

## ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77.002.5

### ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ МИКРОГЕНЕРАТОРЫ ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ

И. Л. Багинский, Э. Г. Косцов, А. А. Соколов

*Учреждение Российской академии наук  
Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: kostsov@iae.nsk.su*

Проведён анализ режимов работы микрогенератора электрической энергии на основе многослойной структуры металл—диэлектрик со встроенным зарядом—микрозазор—подвижный электрод, принцип действия которого основан на колебаниях электрода в поле сил объёмного заряда диэлектрика. Установлена специфика электромеханического преобразования энергии при колебаниях поверхности электрода в субмикронных зазорах. Показано, что такие микрогенераторы в режиме низкочастотных колебаний (10–100 Гц) способны без использования источников напряжения развивать мощность, достаточную для энергообеспечения современных микросхем (до 1–10 мВт/см<sup>2</sup>).

*Ключевые слова:* электростатика, микрогенератор энергии, диэлектрик, воздушный зазор, микровибрации, объёмный заряд.

**Введение.** Современный уровень параметров интегральных схем, значительное снижение потребляемой ими энергии делают реальной задачу создания больших сетей микромощных приборов с высокой плотностью размещения: до 30–50 м между ними (в помещении) или 300–500 м (в открытом пространстве) при скорости передачи данных до 250 Кбит/с и более. Такие параметры определяют требования к мощности беспроводного узла сети — она может быть значительно меньшей  $10^{-3}$  Вт.

При большом количестве узлов в сети становится критической проблема стоимости энергопитания каждого элемента узла или замены батарей. Трудно представить и технологию замены источников питания в каждом элементе сети, учитывая возможную труднодоступность мест их размещения.

Вопрос непрерывного производства энергии, достаточной для питания современных микросхем с практически неограниченным сроком эксплуатации, необходимо связывать и с поиском источников энергии в окружающей среде. Солнечная энергия и энергия механических колебаний поверхностей различных твёрдых тел могут быть использованы для генерации электрической энергии милли- или микроваттного диапазона.

Можно отметить, что высокоамплитудные колебания поверхностей твёрдых тел (свыше 10 мкм) имеют место, как правило, вблизи высококонцентрированных источников энергии. Простейший пример — колебания стенок различных технических устройств, например стенок холодильных агрегатов, стиральных машин, микроволновых печей и т. п. Сбор энергии таких колебаний не является эффективным — более целесообразно снижение связанных с ними потерь.

Для большинства современных источников механических колебаний (поверхностей твёрдых тел) характерны их небольшие амплитуды, лежащие в диапазоне 0,1–2,0 мкм, при этом анализ частотного распределения амплитуд показывает, что наиболее энергоёмкими являются низкие частоты: 1–100 Гц [1]. К таким колебаниям можно отнести вибрации строительных конструкций: опор, мостов, дорожных полотён, стен зданий и т. п.

В последние несколько лет появилось большое число публикаций, посвящённых разработке микрогенераторов электрической энергии, в том числе микроэлектромеханических систем (МЭМС-генераторов), способных преобразовывать механическую энергию из окружающей среды в электрическую. Возник новый термин "energy harvesting" — «сборка энергетического мусора» [2–12]. Такие генераторы способны, в частности, обеспечивать энергопитание микросхем в автономном режиме. Изготовление МЭМС-генераторов может осуществляться в одном технологическом цикле с производством базовой микросхемы. Указанная задача рассматривается как одна из важнейших в современной микроэлектронике.

Среди различных физических принципов, на которых может быть основана работа микрогенераторов электрической энергии, наиболее эффективны электростатические, поскольку электромагнитные генераторы энергии неэффективны в области малых амплитуд колебаний и требуют использования трансформаторов напряжения, а пьезоэлектрические неэффективны при малых частотах колебаний [13] и, кроме того, технология изготовления высококачественных тонких пьезоэлектрических плёнок разработана ещё недостаточно.

Простейшим примером электростатического генератора является классическая машина Теплера [14], принцип действия которой основан на работе по раздвижению электродов предварительно заряженного конденсатора, совершаемой механическими силами против сил электрического поля. В этом генераторе используется внешний источник напряжения и ключи для заряда конденсатора в каждом цикле преобразования энергии и для переключения нагрузки.

Именно такой тип генератора применяется в большинстве электростатических МЭМС-генераторов независимо от их конструкции (модуляция ёмкости осуществляется за счёт изменения величины зазора или изменения площади перекрытия электродов) [1, 13, 15, 16]. Отметим, что последняя конструкция микрогенераторов не позволяет осуществлять колебания с субмикронной амплитудой и высокой глубиной модуляции ёмкости.

Удельная мощность современных МЭМС-генераторов достаточно низкая (не превышает 1–5 мкВт/см<sup>2</sup>) вследствие малой глубины модуляции ёмкости структуры, при этом минимальный межэлектродный зазор составляет порядка 2 мкм. Уменьшение зазора между электродами может увеличить мощность генераторов, но наряду со специфическими технологическими трудностями реализации данных конструкций этому препятствует и возрастание вероятности электрического пробоя межэлектродного зазора. Низкая мощность является основным недостатком этих генераторов, так же как и необходимость использования источников постоянного напряжения. Роль подобных микрогенераторов заключается фактически только в увеличении срока службы источников напряжения.

Для исключения необходимости использования таких источников в настоящее время предлагаются различные решения, в том числе схемотехнические, когда часть энергии, вырабатываемой генератором, направляется через обратную связь для создания дополнительного заряда на его электродах. При этом остаётся открытым вопрос о том, каким способом формируется первоначальный заряд [16].

Публикации [17–21] посвящены разработке МЭМС-генераторов, производящих электрическую энергию без использования источников напряжения. Принцип их работы связан с размещением в межэлектродном пространстве диэлектрика со встроенным зарядом. В этом случае механоэлектрическое преобразование энергии осуществляется так же, как и в классических электретных генераторах напряжения [22], для которых роль источника напряжения играет внутреннее поле объёмного заряда или поляризация.

Целью представленной работы является анализ возможности создания высокоэнергетических МЭМС-генераторов, которые будут функционировать без источников напряжения и преобразовывать энергию низкочастотных колебаний с субмикронными амплитудами

(в диапазоне 10–1000 нм) в электрическую энергию, достаточную для обеспечения функционирования современных микросхем. Мы не рассматриваем особенности механической конструкции таких генераторов, полагая, что подобные задачи на примере классических сейсмографов хорошо разработаны, включая математические модели квазигармонических колебаний сейсмомасс при различной жёсткости элементов упругости.

В данной работе проведён анализ особенностей функционирования электростатических генераторов энергии, имеющих структуру металл—диэлектрик—воздушный зазор—подвижный электрод, в которых на поверхности диэлектрика или в его объёме находится заряд, а ток на полезной нагрузке вызывается модуляцией указанного зазора.

**Модель. Основные уравнения, описывающие эффект генерации энергии в электростатических машинах с диэлектриком со встроенным зарядом.** Схема рассматриваемого генератора представлена на рис. 1, *a*. Его структура включает в себя четыре тонких слоя: электрод; диэлектрик (сегнетоэлектрик) толщиной  $d$ ; воздушный зазор с переменной во времени толщиной  $d_1(t)$ , изменяющейся под действием механических сил; подвижный электрод, который совершает колебательные движения относительно поверхности диэлектрика.

В общем случае принцип работы такого генератора энергии заключается в том, что в первоначальном состоянии в каждом из слоёв, включая металлические электроды, устанавливаются исходное распределение заряда и распределение напряжённости электрического поля  $E(x, t)$ . Величина  $E(x, t)$  определяется распределением заряда в слое диэлектрика, при этом поле в электродах экранируется формируемым в них зарядом (рис. 1, *b*). При нарушении исходного состояния — изменении величины  $d_1(t)$  под воздействием механических сил — в каждом из слоёв происходит перераспределение  $E(x, t)$ , сопровождающееся протеканием полного тока в цепи нагрузки, соединяющей электроды. При прохождении тока через нагрузку  $R$  выделяется энергия, характеризующая энергетические параметры генератора.

В настоящее время класс генераторов электрической энергии, которые функционируют на основе указанного принципа, достаточно широко известен, они имеют реальное практическое применение и называются электретными генераторами [22]. В таких генераторах в качестве диэлектрика используется многочисленная группа материалов, обладающих способностью длительного сохранения поверхностного заряда. Электреты [23] различаются по способу создания этого заряда: трибоэлектреты, формирующиеся при контактной

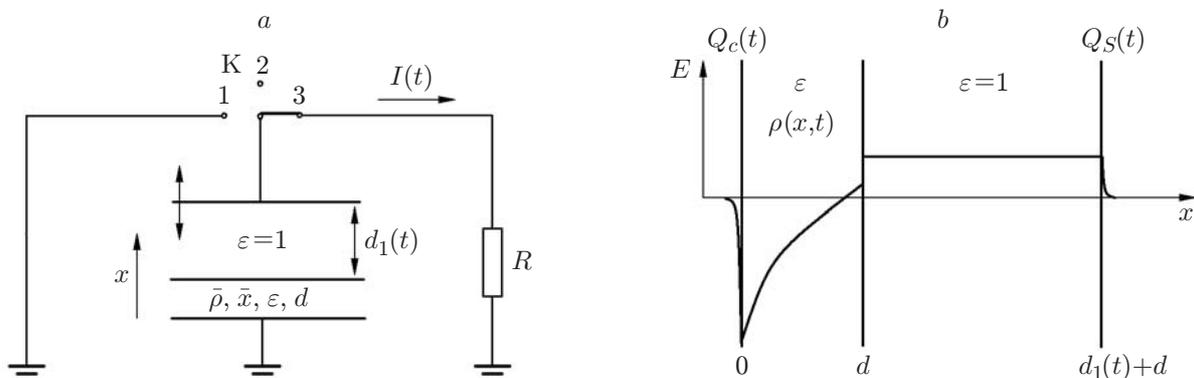


Рис. 1. Схематическое изображение генерации электрической энергии на основе диэлектрика со встроенным зарядом: принципиальная схема электростатического генератора (*a*); распределение поля в некоторый момент времени  $t$  в структуре металл—диэлектрик со встроенным зарядом—воздушный зазор—вибрирующий электрод (*b*)

электризации; короноэлектреты, электризующиеся в коронном разряде; термоэлектреты, образованные при термической электризации; электреты, создаваемые электризацией за счёт частично проникающих пучков электронов и ионов или проникающего излучения, а также при освещении образцов светом, как правило, ультрафиолетового диапазона в присутствии поля. Электреты различаются и по форме распределения сохранённого заряда и его знака. Он может быть однородно либо неоднородно распределён по толщине слоя, быть одного знака (моноэлектрет) или двух разных знаков (гетероэлектрет). Электреты, используемые в генераторах энергии, являются достаточно толстыми слоями с минимальной толщиной в пределах 5–10 мкм, а сведения об изготовлении их методами технологии микроэлектроники, насколько нам известно, практически отсутствуют.

Для описания в общем случае особенностей функционирования рассматриваемого генератора предположим, что в диэлектрике находится заряд  $\rho(x, t)$ , который может изменяться с течением времени, с поверхностной плотностью  $Q_P(t) = \bar{\rho}(t)\bar{x}(t)$ , где  $\bar{\rho}(t)$  — усреднённая по толщине диэлектрика плотность объёмного заряда  $\rho(x, t)$ ,  $\bar{x}(t)$  — центр тяжести его распределения.

Анализируя поведение полного тока в указанной структуре при изменении  $d_1(t)$  для заданных значений  $d$ ,

$$\bar{\rho}(t) = 1/d \int_0^d \rho(x, t) dx, \quad \bar{x}(t) = \int_0^d \rho(x, t) x dx / \int_0^d \rho(x, t) dx,$$

будем использовать систему классических одномерных уравнений, состоящую из выражений для полного тока  $j(t)$  и тока проводимости  $j_c(x, t)$ , уравнений непрерывности и Пуассона и выражения, определяющего в каждый момент времени значение потенциала между электродами  $V(t)$ :

$$j(t) = j_c(x, t) + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E(x, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial j_c(x, t)}{\partial x} = -\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E(x, t)}{\partial x} = -\frac{\rho(x, t)}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (3)$$

$$\int_0^{d_1(t)+d} E(x, t) dx = -V(t). \quad (4)$$

Наведённое зарядом в диэлектрике поле в электродах экранируется зарядом  $Q_c(t)$  в области  $x = 0$  (условно на катоде) и  $Q_s(t)$  в области  $x = d + d_1(t)$  (условно на аноде).

Интегрируя обе части уравнения (3) по координате  $x$ , учитывая, что на свободной границе диэлектрика поле возрастает скачком в  $\varepsilon$  раз, т. е.

$$\varepsilon E(d_-, t) = E(d_+, t), \quad (5)$$

и подставляя полученную формулу для  $E(x, t)$  в уравнение (4), получаем выражения для поля на границе  $x = 0$ :  $E(0, t) = E_c(t)$ , и соответственно наведённого на электроде в области  $x = 0$  удельного заряда

$$Q_c(t) = -\varepsilon\varepsilon_0 E_c(t) = C(t)(V(t) + V_P(t)) - \bar{\rho}(t)d. \quad (6)$$

При этом суммарная ёмкость всей структуры  $C(t)$  и характерное напряжение  $V_P(t)$  имеют вид

$$C(t) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d + \varepsilon d_1(t)}, \quad (7)$$

$$V_P(t) = \frac{Q_P(t)}{C_F}, \quad (7a)$$

где  $C_F = \varepsilon\varepsilon_0/d$  — удельная ёмкость слоя диэлектрика.

Интегрируя уравнение (1) от 0 до  $d_1(t) + d$  и учитывая (6), (7), получаем общее выражение для поведения во времени в рассматриваемой структуре полного тока:

$$j(t) = \bar{j}_c(t) + \frac{dQ_S(t)}{dt} + \frac{Q_S(t)}{d_1(t) + d} \frac{d(d_1(t))}{dt} + \frac{d}{d_1(t) + d} \frac{d(\bar{\rho}(t)\bar{x}(t))}{dt}, \quad (8)$$

где  $\bar{j}_c(t)$  — средний по толщине всей структуры ток проводимости, включая области экранирования поля в электродах ( $\Delta 1 + \Delta 2$ ):

$$\bar{j}_c(t) = \frac{1}{d_1(t) + d} \int_0^{d_1(t)+d} j_c(x, t) dx; \quad (9)$$

$$Q_S(t) = \varepsilon_0 E_A(t) = -C(t)(V(t) + V_P(t)) \quad (10)$$

— заряд, наведённый в области  $x = d_1(t) + d$ .

Можно отметить, что общая величина удельного заряда  $Q_c(t) + Q_S(t)$ , наведённого на электродах на протяжении всего цикла преобразования энергии, постоянна и равна  $\bar{\rho}(t)d$ : соблюдается условие электронейтральности образца.

Выражения (8)–(10) описывают задачу в общем виде: с учётом изменения межэлектродного расстояния в плоскопараллельном конденсаторе и с учётом изменения величины заряда внутри конденсатора и тока проводимости, вызванного как перемещением этого заряда, так и инжекцией носителей заряда в конденсатор; краевыми эффектами пренебрегается.

Когда величина заряда и его местоположение в диэлектрике фиксированы,  $\bar{\rho}(t)$ ,  $\bar{x}(t) = \text{const}$ , что характерно, например, для классического электрета, то ток проводимости в структуре обусловлен только движением металлической пластины с зарядом  $Q_S(t)$  со скоростью  $d(d_1(t))/dt$ . Тогда усреднённый по толщине структуры ток проводимости запишем как

$$\bar{j}_c(t) = -\frac{Q_S(t)}{d_1(t) + d} \frac{d(d_1(t))}{dt} \quad (11)$$

и полный ток

$$j(t) = \frac{dQ_S(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} [C(t)(V(t) + V_P)]. \quad (12)$$

Когда электроды соединены через нагрузку  $R$  (как изображено на рис. 1, ключ  $K$  в положении 3), изменение напряжения между электродами во времени описывается уравнением

$$\frac{d}{dt} [C(t)(V(t) + V_P)] = -\frac{V(t)}{R}, \quad (13)$$

которое при выключении нагрузки (обрыв цепи, ключ  $K$  в положении 2) имеет вид

$$\frac{d}{dt} [C(t)(V(t) + V_P)] = 0. \quad (14)$$

Уравнения (13) и (14) с соответствующими начальными условиями описывают все возможные режимы работы электростатического генератора, изображённого на рис. 1, *a*.

Для исследования особенностей его функционирования выберем, не нарушая общности рассмотрения, синусоидальный закон изменения величины зазора

$$d_1(t) = d_{10}(1 + \alpha + \sin(\omega t)). \quad (15)$$

Анализ показывает, что при перемещении подвижного электрода в поле объёмного заряда (или поляризации)  $Q_P$ , расположенного в диэлектрике, возможны два способа построения исследуемого генератора в зависимости от способа коммутации ключа  $K$  (см. рис. 1, *a*). Будем называть их условно генераторами напряжения и тока.

**Генератор напряжения.** В таком генераторе усиление напряжения на выходе достигается тем, что в момент максимального сближения поверхностей подвижного электрода и диэлектрика происходит соединение электродов коммутацией ключа  $K$  в положение 1 (см. рис. 1, *a*, ёмкость  $C(t)$  в этот момент максимальна). В начале движения электрода ключ переводится в положение 2, а в момент максимального значения  $d_1(t)$  он переключается в положение 3, и выработанная за время цикла энергия передаётся в нагрузку  $R$  [22].

Проанализируем эффект усиления напряжения более детально. При движении подвижного электрода в условиях разомкнутой цепи ( $j(t) = 0$ ) и согласно (14)

$$C(t)(V(t) + V_P) = \text{const}, \quad (16)$$

тогда

$$C_{\max}(V_{\min} + V_P) = C_{\min}(V_{\max} + V_P), \quad (17)$$

следовательно,

$$V_{\max} = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} (V_{\min} + V_P) - V_P. \quad (18)$$

Допустим, что процесс колебаний начинается с фазы максимального сближения поверхностей, тогда в соответствии с начальным условием  $V(0) = V_{\min}(0) = 0$  после первого перемещения подвижного электрода на максимальное расстояние в условиях разомкнутой цепи (ключ  $K$  в положении 2)

$$V_{\max} = V_P(C_{\max}/C_{\min} - 1). \quad (18a)$$

В этом случае вырабатывается энергия

$$W = \frac{C_{\min} V_{\max}^2}{2} = \frac{C_{\min} V_P^2}{2} \left( \frac{C_{\max}}{C_{\min}} - 1 \right)^2 \approx \frac{V_P^2}{2} \frac{C_{\max}^2}{C_{\min}}. \quad (18b)$$

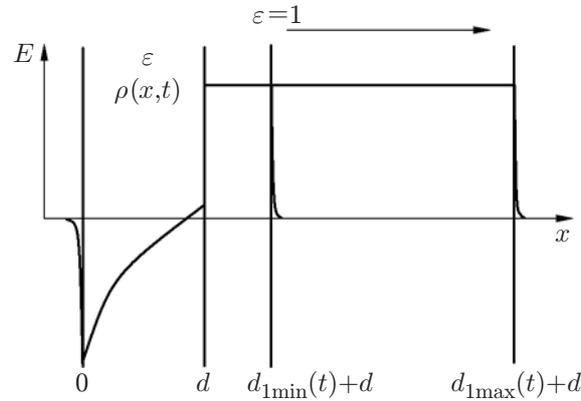


Рис. 2. Схема распределения поля в структуре металл—диэлектрик со встроенным зарядом—воздушный зазор—подвижный электрод в фазе раздвижения пластин в условиях разомкнутой цепи

Принцип преобразования механической энергии в электрическую при перемещении электрода в условиях разомкнутой цепи иллюстрирует схема распределения электрического поля в структуре (рис. 2) как в начальной фазе движения  $d_1 = d_{1\min} = \alpha d_{10}$ , так и при максимальном удалении электрода (анода)  $d_1 = d_{1\max} = 2d_{10} + d_{1\min}$ . При его движении поле в зазоре остаётся постоянным, полный ток равен 0 и в соответствии с увеличением площади под кривой  $E^2(x)$  энергия электрического поля растёт, что выражается в росте разности потенциалов  $V$  между электродами (рис. 3). Энергия передаётся в нагрузку  $R$  при переключении ключа  $K$  в положение 3. Эта передача эффективна, когда величина  $R$  не превышает  $1/(2f\bar{C}S)$ , где  $\bar{C}$  — усреднённая за время цикла величина удельной ёмкости структуры,  $S$  — площадь электрода,  $f$  — частота колебаний.

В отличие от машины Теплера, в которой передача энергии в нагрузку завершается в конце цикла полным разрядом конденсатора  $C(t)$  до  $V(t) = 0$ , в рассматриваемом генераторе при движении подвижного электрода имеет место перемещение между электродами через нагрузку  $R$  индуцируемого в них заряда, экранирующего поле объёмного заряда в

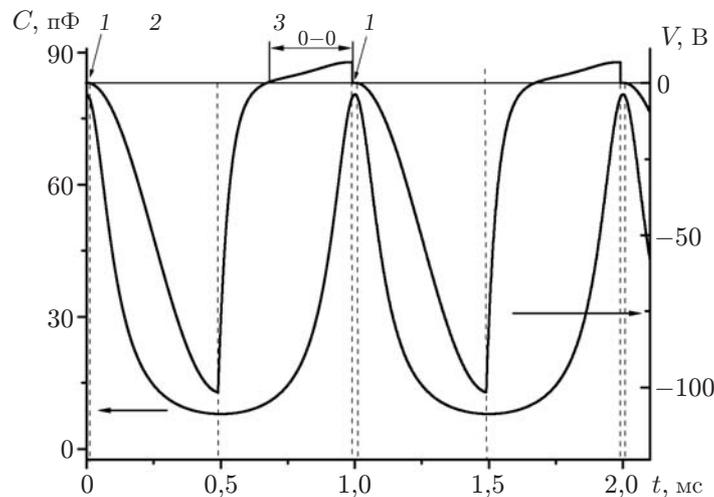


Рис. 3. Поведение  $C(t)$  и  $V(t)$  в генераторе напряжения при  $Q_P = 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $\epsilon = 10$ ,  $d = 1$  мкм,  $d_{10} = 0,5$  мкм,  $d_{1\min} = 10$  нм,  $S = 1$  мм<sup>2</sup>,  $R = 10$  МОм

диэлектрике. Этот процесс является нестационарным, он определяется несколькими постоянными: мгновенным значением  $RC(t)S$ , временем дебаевского экранирования заряда в металле (оно наименьшее из всех времён), временем движения подвижного электрода за полупериод. При этом в определённые моменты времени в зависимости от соотношения указанных постоянных времени возможна смена направления протекания полного тока, когда и напряжение в момент минимального сближения поверхностей ( $V(t) = V_{\min}$ ) меняет знак (см. рис. 3, участок 0–0). Для устранения влияния этого эффекта в начале каждого следующего цикла ключ К переключается в положение 1, тогда начальное значение напряжения  $V_{\min} = 0$  восстанавливается и процесс полностью повторяется.

Отметим, что, несмотря на принципиально иной способ перезарядки ёмкости структуры, данная схема преобразования энергии аналогична машине Теплера за исключением того, что в данном случае роль источника напряжения выполняет поле встроенного заряда, индуцирующее напряжение  $V_P$ .

Для численного анализа задачи была разработана универсальная программа, в которой учитывались все параметры указанной структуры и режимы генерации энергии. Применялась разностная схема счёта с автоматическим выбором шага по времени, обеспечивающим устойчивость решения и заданную его точность.

Один из примеров такого решения, иллюстрирующий генерацию напряжения между электродами для конкретного диэлектрика с малым значением  $\varepsilon$ , показан на рис. 3. Цифры на оси  $t$  характеризуют положение ключа К (см. рис. 1). Из рисунка видно, что роль ключа заключается в синхронном восстановлении в каждом цикле генерации исходного состояния системы, когда  $V_{\min} = 0$ . Такая синхронизация даёт возможность получить усиление напряжения, пропорциональное глубине модуляции ёмкости, в соответствии с (18а); мощность при этом возрастает в соответствии с (18б).

При использовании в генераторе напряжения диэлектрика с большим значением  $\varepsilon$  модуляция ёмкости  $C_{\max}/C_{\min}$  возрастает, но не пропорционально увеличению  $\varepsilon$  (при одной и той же глубине модуляции воздушного зазора), так как величина  $C_{\min}$  меняется мало (она определяется максимальным значением воздушного зазора  $2d_{10} + d_{1\min}$ ). В этом случае при фиксированной величине поляризации  $Q_P$  значение  $V_P$  уменьшается обратно пропорционально  $\varepsilon$  (7а), соответственно уменьшается величина  $V_{\max}$  (18а), а также величина энергии, вырабатываемой за один цикл (18б).

В частности, для параметров структуры, используемых при построении графиков рис. 3, но с увеличением  $\varepsilon$  в 100 раз, величина  $V_P$  уменьшается в 100 раз, а величины  $V_{\max}$  и  $W$  уменьшаются только в 10 раз. Следовательно, для достижения сопоставимых со случаем классического электретного генератора (с параметрами, как на рис. 3) величин выходного напряжения и вырабатываемой мощности надо для сегнетоэлектрика соответственно увеличить и поляризацию в 10 раз (до  $10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup>) (рис. 4). Отметим, что такие значения поляризации не являются предельными для ряда известных сегнетоэлектриков, поэтому возможно увеличение энергии, вырабатываемой генератором на их основе за цикл преобразования, которое будет сдерживаться только напряжением пробоя межэлектродного промежутка. Кроме того, для увеличения энергии, вырабатываемой генераторами, возможно использование в них и сегнетоэлектриков с малым  $\varepsilon$  и большой величиной спонтанной поляризации, например ниобата и танталата лития ( $Q_P$  до 0,5–0,8 Кл/м<sup>2</sup> при  $\varepsilon \approx 40$ ) [24].

**Генератор тока.** Принцип работы генератора тока показан на схеме рис. 1, а, когда ключ К постоянно замкнут на нагрузку  $R$  (положение 3). При модуляции ёмкости структуры генератор работает без усиления напряжения [22].

В литературе описаны частные случаи токового генератора, например электретные микрофоны [21, 22], в которых мало сопротивление нагрузки либо мала амплитуда колеба-

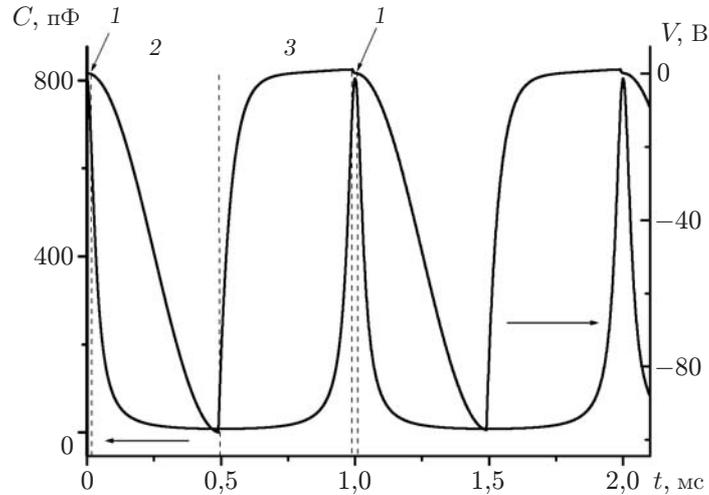


Рис. 4. Поведение  $C(t)$  и  $V(t)$  в генераторе напряжения на основе сегнетоэлектрика с  $\varepsilon = 1000$  и поляризацией  $Q_P = 10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup>. Остальные параметры, как на рис. 3

ний электрода по сравнению с толщиной воздушного зазора [18–21]. Тогда в соответствии с приведённым выше анализом  $V \ll V_P$  и ток в цепи описывается как

$$j(t) = V_P(dC(t)/dt). \quad (19)$$

Рассмотрим общее решение задачи функционирования токового генератора при произвольной нагрузке, используя уравнение (13) с начальным условием  $V(0) = 0$ , и при изменении величины зазора по закону (15).

В безразмерном виде уравнение (13) с учётом (15) записывается следующим образом:

$$\frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = -\left(\frac{1 + \alpha' + \sin \tau}{RC_1S\omega} - \frac{\cos \tau}{1 + \alpha' + \sin \tau}\right)\varphi(\tau) + \frac{\cos \tau}{1 + \alpha' + \sin \tau}, \quad (20)$$

где  $\varphi = V/V_P$ ;  $\tau = \omega t$ ;  $\alpha' = \alpha + d/\varepsilon d_{10}$ ;  $C_1 = \varepsilon_0/d_{10}$  — усреднённая удельная ёмкость воздушного зазора. Следовательно, решение задачи определяется только двумя безразмерными параметрами:  $\alpha'$  и  $RC_1S\omega$ . Учитывая (15), нетрудно показать, что

$$\alpha' = \frac{1}{d_{10}}\left(d_{1 \min} + \frac{d}{\varepsilon}\right). \quad (21)$$

Так как  $d_{1 \max} = d_{1 \min} + 2d_{10}$ , то при  $d_{1 \min} \ll 2d_{10}$  (т. е.  $d_{1 \max} \gg d_{1 \min}$ )

$$\alpha' \approx C_{\min}/C_{\max}. \quad (22)$$

Таким образом, при достаточно большой глубине модуляции воздушного зазора параметр  $\alpha'$  обратно пропорционален глубине модуляции ёмкости структуры.

Один из примеров численного решения уравнения (20) представлен на рис. 5. Первоначальный рост напряжения при первом движении анода аналогичен его росту в генераторе напряжения, он определяется модуляцией ёмкости и величиной  $V_P$  (18a). В последующих периодах движения электрода происходит формирование квазистационарного заряда экранирования (оно описано выше) и амплитуда напряжения  $V_m$  уменьшается, при этом она становится знакопеременной, стремясь к  $\pm V_P$  или менее, в зависимости от сопротивления

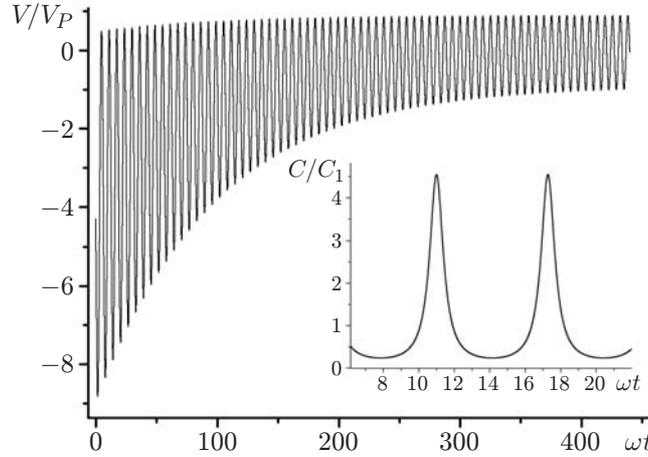


Рис. 5. Переходный процесс установления равновесного режима генератора тока при  $\alpha' = 0,11$ ,  $\omega RC_1 S = 1,11 \cdot 10^2$  ( $Q_P = 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 10$ ,  $d = 1$  мкм,  $d_{10} = 1$  мкм,  $d_{1\min} = 10$  нм,  $S = 1$  мм<sup>2</sup>,  $R = 20$  ГОм,  $f = 100$  Гц)

нагрузки  $R$ . Постоянная времени спада  $V_m$  определяется величиной  $R\bar{C}S$ , где  $\bar{C} \leq C_1$  — ёмкость структуры  $C(t)$  (см. фрагмент на рис. 5), усреднённая за период колебаний.

Особенности поведения  $V(t)$  в установившемся режиме показаны на рис. 6. Изменение зазора  $d_1(t)$ , сопровождаемое соответствующим изменением ёмкости  $C(t)$  индуцирует изменение во времени заряда на электродах  $Q_S(t)$ , максимум которого в общем случае может быть смещён относительно пика ёмкости  $C(t)$ . Такой сдвиг пиков  $Q_S(t)$  и  $C(t)$  (по сравнению с классическим случаем токового генератора, рассмотренным в [22], для которого  $V(t) = 0$  и выполняется выражение (19)) обусловлен задержкой процесса перераспределения экранирующего заряда  $Q_S(t)$  между электродами при протекании тока через нагрузку  $R$  из-за конечной величины  $RC(t)S$ .

Рассматриваемая схема генератора качественно отличается как от машины Теплера, так и от генератора напряжения другим принципом работы: его функционирование определяется изменением условий экранирования в металлических электродах поля диэлектрика

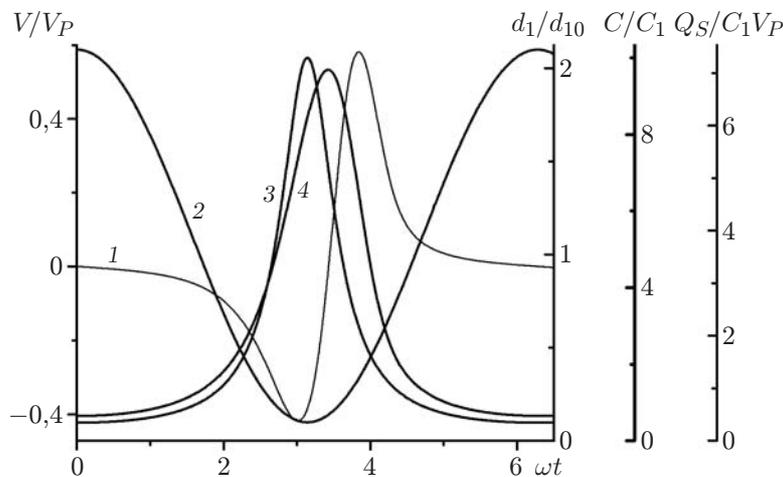


Рис. 6. Пример численного решения уравнения, описывающего работу генератора тока в установившемся режиме при синусоидальном изменении величины зазора  $d_1$ : кривая 1 —  $V/V_P$ , 2 —  $d_1/d_{10}$ , 3 —  $C/C_1$ , 4 —  $Q_S/C_1 V_P$ ;  $\alpha' = 0,1$ ;  $\omega RC_1 S = 6,25 \cdot 10^{-4}$

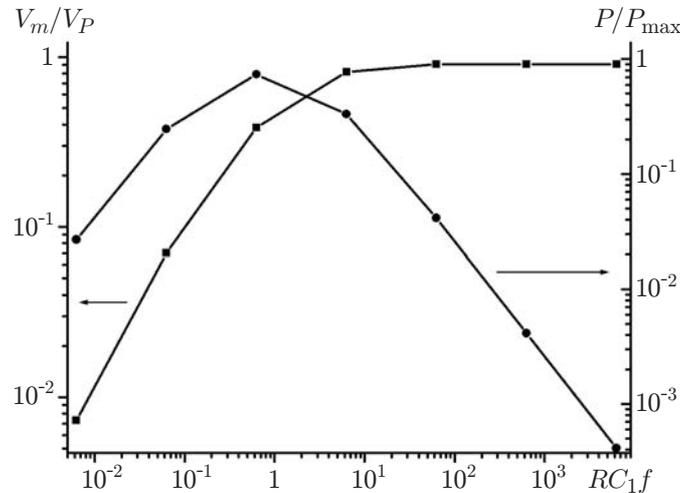


Рис. 7. Частотно-нагрузочные зависимости развиваемой мощности и выходного напряжения для токового генератора при  $\alpha' = 0,1$

в процессе изменения положения подвижного электрода. Ток перезарядки электродов в цепи нагрузки  $R$  стремится вернуть систему в равновесное состояние с  $V = 0$ .

При достаточно большой глубине модуляции ёмкости структуры амплитуда напряжения  $V_m$ , вырабатываемого генератором, стремится при оптимальной нагрузке к предельной величине  $\pm V_P$ , а мощность максимальна при частоте

$$f_1 = 1/RC_1 S, \quad (23)$$

как показано на рис. 7. Отметим, что с ростом параметра  $RC_1 S f$  до величины порядка 1 и более закон колебаний тока приближается к синусоидальному в сравнении с рис. 6, для которого  $RC_1 S f \ll 1$ .

В этих условиях мощность, развиваемая генератором, равна  $V_m^2/2R$ . При генерации максимальной мощности  $P_{\max}$  значение  $V_m$  близко к величине  $V_P$ , тогда

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \frac{V_P^2}{R_m} = f_1 \frac{C_1 S V_P^2}{2}, \quad (24)$$

где  $R_m = 1/(C_1 S f)$  — величина сопротивления нагрузки при генерации  $P_{\max}$ . Соответственно энергия, вырабатываемая за период преобразования, выражается как

$$W_{\max} = (C_1 S V_P^2)/2. \quad (24a)$$

Таким образом, при достаточно большой глубине модуляции ёмкости структуры амплитуды мощности и напряжения токового генератора практически не зависят непосредственно от величин  $C_{\max}$  и  $C_{\min}$ , а определяются только средней ёмкостью зазора  $C_1$ .

На рис. 8 показано поведение амплитуды напряжения на выходе генератора в зависимости от безразмерных параметров  $\alpha'$  и  $d/\varepsilon d_{10} = C_1/C_F$ . Как видно, при  $\alpha' < 0,2$  это напряжение стремится к  $V_P$  (что эквивалентно  $C_{\max}/C_{\min} \approx 1/\alpha' > 5$  в соответствии с (22)) и  $C_1/C_F < 0,1$ . При увеличении  $\alpha'$  (а также  $C_1/C_F$ ) и приближении её к 1 и более модуляция  $C(t)$  становится незначительной и эффективность токового генератора резко снижается, величина выходного напряжения уменьшается с соответствующим уменьшением мощности.

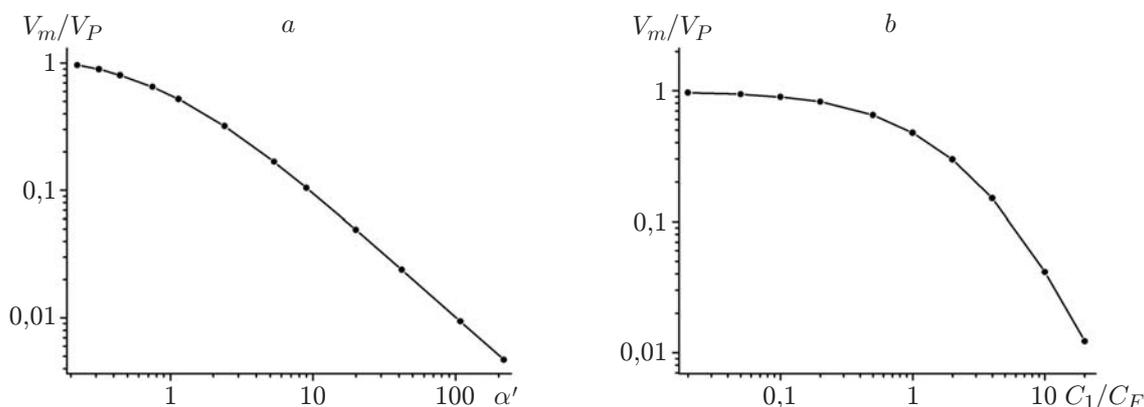


Рис. 8. Зависимость амплитуды выходного напряжения токового генератора от безразмерных параметров модели:  $a$  —  $\alpha'$ ,  $b$  —  $C_1/C_F$  ( $\alpha = 0,02$ );  $RC_1S\omega = 1,11 \cdot 10^{-2}$

**Особенности функционирования микрогенератора при вибрации подвижного электрода в субмикронном зазоре.** В современной микроэлектронике, в её наиболее интенсивно развивающемся направлении — МЭМС — на протяжении последних 5–7 лет разработана технология взаимного смещения поверхностей компонент микросхем в субмикронном диапазоне.

Например, в вибрационных МЭМС-гироскопах создаётся и фиксируется относительное смещение поверхностей (колебание) с нанометровой амплитудой. Такой же диапазон амплитуд колебаний микробалок имеет место в МЭМС-генераторах [19], стабилизаторах частоты [25–28], в высокочастотных МЭМС-фильтрах [29–32], в микрооптоэлектромеханических устройствах [33, 34] и т. д. Поэтому вопрос об использовании субмикронных колебаний подвижного электрода в рассматриваемой конструкции электростатического микрогенератора имеет реальную технологическую перспективу.

Кроме того, нами теоретически и экспериментально показана возможность осуществления электромеханического преобразования энергии в нанометровых зазорах [35–39], в результате чего были созданы электростатические микроактюаторы, обладающие высокой удельной энергоёмкостью до  $1 \text{ Дж/м}^2$  и более и способные развивать силы до  $10^4 \text{ Н/м}^2$ . Реально использовались нанозазоры в 10–20 нм. Ограничивающим фактором максимального снижения их величины является шероховатость поверхностей, атомарная или естественная. Амплитуда импульсов напряжения, при которых функционировали указанные микроактюаторы на частотах 100–10000 Гц, могла превышать 150 В без проявления признаков электрического пробоя нанозазора. С учётом этого можно полагать, что обратное преобразование энергии в нанометровых зазорах (генерация электрической энергии за счёт механических сил) технологически реально.

Проведённый анализ особенностей работы генератора на основе указанной многослойной тонкоплёночной структуры справедлив для любых амплитуд колебаний подвижных электродов. Однако в режимах колебаний подвижного электрода в субмикронных зазорах протяжённостью 1 мкм и менее имеет место ряд характерных особенностей функционирования микрогенератора:

1. Очевидное следствие использования колебаний подвижного электрода в субмикронном зазоре — высокое значение  $C_{\max}$  и, значит, более высокая мощность микрогенератора. Как показано выше, мощность генератора напряжения определяется глубиной модуляции ёмкости и величиной  $C_{\max}$ , т. е. в данном случае она существенно зависит от величины минимального зазора  $d_{1\min}$ .

2. Для токового генератора максимальное напряжение при оптимальной нагрузке

$V_P = Q_P/C_F$  не зависит от амплитуды колебаний и определяется только характеристиками диэлектрика (7а). Однако максимальная мощность токового генератора обратно пропорциональна средней величине зазора  $d_{10}$  (величине  $C_1$ ), т. е. амплитуде микроколебаний, но в явном виде не зависит от величины  $d_{1 \min}$  при условии достаточно большой глубины модуляции ёмкости структуры:  $C_{\max}/C_{\min} \approx 1/\alpha' > 5$ .

Таким образом, для обоих типов генераторов использование субмикронных колебаний подвижного электрода приводит при прочих равных параметрах указанной структуры к увеличению мощности генератора, которая для токового генератора растёт обратно пропорционально амплитуде колебаний — через уменьшение  $d_{10}$ , а для генератора напряжения косвенно — через уменьшение  $d_{1 \min}$ .

Оценим максимальную мощность, которую могут развивать описанные генераторы в режиме субмикронных колебаний подвижного электрода. Она определяется в первую очередь величиной  $V_P = Q_P/C_F$ .

Проведём такую оценку для двух классов диэлектриков: линейных диэлектриков с относительно небольшими значениями  $\varepsilon$  и поляризации и сегнетоэлектриков с высокими значениями этих параметров. В первом случае величина поляризации  $Q_P$  может достигать  $10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup> [40] при низком значении  $\varepsilon$  (3,9 для плёнок SiO<sub>2</sub>). Во втором случае для известных одноосных сегнетоэлектриков, например для плёнок LiNbO<sub>3</sub>, спонтанная поляризация достигает значительно более высоких значений ( $Q_P = 0,5$  Кл/м<sup>2</sup>) [24] при относительно низком значении  $\varepsilon = 40$ .

Как видно, значение  $V_P$  может быть для каждого из двух классов диэлектриков достаточно высоким (до нескольких киловольт при микронных толщинах LiNbO<sub>3</sub> и нескольких сотен вольт для плёнок SiO<sub>2</sub>) и можно сделать вывод, что в обоих случаях предельная мощность генератора будет ограничиваться напряжением пробоя воздушного зазора, к которому и прикладывается большая часть генерируемого напряжения. Однако, несмотря на то что падение напряжения на зазоре может быть значительным — до 100 В и более, электрический пробой субмикронного зазора не наступает. Это определяется не только тем, что в области малых воздушных зазоров закон Пашена не работает, но и тем, что в указанной структуре последовательно с зазором включено сопротивление диэлектрика, которое имеет значения до 10–100 МОм/мм<sup>2</sup> и выше. Электрическая прочность диэлектрика достаточно высока (свыше 100–300 В/мкм), и незначительное падение напряжения непосредственно на диэлектрике практически исключает его электрический пробой. Данный фактор является одним из важнейших при определении преимуществ электростатических микрогенераторов с колебаниями подвижного электрода в субмикронном зазоре.

Пример расчёта мощности микрогенератора с колебаниями подвижного электрода в зазоре протяжённостью менее 1 мкм для двух указанных классов материалов показан на рис. 9, где кривая 1 — плёнка SiO<sub>2</sub> (диэлектрик) с параметрами, указанными в работе [40], кривая 2 — плёнка LiNbO<sub>3</sub> толщиной 0,5 мкм (величина  $V_P$  для обоих образцов равна 231 В). Как видно, удельная мощность достигает значений порядка 10 мВт/см<sup>2</sup>. Для ниобата лития она несколько выше, чем для плёнки SiO<sub>2</sub>, из-за более высокой глубины модуляции ёмкости: 10 и 5,6 раза соответственно. Оценка предельной мощности микрогенераторов с учётом приведённых выше параметров плёнок LiNbO<sub>3</sub> для амплитуды колебаний 1 мкм с минимальным зазором 10 нм и частотой 100 Гц даёт значения до 25 мВт/см<sup>2</sup>.

Субмикронная амплитуда колебаний подвижного электрода снижает влияние краевых эффектов, даёт возможность использовать электроды с малой площадью (до  $10^{-8}$  м<sup>2</sup> и менее), а также определяет другие параметры элементов структуры генератора. В частности, исходя из условия эффективной работы генератора ( $C_1 \ll C_F$  или  $d_1 \gg d/\varepsilon$ ) толщина диэлектрика должна быть менее 1 мкм, что соответствует возможностям технологии современной микроэлектроники (как известно, толстые диэлектрические плёнки, в том

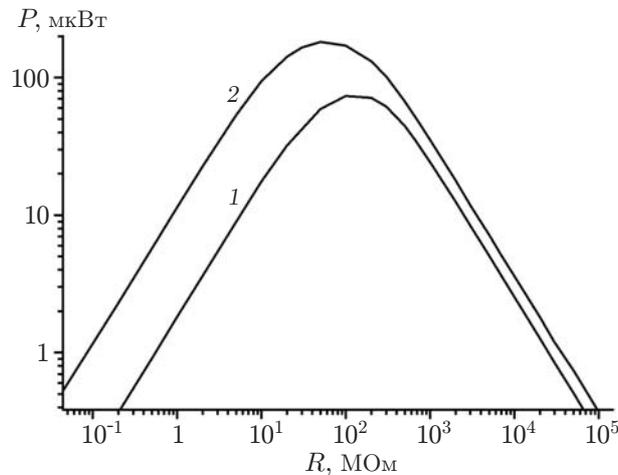


Рис. 9. Нагрузочные характеристики токового генератора площадью  $S = 1 \text{ мм}^2$  на основе плёнок  $\text{SiO}_2$  при  $\varepsilon = 3,9$ ,  $Q_P = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ Кл/м}^2$  (кривая 1) и  $\text{LiNbO}_3$  при  $\varepsilon = 40$ ,  $Q_P = 1,64 \cdot 10^{-1} \text{ Кл/м}^2$  (кривая 2). Параметры:  $d = 1 \text{ мкм}$ ,  $d_{1 \text{ min}} = 100 \text{ нм}$ ,  $d_{1 \text{ max}} = 0,5 \text{ мкм}$ ,  $f = 100 \text{ Гц}$ ,  $V_P = 231 \text{ В}$

числе плёнки электретов толщиной более 2 мкм, в микросхемах практически не используются). В то же время небольшая величина  $d$  снижает влияние радиационного облучения на величину встроенного заряда.

Отметим, что в классических электростатических генераторах увеличение удельной мощности достигается увеличением амплитуды напряжения генератора за счёт максимально возможного повышения межэлектродного расстояния.

Оценки мощности описанного генератора показывают, что при субмикронных амплитудах колебаний электрода она превосходит мощность классических электростатических генераторов, функционирующих с использованием больших зазоров, вплоть до амплитуд их колебаний величиной 20–30 см.

**Заключение.** Проведённый анализ общих закономерностей работы микрогенераторов электрической энергии, основанных на использовании многослойной структуры электрод—тонкий диэлектрик (сегнетоэлектрик) со встроенным зарядом—воздушный зазор с переменной во времени толщиной  $d_1(t)$ , изменяющейся под действием механических сил—подвижный электрод, совершающий колебательные движения относительно поверхности диэлектрика, показал, что такие микрогенераторы в режиме низкочастотных колебаний могут использоваться как источники энергонезависимого питания, способные развивать без применения источников напряжения мощность, достаточную для энергообеспечения современных микросхем: до 1–10 мВт/см<sup>2</sup> и более.

Установлено, что основным параметром, определяющим эффективность работы рассматриваемого генератора, является отношение величины заряда, сформированного в диэлектрическом слое, к его геометрической ёмкости:  $V_P = Q_P/C_F$ .

Показано, что возбуждение в конструкции указанных микрогенераторов колебаний подвижного электрода в субмикронных зазорах даёт возможность значительно увеличить мощность генератора, которая может превышать мощность классических высоковольтных генераторов напряжения с амплитудой колебаний электродов в десятки сантиметров. Основными факторами, обеспечивающими высокую энергоёмкость таких микрогенераторов, являются более высокие значения  $C_{\text{max}}$  и допустимой напряжённости электрического поля в зазоре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Roundy S., Wright P. K., Rabaey J.** A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes // *Comput. Commun.* 2003. **26**, N 11. P. 1131–1144.
2. **Stephen N. G.** On energy harvesting from ambient vibration // *Journ. Sound Vib.* 2006. **293**, N 1–2. P. 409–425.
3. **Miyazaki M., Tanaka H., Ono G. et al.** Electric-energy generation through variable-capacitive resonator for power-free LSI // *IEICE Trans. Electron.* 2004. **E87-C**. P. 549–555.
4. **Mitcheson P. D., Miao P., Stark B. H. et al.** MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation // *Sensors Actuators.* 2004. **A115**, N 2–3. P. 523–529.
5. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Анализ возможности создания микроэлектронного электростатического генератора энергии // *Автометрия.* 2002. № 1. С. 107–122.
6. **El-hami M., Glynne-Jones P., White N. M. et al.** Design and fabrication of a new vibration based electromechanical power generator // *Sensors Actuators A.* 2001. **92**. P. 335–342.
7. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Микроэлектронные высокоэнергоемкие генераторы энергии // *Микросистемная техника.* 2002. № 6. С. 24–28.
8. **Meninger S., Mur-Miranda J., Amirtharajah R. et al.** Vibration to electric energy conversion // *IEEE Trans. Very Large Scale Integration (VLSI) Syst.* 2001. **9**, N 1. P. 64–76.
9. **Roundy S., Wright P. K.** A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics // *Smart Mater. Struct.* 2004. **13**, N 5. P. 1131–1142.
10. **Du Toit N. E., Wardle B. L., Kim S.-G.** Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters // *Integrated Ferroelectrics.* 2005. **71**, N 1. P. 121–160.
11. **Chen C.-T., Islam R. A., Priya S.** Electric energy generator // *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control.* 2006. **53**, N 3. P. 656–661.
12. **Драгунов В. П., Косцов Э. Г.** МЭМ электростатический генератор энергии // *Нано- и микросистемная техника.* 2007. № 11. С. 47–53.
13. **Beeby S. P., Tudor M. J., White N. M.** Energy harvesting vibration sources for microsystems applications // *Meas. Sci. Technol.* 2006. **17**, N 12. P. R175–R195.
14. **Тэнэсеску Ф., Крамарюк Р.** Электростатика в технике. М.: Энергия, 1980. 296 с.
15. **Chiu Y., Kuo C.-T., Chu Y.-S.** Design and fabrication of a micro electrostatic vibration-to-electricity energy converter // *Symp. on Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP).* 26–28 April, 2006. Stresa, Italy. 6 p.
16. **Basset P., Galayko D., Paracha A. M. et al.** A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester // *Journ. Micromech. Microeng.* 2009. **19**, N 11. 115025.
17. **Pat. 6,750,590 B2 US.** Electrostatic based power source and method thereof /M. D. Potter. Publ. June 15, 2004.
18. **Naruse Y., Matsubara N., Mabuchi K. et al.** Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion // *Journ. Micromech. Microeng.* 2009. **19**, N 9. 094002.
19. **Gracowski S. M., Funkenbusch P. D., Jia Z. et al.** Design and modeling of a micro-energy harvester using an embedded charge layer // *Journ. Micromech. Microeng.* 2006. **16**, N 2. P. 235–241.
20. **Mizuno M., Chetwynd D. G.** Investigation of a resonance microgenerator // *Journ. Micromech. Microeng.* 2003. **13**, N 2. P. 209–216.
21. **Okamoto H., Suzuki T., Mori K. et al.** The advantages and potential of electret-based vibration-driven micro energy harvesters // *Intern. Journ. Energy Res.* 2009. **33**, N 13. P. 1180–1190.

22. **Губкин А. Н.** Электреты. М.: Наука, 1978. 192 с.
23. **Электреты** /Под ред. Г. Сесслера. М.: Мир, 1983. 487 с.
24. **Лайнс М., Глас А.** Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Мир, 1981. 734 с.
25. **Mendels D. A., Lowe M., Cuenat A. et al.** Dynamic properties of AFM cantilevers and the calibration of their spring constants // Journ. Micromech. Microeng. 2006. **16**, N 9. P. 1720–1733.
26. **Zhang W., Baskaran R., Turner K. L.** Tuning the dynamic behavior of parametric resonance in a micromechanical oscillator // Appl. Phys. Lett. 2003. **82**, N 1. P. 130–132.
27. **Gaspar J., Chu V., Conde J. P.** High quality factor amorphous silicon electrostatic microresonators // Appl. Phys. Lett. 2004. **84**, N 4. P. 622–624.
28. **Zhang W., Turner K.** Frequency dependent fluid damping of micro/nano flexural resonators: Experiment, model and analysis // Sensors Actuators. 2006. **A134**, N 2. P. 594–599.
29. **Jackson R., Ramadoss R.** A MEMS-based electrostatically tunable circular microstrip patch antenna // Journ. Micromech. Microeng. 2007. **17**, N 1. P. 1–8.
30. **Wong A., Nguyen C. T.-C.** Micromechanical mixer-filters ("Mixlers") // Journ. Microelectromech. Syst. 2004. **13**, N 1. P. 100–112.
31. **Pourkamali S., Abdolvand R., Ho G. K., Ayazi F.** Electrostatically coupled micromechanical beam filters // Proc. of the 17th Intern. Conf. MEMS'04. P. 584–587.
32. **Brouwer D. M., de Jong B. R., Soemers H. M. J. R., van Dijk J.** Sub-nanometer stable precision MEMS clamping mechanism maintaining clamp force unpowered for TEM application // Journ. Micromech. Microeng. 2006. **16**, N 6. P. S7–S12.
33. **Verheggen J., Panaman G., Khan Raja W., Castracane J.** Optimization of diffractive MEMS for optical switching // Proc. of the Intern. Conf. MEMS, NEMS & Sensing. Boston, USA. 2006. Vol. 3. P. 401–404.
34. **Verheggen J., Khan Raja W., Castracane J.** Optimization of diffractive MEMS for optical switching // Journ. Experim. Nanosci. 2007. **2**, N 1–2. P. 87–100.
35. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High-energy capacitive electrostatic micromotors // Journ. Micromech. Microeng. 2003. **13**, N 2. P. 190–200.
36. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Electrostatic micromotor based on ferroelectric ceramics // Journ. Micromech. Microeng. 2004. **14**, N 11. P. 1569–1575.
37. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High energy output MEMS based on thin layers of ferroelectric materials // Ferroelectrics. 2007. **351**. P. 66–78.
38. **Kostsov E. G.** Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2006. **53**, N 12. P. 2294–2299.
39. **Kostsov E. G.** Electromechanical energy conversion in the nanometer gaps // Proc. SPIE. 2008. **7025**. 70251G.
40. **Mescheder U., Müller B., Baborie S., Urbanovich P.** Properties of SiO<sub>2</sub> electret films charged by ion implantation for MEMS-based energy harvesting systems // Journ. Micromech. Microeng. 2009. **19**, N 9. 094003.

*Поступила в редакцию 6 июля 2010 г.*