует экспериментальным зависимостям по сравнению с выражением (10), так как появилось слагаемое, учитывающее смещение зависимости от нуля.

Для минимизации погрешностей определения параметров проводилась аппроксимация экспериментальных зависимостей с помощью метода

наименьших квадратов. Так как ожидаемая зависимость (14) должна иметь линейный характер, аппроксимирующую зависимость представляли прямой линией:

$$z_{\text{аппр}} = b_0 + b_1 m_n, \quad (15)$$

где b_0 и b_1 – определяемые коэффициенты.

Графики экспериментальных и аппроксимирующих зависимостей для трех образцов представлены на рис. 5.

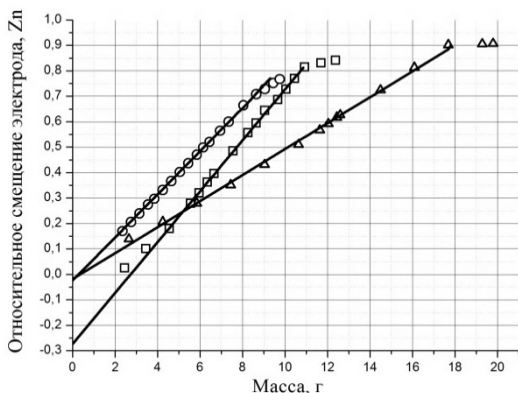


Рис. 5. Экспериментальные (маркеры) и аппроксимирующие (сплошные линии) зависимости для трех образцов (обозначения соответствуют рис. 4)

Из сопоставления (14) и (15) имеем, что

$$b_0 = -\Delta d_2 / d_0^*, \quad b_1 = g / kd_0^*,$$

откуда

$$\Delta d_2 = -b_0 \varepsilon \varepsilon_0 S / C_0^*, \quad (16)$$

$$k = g C_0^* / (b_1 \varepsilon \varepsilon_0 S). \quad (17)$$

Таким образом, получили выражение, позволяющее по экспериментальным данным рассчитать величину жесткости для каждого преобразователя. В результате было установлено, что разброс значений жесткости для всей партии образцов, согласно (17), составляет $\pm 10\%$. Так как жесткость зависит

от длины, ширины и толщины кремниевых балочек, то на разброс величины жесткости может влиять неповторяемость этих параметров. Согласно технологии изготовления микрогенератора длина и ширина балочек задавались соответствующими размерами на фотошаблоне и воспроизводилась с высокой точностью. Толщина же балочек определялась процессом анизотропного травления кремния в 33 %-м растворе КОН при температуре 70 °С, в результате воспроизводимость толщины имела меньшую точность. Так как жесткость балочек, согласно выражению (3), зависит от толщины в кубе, то разброс толщины хотя бы на $\pm 3\%$ приведет к разбросу жесткости на величину порядка $\pm 10\%$.

Анализ показывает, что негативные последствия неповторяемости жесткостей упругого подвеса можно несколько уменьшить за счет индивидуального подбора сейсмомассы для каждого генератора. При этом для каждого микрогенератора необходимо измерить зависимость z_n от массы m_n и определить оптимальную величину массы, при которой достигается максимальная модуляция емкости. На практике данная методика позволяет повысить эффективность функционирования микрогенератора почти в два раза.

В ходе эксперимента было также выявлено, что попадание различного рода загрязнений на поверхность электродов во время сборочных операций ограничивает движение подвижного электрода на величину Δd_1 снизу и Δd_2 сверху. Оценки, сделанные по экспериментальным данным с использованием выражений (11) и (16), показали, что величины Δd_1 и Δd_2 для исследуемых образцов микрогенераторов лежат в диапазоне от 2 до 50 мкм, что характерно для пылинок, ворсинок, кремниевых крошек после резки. Наличие таких микрочастиц могло приводить к уменьшению отношения C_{\max} / C_{\min} микрогенераторов на 30...50 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложена методика анализа экспериментальных данных, позволяющая устанавливать основные факторы, приводящие к неповторяемости характеристик микрогенераторов.

В ходе работы были получены следующие результаты: установлено, что разброс выходного напряжения возникает из-за разной глубины модуляции емкости, на которую в первую очередь влияют такие факторы, как разброс жесткости кремниевых балочек и попадание микрочастиц между электродами и вибрационным элементом во время сборки; показано, что разброс значений жесткости балочек вибрационного элемента может достигать 10 %; обнаружено наличие микрочастиц на поверхности нижнего электрода, ограничивающее смещение подвиж-

ного электрода и не позволяющее добиться максимальной модуляции емкости; предложено оптимизировать эффективность работы микрогенератора с помощью индивидуального подбора массы подвижного электрода.

В целом, чтобы минимизировать разброс выходного напряжения в партии микрогенераторов, необходимо повысить точность контроля толщины балочек при изготовлении вибрационного элемента; обеспечить высокий класс чистоты помещения, в котором производятся сборочные операции; осуществлять более тщательный контроль процесса сборки микрогенераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Микроэлектромеханические преобразователи // Микроэлектроника. – 2012. – Т. 41, № 2. – С. 120–135.
2. Багинский И.Л., Косцов Э.Г., Соколов А.А. Электростатические микрогенераторы энергии с высокой удельной мощностью // Автометрия. – 2010. – Т. 46, № 6. – С. 90–105.
3. Багинский И.Л., Косцов Э.Г. Анализ возможности создания микроэлектронного электростатического генератора энергии // Автометрия. – 2002. – № 1. – С. 107–122.
4. Багинский И.Л., Камышилов В.Ф., Косцов Э.Г. Исследование особенностей функционирования двухконденсаторного электростатического генератора // Автометрия. – 2011. – Т. 47, № 6. – С. 100–120.
5. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМП со встречно-штырьевой структурой // Доклады АН ВШ РФ. – 2009. – № 1 (12). – С. 99–106.
6. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатический микроэлектромеханический преобразователь с последовательной схемой включения компонентов // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 6 (119). – С. 37–43.
7. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Оптимизация микроэлектромеханического генератора с параллельным включением элементов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2013. – № 1 (71). – С. 46–51.
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. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Микроэлектромеханический генератор на основе дубликатора Беннета // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 11 (148). – С. 39–42.
10. Остертак Д.И. Разработка теоретических основ и методики проектирования электростатических МЭМП механической энергии в электрическую: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01. – Новосибирск, 2009. – 209 с.

11. Блум К.Е. Исследование режимов работы и конструктивных особенностей МЭМ преобразователя энергии с изменением площади перекрытия электродов: дис. ... магистра техники и технологии: 210100.68. – Новосибирск, 2012. – 84 с.
12. Гольцова М. МЭМС-устройства аккумулирования энергии // *Электроника*: НТБ. – 2013. – № 7. – С. 117–126.
13. Драгунов В.П., Косцов Э.Г. Особенности функционирования электростатических микрогенераторов энергии // *Автометрия*. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 62–73.
14. Аш Ж. Датчики измерительных систем. Кн. 2. – М.: Мир, 1992. – 419 с.
15. Мухуров Н.И., Ефремов Г.И., Жвавый С.П. Упругие элементы в микроэлектромеханических системах // *Нано- и микросистемная техника*. – 2008. – № 12 (101). – С. 12–22.

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

Лоико 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*

V.P. Dragunov¹, D. I. Loiko²

¹ 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

² 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

During development process of electrostatic microgenerators of energy the measurement results of output characteristics of prototypes it has been shown that the dispersion of output voltage of microgenerators is in the range from 3 to 18 V. The nature of this high dispersion of output voltage is not clear, because the basic element of the converter (the variable capacitor) was made at the same conditions using by integral technologies.

*Received 30 September 2015.

In this paper theoretical and experimental research of electrostatic microgenerators of energy has been carried out. The dispersion of output voltage arises due to dispersion of rigidity of silicon beams of vibrational element and different ratio of maximum and minimum capacities of variable capacitor. The method of determination of rigidity of silicon beams is suggested. It was found that the 10% dispersion of rigidity of silicon beams arise due to 3% dispersion of thickness of silicon beams. It was found that the modulation of capacitance is limited by micro-particles on the surface of fixed electrode. In order to minimize of dispersion of output voltage it is necessary to increase manufacture process monitoring of microgenerators. The method of increase of the overall performance of microgenerators is proposed.

Keywords: electrostatic microgenerator of energy, variable capacitor, movable electrode, fixed electrode, rigidity of silicon beams, capacity of variable capacitor, vibrational element, dispersion of output voltage

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-4-108-121

REFERENCES

1. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Mikroelektromekhanicheskie preobrazovateli [Microelectromechanical converters]. *Mikroelektronika – Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 2, pp. 120–135.
2. Baginskii I.L., Kostsov E.G., Sokolov A.A. Elektrostaticheskie mikrogeneratory energii s vysokoi udel'noi moshchnost'yu [Highpower electrostatic microgenerators of energy]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 90–105. (In Russian)
3. Baginskii I.L., Kostsov E.G. Analiz vozmozhnosti sozdaniya mikroelektronnogo elektrostaticheskogo generatora energii [Analysis of the possibility of creating a microelectronic electrostatic generator of energy]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2002, no. 1, pp. 107–122. (In Russian)
4. Baginskii I.L., Kamyshlov V.F., Kostsov E.G. Issledovanie osobennosti funktsionirovaniya dvukhkondensatornogo elektrostaticheskogo generatora [Researching of features of functioning of two-capacitor electrostatic generator]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 100–120. (In Russian)
5. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskie vzaimodeistviya v MEMP so vstrechno-shtyry'voi strukturoi [Coulomb interactions in interdigitated MEMS]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2009, no. 1 (12), pp. 99–106.
6. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskii mikroelektromekhanicheskii preobrazovatel s posledovatelnoi shemoi vklyucheniya komponentov [An electrostatic microelectromechanical converter with a series circuit]. *Nano- i mikro-sistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2010, no. 6 (119), pp. 37–43.

7. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Optimizatsiya mikroelektromekhanicheskogo generatora s parallel'nym vklyucheniem elementov [Optimization of MEMS generator with parallel connecting of elements]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 1 (71), pp. 46–51.
8. Dorzhiev V.Yu., Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet emkosti MEMS v 2D-priblizhenii [MEMS capacitance calculation within 2D-approach]. *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. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Mikroelektromekhanicheskii generator na osnove duplikatora Benneta [Microelectromechanical generator based on Bennets duplicator]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2012, no. 11 (148), pp. 39–42.
10. Ostertak D.I. *Razrabotka teoreticheskikh osnov i metodiki proektirovaniya elektrosticheskikh MEMP mekhanicheskoi energii v elektricheskuyu*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of theoretical bases and a technique of design of electrostatic MEMP of mechanical energy in the electrical. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2009. 209 p.
11. Blum K.E. *Issledovanie rezhimov raboty i konstruktivnykh osobennostei MEM preobrazovatelya energii s izmeneniem ploshchadi perekrytiya elektrodov*. Diss. magistra tekhniki i tekhnologii [Researching of operation modes and design features of MEM of the transformer of energy with change of the area of overlapping of electrodes. Diss. of master of technics and technology]. Novosibirsk, 2012. 84 p.
12. Gol'tsova M. MEMS-ustroistva akumulirovaniya energii [MEMS energy harvesting devices]. *Elektronika: NTB – Electronics: STB*, 2013, no. 7, pp. 117–126.
13. Dragunov V.P., Kostsov E.G. Osobennosti funktsionirovaniya elektrosticheskikh mikrogeneratorov energii [Specific features of operation of electrostatic microgenerators of energy]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 62–73. (In Russian)
14. Asch G. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Paris, Dunod, 1991. 816 p. (Russ. ed.: Ash Zh. *Datchiki izmeritel'nykh sistem*. Kn. 2. Translated from French. Moscow, Mir Publ., 1992. 419 p.).
15. Mukhurov N.I., Efremov G.I., Zhvavyi S.P. Uprugie elementy v mikroelektromekhanicheskikh sistemakh [An elastic elements in microelectromechanical systems]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2008, no. 12 (101), pp. 12–22.