

УДК 621.3.049.77

ГИГАГЕРЦОВЫЙ MEMS-ГЕНЕРАТОР ТАКТОВОЙ ЧАСТОТЫ

© Э. Г. Косцов, А. А. Соколов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kostsov@iae.nsk.su*

В современной микроэлектронике интенсивно развивающимся сектором являются микро-электромеханические системы (MEMS — MicroElectroMechanical Systems). Рассматриваются вопросы создания нового MEMS-генератора тактовой частоты, способного функционировать на гигагерцовых частотах. Проведён анализ основных закономерностей возникновения и поддержания вынужденных колебаний подвижного электрода под действием сил электростатики. Показана возможность поддержания таких колебаний в условиях высоких инерциальных перегрузок (до 10^6 g и более). Создана математическая модель микроосциллятора, описаны основные режимы его функционирования.

Ключевые слова: генератор частоты, автоколебания, устойчивый предельный цикл, математическая модель.

DOI: 10.15372/AUT20190207

Введение. Современные технологии передачи информации требуют значительного увеличения пропускной способности электронных устройств, расширения диапазона рабочих частот, перехода их в гигагерцовый диапазон (5–100 ГГц и более), в котором кварцевые генераторы и полупроводниковые элементы неэффективны. В последние годы широкое распространение получили принципиально новые генераторы тактовой частоты — MEMS-генераторы, основанные на разных физических принципах [1–4]. В [2] описан пьезоэлектрический MEMS-генератор, в [3, 4] рассматриваются высокочастотный ёмкостный генератор и стабильность его функционирования. MEMS-генераторы частоты обеспечивают более высокий уровень интеграции при низких затратах за счёт использования технологии микроэлектроники, совместимости с КМОП-элементами.

Среди возможных физических принципов функционирования тактовых MEMS-генераторов электростатические являются наиболее технологичными, они допускают широкую вариацию параметров. В большинстве MEMS основной компонентой служит подвижный элемент (ПЭ) — механический резонатор, микробалка, микродиск, совершающие колебания в межэлектродном зазоре под действием сил электрического поля. Общее для таких устройств — способность совершать автоколебания ПЭ, амплитуда которых остаётся постоянной и при этом не зависит от начальных условий, а определяется свойствами самой системы.

Параметры MEMS-генераторов по совокупности факторов, включая стабильность частоты, время наработки на отказ, виброустойчивость, устойчивость к механическим ударам до 50000 g (как следствие малой массы (M) подвижного элемента, менее 10^{-13} кг), значительно превосходят параметры кварцевых генераторов. MEMS-генераторы могут функционировать на более высоких частотах (100–800 МГц).

Ключевым моментом изготовления MEMS-генератора частоты является создание субмикронного межэлектродного зазора, в котором осуществляется колебание резонатора. В состав генератора входит быстродействующий трансимпедансный усилитель с низкоомным входом для формирования обратной связи и практического исключения влияния паразитных ёмкостей [5, 6]. На выходе усилителя формируется корректирующий импульс

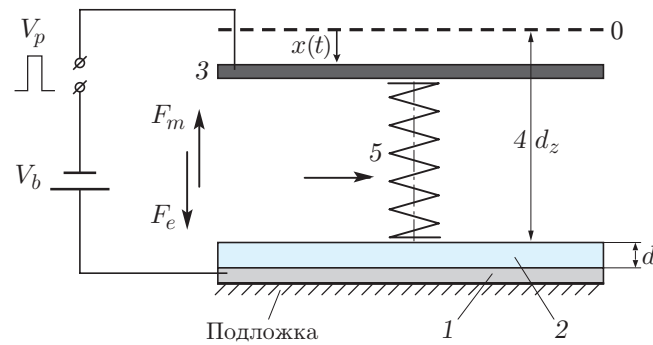


Рис. 1. Схематическое изображение резонатора рассматриваемого генератора: 0 — положение платформы в начальный момент времени, 1 — неподвижный электрод, 2 — диэлектрический слой толщиной d , 3 — подвижный электрод, 4 — воздушный зазор d_z , 5 — упругие элементы, V_b — напряжение смещения, V_p — напряжение импульсов коррекции, F_m — сила упругости, F_e — сила электростатического притяжения

напряжения V_k , который поступает на резонатор и компенсирует потери энергии на каждом такте колебаний.

Важным фактором поддержания стабильной амплитуды колебаний резонатора в указанных генераторах является его размещение в камере с низким давлением. В частности, при частоте колебаний резонатора 32 кГц давление в камере должно быть ниже 0,01 мбар, с увеличением частоты до 55 МГц давление может составлять 10 мбар, при более высоком давлении добротность Q значительно снижается. Разработана специальная технология одновременной герметизации камеры резонатора и схемы его управления [6]. Частота резонатора равна 23,4 МГц при межэлектродном зазоре 270 нм.

Из общезначимых оценок следует, что путь к созданию MEMS-генераторов гигагерцового диапазона лежит в развитии нанотехнологии, изготовлении устройств нанометрового размера, наноэлектромеханических преобразователей энергии (NEMS-структур). Это направление называется наноэлектромеханикой и входит в число наиболее приоритетных задач микроэлектроники на ближайшие 5 лет.

Общий анализ особенностей функционирования указанных генераторов показывает, что с увеличением частоты амплитуда колебаний ПЭ должна уменьшаться, иначе возникают большие ускорения, которые ограничены как механической прочностью упругих элементов, так и необходимостью рассеивания большой мощности. Необходимо, чтобы эти колебания происходили в зазорах с меньшей протяжённостью. Для увеличения частоты колебаний ПЭ требуется повышать удельную возбуждающую силу, напряжённость поля в зазоре (E), поскольку нужно передавать ПЭ достаточную энергию. В то же время величина ограничивается возможностью пробоя в субмикронных межэлектродных зазорах.

Целью предлагаемой работы является рассмотрение нового принципа функционирования ёмкостного MEMS-генератора частоты, действующего на высоких тактовых частотах (1–10 ГГц и более) в условиях сверхвысоких инерциальных перегрузок (10^5 – 10^6 g). Отличительная особенность структуры генератора — использование нанометрового рабочего зазора с введением в межэлектродное пространство тонкой кристаллической плёнки диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости (более 1000) и с высокой электрической прочностью (рис. 1).

Введение в межэлектродный зазор такого диэлектрика даёт возможность значительно увеличить амплитуду прикладываемого к структуре напряжения, механическую силу, действующую на ПЭ без пробоя, поскольку основная часть напряжения прикладывается к воздушному зазору — фактически к ПЭ [7–10].

В [10] был проведён анализ особенностей функционирования нанорезонатора, имеющего указанную структуру в режиме собственных колебаний ПЭ после запуска их импульсом напряжения V с длительностью t_{imp} . Установлено, что резонатор может функционировать на гигагерцовых частотах при геометрических размерах, лежащих в микрометровом диапазоне, с соответствующими большими ёмкостью структуры и величиной сигнала.

Рассмотрим возможность использования этого резонатора при создании генератора частоты, функционирующего на гигагерцовых частотах.

Математическая модель MEMS-генератора частоты. Будем полагать, что колебания ПЭ рассматриваются как колебания материальной точки массой M под воздействием повторяющихся электростатических импульсов и упругой силы пружины в среде с сопротивлением.

Как известно, закон колебательного движения твёрдого тела $x(t)$ (в данном случае ПЭ с учётом потерь энергии) описывается решением дифференциального уравнения второго порядка [11, 12], где рассматриваются механические колебания под действием силы с потерями энергии. Данная задача может быть записана в виде

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + 2B \frac{dx}{dt} + Gx = F(x). \quad (1)$$

Здесь $F(x)$ — электростатическая сила; G — коэффициент жёсткости пружины; B — коэффициент потерь энергии (сопротивление газовой среды, потери в упругих элементах, трение и т. п.). С учётом малости воздушного зазора в сравнении с шириной и длиной поверхностей электродов и диэлектрика $F(x) = 0,5V^2 dC(x)/dx$. Суммарная ёмкость $C(x)$ структуры определяется как последовательное соединение ёмкостей сегнетоэлектрика и воздушного зазора. В этом случае $F(x)$ имеет следующий вид:

$$F(x) = \frac{d(CV^2/2)}{dx} = \frac{\varepsilon_0 V^2 S}{2(d_z + d/\varepsilon - x)^2}. \quad (2)$$

Направление x отсчитывается от положения подвижного электрода над поверхностью диэлектрика в начальный момент времени. Начальные условия: $t = 0$, $x(0) = 0$, $d(x(0))/dt = 0$, $V(t)$ — разность потенциалов между электродами, S — площадь ПЭ, $\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Отличительной особенностью функционирования указанной структуры в режиме генератора частоты является необходимость поддержания незатухающих периодических колебаний ПЭ в среде, в которой имеют место потери энергии. Первоначальный запуск собственных колебаний ПЭ осуществляется импульсом напряжения с амплитудой V_0 . Подкачка энергии реализуется в виде последовательности корректирующих импульсов напряжения (V_k), имеющих заданную длительность и амплитуду, воздействующих на подвижный электрод в определённой фазе колебаний. Такие импульсы поступают с выхода трансимпедансного усилителя, что даёт возможность формировать в системе устойчивые периодические автоколебания независимо от условий запуска колебаний ПЭ и амплитуды V_0 .

Уравнение (1) с учётом (2) не имеет точного аналитического решения. Поэтому проведено численное решение, которое позволяет исследовать закон движения ПЭ и особенности функционирования генератора.

Численный анализ. При проведении численного анализа особенностей функционирования микрогенератора были созданы программы моделирования процесса движения ПЭ для различных параметров его многослойной конструкции и режимов работы. Расчёт производился методом Рунге — Кутты с выбором шага, обеспечивающего устойчивость решения и достаточную точность.

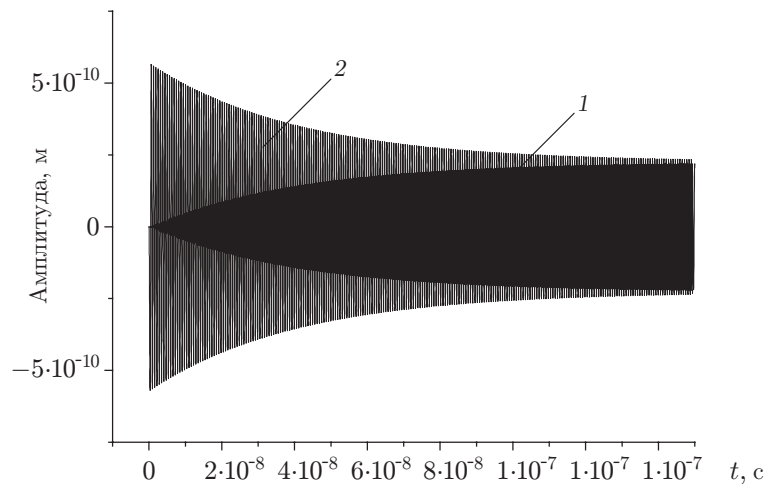


Рис. 2. Автоколебание ПЭ для двух режимов запуска: 1 — напряжение запуска 0,2 В, 2 — напряжение запуска 12,2 В, в обоих случаях имеет место схождение к амплитуде колебаний ПЭ за время 200 нс

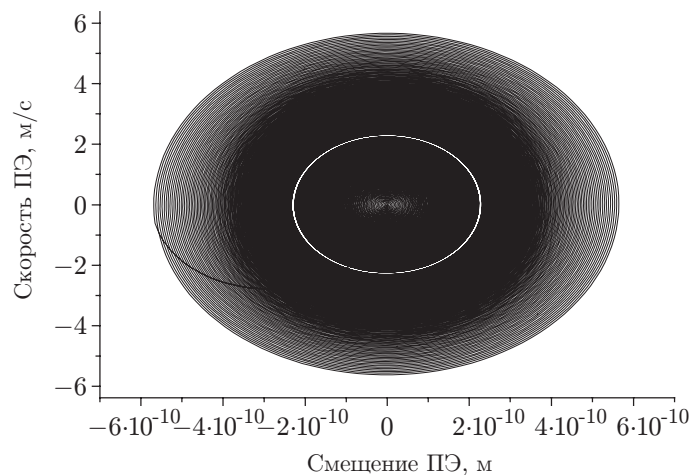


Рис. 3. Перемещение ПЭ в фазовой плоскости на временном отрезке 0,06 нс (см. рис. 2). Белым выделен предельный цикл, общий для каждого из указанных режимов запуска

Функционирование резонатора определяется следующей совокупностью параметров: S , $d_{\text{пэ}}$, M , d_z , V_k , t_k , t_c , G , B , d , ε . Выберем определённую совокупность параметров: $S = 10^{-12} \text{ м}^2$, $d_{\text{пэ}} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $M = 2 \cdot 10^{-16} \text{ кг}$ (материал титан), $t_c = 3 \cdot 10^{-10} \text{ с}$, $V_k = 1,5 \text{ В}$, $t_k = 10^{-10} \text{ с}$, $B = 10^{-8} \text{ Нс/м}$, $G = 2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$, $\varepsilon/d = 2 \cdot 10^9$. Тогда при $d_z = 10^{-8} \text{ м}$ частота колебаний ПЭ равна 1,59 ГГц.

Рис. 2—4 характеризуют выход колебаний ПЭ в режим устойчивых при вышеуказанной совокупности параметров, устойчивые колебания устанавливаются не мгновенно, как это и следует из общей теории колебаний [11].

Можно отметить, что при гигагерцовых частотах ограничиваются геометрические размеры конструкции на величину S , что связано со скоростью звука в материалах конструкции генератора.

Подкачка энергии начинается в момент положения ПЭ в точке $x = 0$ при движении с положительной скоростью. Можно отметить, что выбор этого момента в пределах четверти периода не является критическим, что существенно упрощает управление генератором.

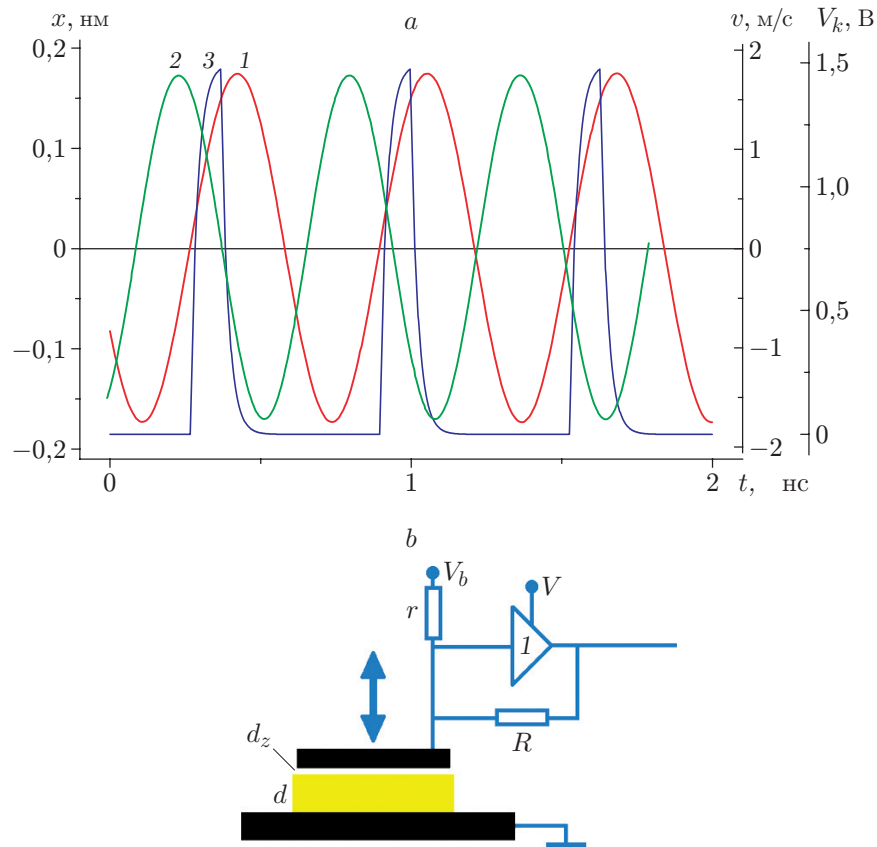


Рис. 4. Устойчивые колебания: *a* — движение ПЭ в режиме устойчивых колебаний (кривая 1 описывает положение ПЭ, кривая 2 — скорость ПЭ, кривая 3 — импульс подкачки энергии через сопротивление в цепи положительной обратной связи $R = 3 \cdot 10^4$ Ом, максимальный ток при подкачке энергии $5 \cdot 10^{-5}$ А, амплитуда модуляции ёмкости элемента $3 \cdot 10^{-17}$ Ф); *b* — схема, обеспечивающая автоколебания ПЭ (1 — трансимпедансный усилитель, R — сопротивление в цепи положительной обратной связи, r — нагрузка в цепи регулирования величины зазора, V_b — напряжение смещения)

Таким образом, на рис. 2—4 видно, что при указанных параметрах генератора колебания ПЭ стремятся к устойчивому предельному циклу, обеспечивая основное свойство колебаний, характерных для генератора частоты, — устойчивость по отношению к внешним возмущениям.

Высокая плотность энергии в нанозазоре генератора и большие силы, действующие на ПЭ, позволяют практически исключить влияние на его работу инерциальных перегрузок до 10^5 – 10^6 g [7–10, 13]. Из (2) следует, что при вышеуказанных параметрах генератора электростатическая сила, действующая на ПЭ при $V = 1,5$ В, достигает значений $1,3 \cdot 10^{-7}$ Н для площади ПЭ 10^{-12} м², а перегрузка 10^6 g при массе ПЭ $2 \cdot 10^{-16}$ кг может создать силу $2 \cdot 10^{-9}$ Н. Тогда силы электростатики значительно больше сил, развиваемых при перегрузке 10^6 g. Составляя несколько процентов от сил электростатики, они не могут оказывать значительного влияния на движение ПЭ и на работу генератора. Кроме того, незначительные изменения этих сил компенсируются трансимпедансным усилителем. При увеличении амплитуды корректирующих импульсов чувствительность параметров генератора к перегрузке уменьшается.

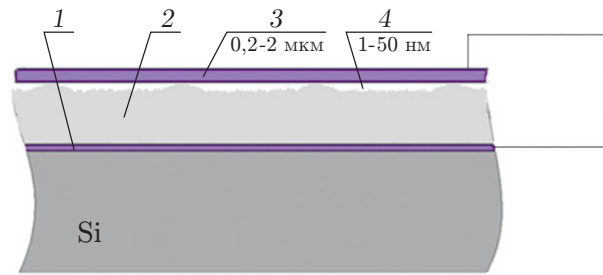


Рис. 5. Структура НБС: 1 — неподвижный электрод, 2 — диэлектрик с высоким значением ε (более 1000), 3 — подвижный электрод, 4 — воздушный нанозазор между поверхностями диэлектрика и ПЭ

Предварительные оценки показали возможность достижения более высокой частоты колебаний ПЭ. В указанной структуре для $V = 2,5$ В можно получить устойчивый предельный цикл для частоты 5,5 ГГц при уменьшении массы ПЭ до $5 \cdot 10^{-17}$ кг и площади ПЭ до $2,5 \cdot 10^{-13}$ м².

Экспериментальные исследования. Важнейшим фактором для практического изготовления рассматриваемого генератора частоты является формирование нанометрового межэлектродного зазора. Создание такого зазора — сложная технологическая задача.

Для создания нанометровых зазоров используются следующие технологии: электронно-лучевая литография, рентгеновская литография, фотолитография в глубоком ультрафиолете, синхротронное излучение, зондовая литография с применением сканирующего туннельного микроскопа [14–21]. Однако площади нанометровых объектов незначительны, технологии не предусматривают вариации протяжённости нанозазоров, и трудно ожидать появления практически изготавливаемых MEMS-генераторов с частотами более 10^9 Гц — ограничения накладываются возможностями нанотехнологий. Пока исследования высокочастотных нанокосильаний находятся в начальной стадии, но уже преодолён частотный барьер в 1 ГГц. В [11] в качестве ПЭ использовалась микробалка на основе карбида кремния (SiC) размерами 1,1 x 0,12 x 0,075 мкм.

В [7–10] была разработана технология создания нанометровых зазоров на достаточно большой площади образцов (экспериментально до 10^{-3} м² и более). Её суть заключается в электростатическом прижатии свободной плёнки металла с большим модулем Юнга (бронза, хром, никель) к поверхности сегнетоэлектрика, в частности ниобата бария стронция (НБС). Плёнки НБС обладают совершенной текстурой с ориентацией кристаллической оси C нормально к плоскости подложки. Введение в межэлектродный зазор материала с большим значением диэлектрической проницаемости даст возможность увеличить амплитуду напряжения без возникновения пробоя, несмотря на то что основная часть напряжения прикладывается к воздушному зазору.

Пример рассматриваемой структуры приведён на рис. 5. Экспериментально установлено, что использование сегнетоэлектрической плёнки с большим значением диэлектрической проницаемости даёт возможность создания в воздушном нанозазоре, разделяющем две поверхности, аномально высокой удельной плотности энергии электрического поля до 10^8 Дж/м³, давления до 10^6 Н/м² [7, 8] и сил сцепления двух поверхностей, определяемых энергоёмкостью структуры $3 - 5 \cdot 10^5$ Н/Дж. В [13] такая структура описана как «электронный клей».

Пример формирования нанометрового зазора среднего по площади подвижного электрода с увеличением V представлен на рис. 6. Величина $d_z = 12$ нм определялась из измерений суммарной ёмкости структуры как последовательное соединение ёмкостей сегнетоэлектрика и воздушного зазора: $d_z = \varepsilon_0 S / C - d / \varepsilon$. Для конкретного образца мини-

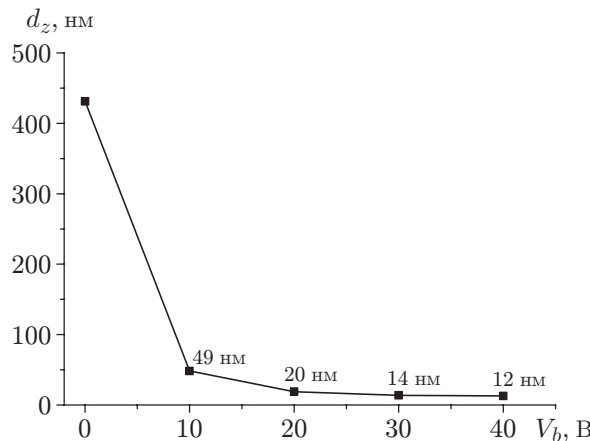


Рис. 6. Формирование управляемого полем нанозазора при $d = 0,31$ мкм, $\varepsilon/d = 2 \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$, подложка из кремния, толщина ПЭ $0,8$ мкм, неподвижный электрод ИТО толщиной $0,5$ мкм. Напряжение смещения V_b составляет 40 В

мальное значение d_z зависит от величины V_b , которая ограничивается шероховатостью поверхностей сегнетоэлектрика и подвижного электрода [7].

Высота микровыступов измерялась с помощью нескольких стандартных методик, в том числе с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа. Установлено, что на площади 10^{-12} м^2 перепад высот микровыступов находится в пределах $5\text{--}150$ нм, а их количество составляет $100\text{--}200$.

При электростатическом прижатии тонкой металлической плёнки к поверхности сегнетоэлектрика значительная часть накапливаемой в структуре энергии (по оценкам до $10^{-3}\text{--}10^{-2} \text{ Дж/м}^2$ или $1\text{--}5\%$ от энергии электростатического поля) расходуется на упругую механическую деформацию плёнки металла, которая «натягивается», как мембрана, на микровыступы поверхности сегнетоэлектрика. Упругость элемента распределена достаточно равномерно по всей поверхности металлической плёнки и может находиться в диапазоне $10^3\text{--}10^5 \text{ Н/м}$ в зависимости от плотности размещения микровыступов, толщины ПЭ и величины V_b . После снятия импульса напряжения механическая энергия, освобождаясь, определяет высокую скорость отрыва металлической плёнки (её масса составляет $10^{-13}\text{--}10^{-17} \text{ кг}$) от поверхности сегнетоэлектрика за время менее $10\text{--}100$ нс [7]. Этому способствует незначительный объёмный заряд в сегнетоэлектрике и высокая твёрдость поверхности (5,5 по шкале Мосса).

Было проведено экспериментальное исследование особенностей нанометровых колебаний в указанных структурах с применением прецизионной оптико-электронной системы бесконтактного измерения на основе лазерного интерферометра [22]. В качестве подвижного электрода использовалась плёнка бериллиевой бронзы толщиной $0,5$ мкм, величина V составляла 25 В, $d = 1$ мкм, $d_z = 35$ нм. Методика дала возможность регистрировать нанометровые периодические колебания ПЭ до $0,5$ нм на частоте до 2 кГц. Установлено, что амплитуда колебаний ПЭ в диапазоне до 10 нм практически линейно зависит от величины напряжения, как это и следует из вышеописанной модели структуры. Гистерезис зависимости амплитуды от напряжения не наблюдается, по крайней мере при амплитуде колебаний менее $0,5$ нм, несмотря на достаточно большую амплитуду возбуждающего напряжения (до $1,6$ В).

Можно отметить, что для линейных диэлектриков ($\varepsilon/d \ll 10^7$) падение напряжения на нанометровом зазоре незначительно и работоспособность структуры как генератора частоты невозможна, поскольку необходимы большие напряжения, не используемые в современных микросхемах.

Обсуждение. Отличительной особенностью электростатических MEMS-резонаторов является возможность получения исключительно высокой добротности Q (10^4 – 10^5). Высокая добротность генератора определяет эффективность исключения шумов, включая фазовые шумы (джиттер), использование узкополосной фильтрации.

Высокая (гигагерцовая) частота колебаний ПЭ и их низкая амплитуда (менее 1 нм) определяют исключительно низкий энергообмен за время такта (менее 1 нс) между поверхностью ПЭ и воздушной средой. Как показано в [1, 5], с ростом частоты колебаний поверхности ПЭ величина добротности резонаторов, находящихся в газовой среде, увеличивается практически линейно.

Применительно к предлагаемой конструкции генератора можно утверждать, что его работоспособность будет сохраняться и при атмосферном давлении, специальная герметизация не потребуется, что значительно увеличивает технологичность его изготовления и снижает стоимость.

Заключение. Проведенный анализ особенностей функционирования предлагаемого MEMS-генератора тактовой частоты показывает, что использование нанометровых межэлектродных зазоров позволяет генератору функционировать в гигагерцовом диапазоне.

Показано, что введение в межэлектродный зазор диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости и высокой электрической прочностью определяет возможность создания управляемых полем нанометровых зазоров. Изготовление таких нанозазоров с помощью технологии современной микроэлектроники открывает путь к построению нового класса электронных приборов, генераторов частоты, коммутаторов, СВЧ-фильтров, гироскопов, акселерометров и т. д., функционирующих на гигагерцовых частотах (5–10 ГГц и более), не доступных полупроводниковым приборам.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам Института математики СО РАН д-ру физ.-мат. наук С. И. Фадееву и канд. физ.-мат. наук В. К. Королеву за полезные обсуждения и написание программ для моделирования.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг. (проект № 273).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Van Beek J. T. M., Puers R.** A review of MEMS oscillators for frequency reference and timing applications // Journ. Micromech. Microeng. 2012. **22**, N 1. 013001.
2. **Zuo Ch., van der Spiegel J., Piazza G.** 1.05 GHz MEMS oscillator based on lateral-field-excited piezoelectric AlN resonators // Proc. of the Joint Meeting of the Eur. Frequency and Time Forum and the IEEE Intern. Frequency Control Symposium (EFTF-IFCS 2009). Besancon, France, 20–24 April, 2009. P. 381–384.
3. **Weinstein D., Bhave S. A.** Internal dielectric transduction of a 4.5 GHz silicon bar resonator // IEEE Intern. Electron Devices Meeting. Washington, USA, 10–12 Dec., 2007. P. 415–418.
4. **Feng X. L., White C. J., Hajimiri A., Roukes M. L.** A self-sustaining ultrahigh-frequency nanoelectromechanical oscillator // Nature Nanotechnology. 2008. **3**, N 6. P. 342–346.
5. **Kim B., Jha Ch. M., White T. et al.** Temperature dependence of quality factor in MEMS resonators // Journ. Microelectromech. Syst. 2008. **17**. P. 755–766. DOI: 10.1109/JMEMS.2008.924253.
6. **Lopez J. L., Verd J., Teva J. et al.** N Integration of RF-MEMS resonators on submicrometric commercial CMOS technologies // Journ. Micromech. Microeng. 2009. **19**. 015002.
7. **Kostsov E. G.** Electromechanical energy conversion in the nanometer gaps // Proc. SPIE. 2008. **7025**. 70251G.

8. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** High energy output MEMS based on thin layers of ferroelectric materials // *Ferroelectrics*. 2007. **351**, N 1. P. 69–78.
9. **Kostsov E. G., Sokolov A. A.** Fast-response electrostatic actuator based on nano-gap // *Micromachines*. 2017. **8**, N 78. P. 2–7.
10. **Косцов Э. Г., Фадеев С. И.** Новые электромеханические резонаторы для гигагерцовых частот // *Автометрия*. 2013. **49**, № 2. С. 115–122.
11. **Андронов А. А., Витте А. А., Хайкин С. Э.** Теория колебаний. М.: ГИФМЛ, 1959. 916 с.
12. **Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д.** Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1965. С. 242–284.
13. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Reversible high speed electrostatic “Contact” // *Semiconductors*. 2010. **44**, N 13. P. 1654–1657.
14. **Jia M., Li X., Song Zh. et al.** Micro-cantilever shocking-acceleration switches with threshold adjusting and on-state latching functions // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**, N 3. P. 567–575.
15. **Takamatsu H., Sugiura T.** Nonlinear vibration of electrostatic MEMS under DC and AC applied voltage // *Proc. of the Intern. Conf. on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS 2005)*. Banff, Canada, 24–27 July, 2005. P. 423–424.
16. **Гринберг Я. С., Пашкин Ю. А., Ильичёв Е. В.** Наномеханические резонаторы // *УФН*. 2012. **182**, № 4. С. 407–436.
17. **Huang X. M. H., Zorman Ch. A., Mehregany M., Roukes M. L.** Nanoelectromechanical systems: Nanodevice motion at microwave frequencies // *Nature*. 2003. **421**, N 6922. P. 496–497.
18. **Ekincia K. L., Roukes M. L.** Nanoelectromechanical systems // *Rev. Sci. Instrum.* 2005. **76**. 061101.
19. **Lyshevski S. E.** Nano- and Microelectromechanical Systems. Boca Raton — London — New York: CRC Press, 2001. 344 p.
20. **Jang Y., Kang S., Kim H. Ch., Chun K.** An RF MEMS switch with a differential gap between electrodes for high isolation and low voltage operation // *Micromech. Microeng.* 2011. **21**, N 7. P. 1–9.
21. **No S. Y., Ayazi F.** The HARPSS process for fabrication of nano-precision silicon electromechanical resonators // *Proc. of the 1st IEEE Conf. on Nanotechnology*. Maui, USA, 30–31 Oct., 2001. P. 489–494.
22. **Косцов Э. Г., Скурлатов А. И., Щербаченко А. М.** Прецизионная оптико-электронная система определения перемещений подвижных элементов MEMS // *Автометрия*. 2018. **54**, № 4. С. 92–100.

Поступила в редакцию 12.09.2018

После доработки 26.02.2019

Принята к публикации 01.03.2019