

УДК 621.37, 621.382

НОВЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ ГИГАГЕРЦОВЫХ ЧАСТОТ

Э. Г. Косцов¹, С. И. Фадеев²

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 4

E-mail: kostsov@iae.nsk.su

Рассматривается возможность создания микроэлектромеханических резонаторов микрометровых размеров с гигагерцовыми частотами. В конструкцию резонатора введена тонкая плёнка диэлектрика (сегнетоэлектрика) с высокими диэлектрической проницаемостью и электрической прочностью. Проведено описание особенностей функционирования устройства и его конструкции с использованием математической модели, позволившей найти точные соотношения между параметрами, характеризующими собственные колебания подвижного элемента, а также напряжение запуска.

Ключевые слова: СВЧ МЭМС, микрорезонатор, генератор частоты, ВЧ-фильтр, собственные колебания.

Введение. МЭМС-направление за последние годы выросло в быстро развивающуюся и большую отрасль электронной промышленности. Современное состояние МЭМС позволяет утверждать, что создана промышленная технология принципиально новых микроэлектронных устройств с широким спектром практического применения. При этом можно говорить не только о значительном улучшении параметров различных уже действующих систем, но и о создании на основе МЭМС принципиально новых устройств. В частности, при разработке современных технологий беспроводной передачи информации с переходом в гигагерцовый диапазон частот (3–100 ГГц и более), в котором полупроводниковые коммутаторы уже неэффективны из-за больших потерь и нелинейности сигналов, эффективнее использовать СВЧ МЭМС-устройства: микрокоммутаторы, динамически перестраиваемые фильтры и т. п. [1].

Создание микроэлектромеханических СВЧ-фильтров для выделения заданного диапазона частот в диапазоне 1–10 ГГц и более является основной задачей при построении СВЧ-схем на одной микросхеме, что уменьшает размер устройства, его стоимость и потребление энергии.

Как правило, СВЧ МЭМС содержат микро- или наномеханический резонатор, механические колебания которого возбуждаются и поддерживаются с помощью электромеханического преобразователя энергии, устройства регистрации и контроля параметров колебаний (амплитуды, частоты и т. п.).

Базовые элементы СВЧ МЭМС: микромембраны, микроконсоли, микробалки — являются механическими микрорезонаторами, их работа описывается с высокой точностью классическими уравнениями как системой с одной степенью свободы. Они имеют микро- и нанометровые размеры, что определяет возможности их механических колебаний на высоких резонансных частотах (до 1 ГГц) и достижения добротности микровибраторов до 10^5 и более, что существенно выше добротности электромагнитных контуров.

В последние годы сформировалось новое научное направление, связанное с разработкой наноразмерных резонаторов (НР) [2–8] с массой вибратора до 10^{-18} – 10^{-23} кг как высокочувствительных датчиков, позволяющих регистрировать предельно малые изме-

нения массы резонатора (вплоть до нескольких атомов) с чувствительностью до 10^{-21} – 10^{-22} кг/Гц^{0,5} и измерять минимальное механическое перемещение заданной массы до $2 \cdot 10^{-15}$ м/Гц^{0,5}.

На основе НР с геометрическими размерами $1,1 \times 0,12 \times 0,075$ мкм экспериментально достигнута частота колебаний 1 ГГц [2]. При описании функционирования НР должны учитываться проявления квантово-размерных эффектов.

Из фундаментальных соотношений, связывающих частоты резонансных (собственных) колебаний, массу вибратора и жёсткость упругих элементов, следует необходимость при перемещении в область более высоких частот колебаний использовать более меньшие массу вибратора, его размеры и площадь поверхности. Таким образом, при современной технологической базе и конструкции резонаторов в виде микро- или нанобалок и микроконсолей путь к получению СВЧ МЭМС-приборов с частотой гигагерцового диапазона связан с развитием нанотехнологии, созданием устройств нанометровых размеров, МЭМС-структур.

Характерной особенностью функционирования подобных устройств на гигагерцовых частотах является то, что амплитуда колебаний резонатора должна быть невелика (в пределах 1–0,1 нм — она ограничена механической прочностью материалов), поскольку имеют место большие ускорения поверхности вибратора и соответственно большие силы и рассеиваемая мощность. Малая амплитуда колебаний — следствие их осуществления в нанометровых зазорах. Кроме того, при меньшем зазоре ёмкостный сигнал считывания больше.

Очевидно, что чем выше частота колебаний, тем больше должна быть возбуждающая их сила при той же амплитуде колебаний, поскольку трудно за короткое время передать резонатору необходимый импульс силы.

Известно, что возможны два пути увеличения собственной частоты вибратора: уменьшение колеблющейся массы и увеличение жёсткости упругих элементов. В первом случае для достижения гигагерцовых частот требуется создавать наномасштабные структуры. Во втором — величина упругости может быть не связана непосредственно с геометрическими размерами колеблющегося элемента (пластины), с его массой. Это позволяет увеличивать частоту колебаний вибратора при постоянной массе.

В данной работе рассматривается возможность построения СВЧ МЭМС-устройств с использованием упругих элементов с высокой жёсткостью G и соответствующим увеличением массы и размеров виброэлемента. Успешное решение такой задачи сделает производство микрорезонаторов более технологичным, оставляя их размеры в микронном диапазоне.

Электромеханические преобразователи энергии на основе нанометровых зазоров. Увеличение жёсткости приводит к необходимости использования более высоких значений напряжённости возбуждающего колебания электрического поля, а значит, более высокой плотности энергии в нанозазоре резонатора.

Поскольку величина напряжённости поля в нанозазоре ограничена электрическим пробоем и туннельными токами, то она не может превышать некоторого фиксированного значения, определяя этим при заданной фиксированной частоте максимально возможные значения массы и размеров виброэлемента.

Отличительной особенностью рассматриваемых СВЧ МЭМС-элементов является перемещение подвижной пластины микрорезонатора в сильном электрическом поле вблизи границы раздела двух диэлектрических сред (одна из них газовая) с большим соотношением диэлектрических проницаемостей ε (более 1000). В данном случае в микроактюаторе, определяющем движение указанной пластины, имеет место такое распределение падений напряжений в двухслойной структуре, при котором основная часть приходится на нанозазор, но при этом его пробоя не происходит, так как он ограничен высокой электрической

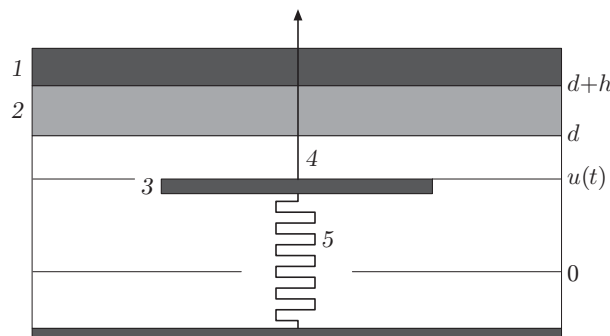


Рис. 1

прочностью диэлектрика (до 10^{10} В/м). Микроактюаторы, построенные на этом принципе электромеханического преобразования энергии, отличаются высокой удельной энергоёмкостью $A_{уд}$ (до 1–3 Дж/м²), развивают силы от 10^6 до 10^7 Н/м² и более [8, 9], что значительно выше, чем в широко используемых МЭМС-актюаторах, где она не превышает значения 0,01 Дж/м² [1]. В такой структуре для возбуждения собственных колебаний пластины возможно применение высоких напряжённостей электрических полей [8, 9], способных «раскачать» её колебания при высоких значениях G и, следовательно, при больших массе и размерах устройства, с использованием технологии современной микроэлектроники без нанотехнологических процессов.

Математическая модель микрорезонатора. Известные математические модели СВЧ МЭМС представляются начально-краевыми задачами уравнений математической физики, особенностью которых является нелинейность, описывающая электростатическое притяжение упругого элемента как подвижного электрода в узком межэлектродном зазоре. Для демонстрации возможности достижения в указанных структурах колебаний подвижного электрода в диапазоне частот 1–20 ГГц рассмотрим задачу движения платформы под воздействием импульса напряжения конечной длительности (импульса запуска). При этом в математической модели устройство «платформа» понимается как материальная точка, движение которой происходит под воздействием сил электростатического притяжения, инерции, сопротивления среды и упругой силы пружины [10–16]. По завершении действия импульса платформа продолжает движение в виде собственных колебаний.

Схема устройства платформа представлена на рис. 1, где 1 — неподвижный электрод; 2 — диэлектрик с высоким значением ε ; 3 — подвижный электрод (платформа); 4 — воздушный зазор $u(t)$ между поверхностями диэлектрика и платформы в текущий момент времени t ; 5 — пружина; 0 — положение платформы в начальный момент времени.

Величина $u(t)$ из положения покоя при $t = 0$ до момента прекращения действия импульса описывается дифференциальным уравнением с нулевыми начальными данными:

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + R \frac{du}{dt} + Gu = F(u), \quad u(0) = \frac{du}{dt}(0) = 0, \quad 0 \leq t \leq T_{\text{имп}}. \quad (1)$$

Здесь M — масса платформы; $F(u)$ — сила электростатического притяжения; R — коэффициент сопротивления среды; $T_{\text{имп}}$ — длительность воздействия импульса. С учётом малости воздушного зазора в сравнении с шириной и длиной поверхностей электродов и диэлектрика

$$F(u) = \frac{\varepsilon_0 V^2 S}{2(d + h/\varepsilon - u)^2}, \quad (2)$$

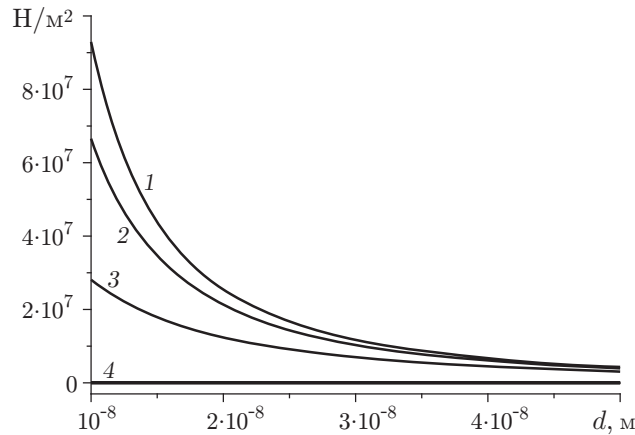


Рис. 2

где V — разность потенциалов между электродами; d — воздушный зазор; h — толщина диэлектрика; ε_0 — электрическая постоянная; S — площадь платформы. (Здесь и далее все параметры выражаются в системе СИ.)

На рис. 2 представлено распределение в указанной структуре сил электростатического притяжения подвижного электрода в нанометровом зазоре для конкретных значений V и h/ε (кривая 1 — 10^{-9} , 2 — $3,3 \cdot 10^{-9}$, 3 — 10^{-8} , 4 — 10^{-7}) [8]. Как видно, только при h/ε меньших 10^{-8} м такие силы имеют высокие значения, а использование диэлектриков с малым значением ε , например SiO_2 , малоэффективно. Указанные значения этих сил дают возможность применения упругих элементов с большими значениями G .

Далее мы рассмотрим случай, когда сопротивление среды не оказывает существенного влияния на колебания платформы с нанометровой амплитудой. Следовательно, по завершении действия импульса при $t > T_{\text{имп}}$ платформа в отсутствие сопротивления среды будет продолжать движение в виде незатухающих собственных колебаний с собственной частотой $\omega = \sqrt{G/M}$. Собственные колебания описываются уравнением (1), где $F(u) = 0$, $R = 0$, с начальными данными

$$u(T_{\text{имп}}) = \alpha, \quad \frac{du}{dt}(T_{\text{имп}}) = \beta.$$

Таким образом, значения α и β определяются из решения (1) при $t = T_{\text{имп}}$. В этой постановке существует точная зависимость между частотой и амплитудой собственных колебаний платформы и конструктивными параметрами, характеризующими изменение ёмкости устройства и энергоёмкости актюатора.

Кратко остановимся на выводе точных оценок. Как известно [17], дифференциальное уравнение

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + Gu = F(u) \quad (3)$$

имеет первый интеграл (интеграл энергии), который с учётом (2) записывается в явном виде. Это позволяет получить достаточно полное представление о свойствах решения (3). Следуя [17], можно показать, что (3) описывает автоколебания, если выполняется ограничивающее разность потенциалов неравенство

$$V < \omega \sqrt{\frac{8M}{27\varepsilon_0 S} \left(d + \frac{h}{\varepsilon}\right)^3} \quad (4)$$

и начальные данные для (3) принадлежат области с границей в виде петли сепаратрисы. Если эти условия не выполняются, то платформа за конечное время необратимо достигнет поверхности диэлектрика (явление «схлопывания»).

При нулевых начальных данных и длительности импульса равной полупериоду автоколебаний платформа в момент прекращения действия импульса имеет нулевую скорость. В этом случае собственные колебания платформы с частотой ω и амплитудой Ampl равной 2α будут определяться по формуле

$$u(t) = \frac{\text{Ampl}}{2} \cos(\omega(t - T_{\text{имп}})), \quad \omega = \sqrt{\frac{G}{M}}, \quad t > T_{\text{имп}}. \quad (5)$$

При этом считается выполненным естественное условие $\text{Ampl} < d + h/\varepsilon$. Используя выражение интеграла энергии при $t = T_{\text{имп}}$, получаем точное соотношение между параметрами модели, которое можно представить, например, в виде зависимости напряжения запуска от других параметров:

$$V = \left(d + \frac{h}{\varepsilon}\right) \omega \sqrt{(1 - K) \frac{M}{2\varepsilon_0 S} \text{Ampl}}; \quad K = \frac{\text{Ampl}}{2(d + h/\varepsilon)}. \quad (6)$$

Поскольку $G = \omega^2 M$, из (6) следует зависимость напряжения запуска колебаний от коэффициента жёсткости пружины:

$$V = \left(d + \frac{h}{\varepsilon}\right) \sqrt{(1 - K) \frac{G}{2\varepsilon_0 S} \text{Ampl}}. \quad (7)$$

Заметим, что для колебаний, амплитуда которых много меньше d , формулу (7) можно представить в виде

$$\text{Ampl} = 2 \frac{\varepsilon_0 V^2 S}{(d + h/\varepsilon)^2 G}, \quad (8)$$

или

$$F_1 = 2F_2,$$

где $F_1 = \text{Ampl}G/2$ — упругая сила пружины, возникающая при смещении платформы на расстояние $\text{Ampl}/2$; $F_2 = F(0)$ — сила электростатического притяжения платформы в начальный момент времени.

Вышеприведённые соотношения позволяют оценить минимальную удельную энергоёмкость микроактюатора $A_{\text{уд}}$, обеспечивающего запуск колебаний резонатора с заданной частотой в предположении $K \ll 1$ и $h/\varepsilon < d$:

$$A_{\text{уд}} \approx d\omega^2 M \text{Ampl}/2S \equiv d\omega^2 \text{Ampl} D \rho,$$

где ρ — плотность материала подвижного электрода, D — его толщина. Эта оценка показывает, что при $A_{\text{уд}} = 0,01$ Дж/м², характерной для современных МЭМС-актюаторов, трудно получить ω близкую к 1 ГГц, при этом величина M должна соответствовать субмикронным размерам подвижного элемента.

Рассмотрим особенности запуска колебаний платформы с заданной амплитудой ($\text{Ampl} = 0,5$ нм) на гигагерцовых частотах. Для определённости выберем следующие параметры: $M = 4,06 \cdot 10^{-16}$ кг, $d = 5 \cdot 10^{-8}$ м, $S = 10^{-12}$ м², $h = 10^{-6}$ м, $\varepsilon = 1000$, $\omega = 10$ ГГц.

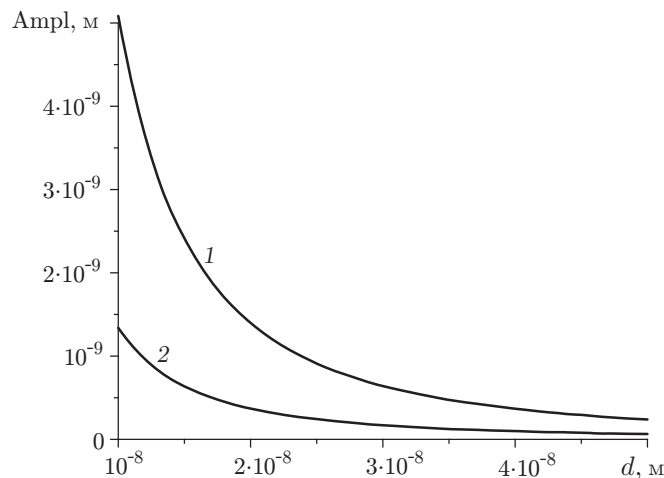


Рис. 3

Тогда согласно (6), (7) для реализации указанных колебаний требуется использовать напряжение $V = 54,5$ В при коэффициенте жёсткости пружины $G = 4,06 \cdot 10^4$ Н/м. Такое напряжение в нанометровых зазорах при наличии в них диэлектрика с высокой электрической прочностью и большим значением диэлектрической проницаемости, как показали экспериментальные исследования, не вызывает пробоя зазора [8, 9].

На рис. 3 представлена зависимость амплитуды колебаний подвижного электрода от величины нанозазора d (кривая 1) при вышеуказанных параметрах. Кривая 2 описывает поведение амплитуды при $V = 27,25$ В. Как видно, величина d является одним из важнейших факторов, обеспечивающих возможность работы электромеханического устройства на гигагерцовых частотах.

Достижение достаточно высокой величины G с сохранением микрометровых размеров прибора рассмотрим на примере одной из конструкций резонатора, в которой в качестве упругого элемента используется балка с прямоугольным сечением длиной $2l$, шириной L и толщиной H . Концы балки жёстко закреплены, она соединена с платформой в центре. В невозмущённом положении поверхность балки параллельна поверхности диэлектрика. По отношению к упругой балке силы электростатики и инерции, действующие на платформу, играют роль сосредоточенной силы $F_c(t)$, приложенной в центре балки. При этом предполагается, что масса балки много меньше массы платформы, а сопротивление среды, оказываемое движению балки, пренебрежимо мало. Поскольку смещения балки малы, то её прогиб в центре, равный смещению $u(t)$, будет пропорционален $F_c(t)$ с коэффициентом пропорциональности $1/G$, где

$$G = 24LD/l^3$$

(D — цилиндрическая жёсткость, $D = JH^3/12$, J — модуль Юнга). В результате получим следующее выражение для коэффициента жёсткости пружины в дифференциальном уравнении (1):

$$G = 2JL(H/l)^3.$$

Отсюда находим длину балки, при которой жёсткость G имеет заданное значение $\omega^2 M$:

$$l = H \left(\frac{2JL}{G} \right)^{1/3} = H \left(\frac{2JL}{\omega^2 M} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

Пусть в формуле (9) $J = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м², $H = 10^{-7}$ м, $L = 10^{-6}$ м, тогда значение $G = 4,06 \cdot 10^4$ Н/м достигается при $1,9 \cdot 10^{-7}$ м. Отметим, что указанные размеры элемента упругости, как и размеры самой платформы, выполнимы с помощью технологии современной микроэлектроники.

Формально в рамках рассматриваемой модели размеры виброэлемента не ограничены, но реально они ограничиваются скоростью звука в твёрдом теле (в материалах подвижного электрода и упругих элементов). Полагая для определённости, что эта скорость составляет $5 \cdot 10^3$ м/с, имеем при частоте 5–10 ГГц ограничение размеров подвижного элемента в пределах 1 мкм.

Заметим, что при наличии сопротивления среды для поддержания постоянных колебаний платформы необходимо использовать, как и в известных устройствах подобного типа, СВЧ-фильтры, генераторы частоты, дополнительное переменное во времени воздействие (напряжение), амплитуда которого на несколько порядков меньше напряжения запуска. Отличительной особенностью влияния потерь энергии в рассматриваемом резонаторе является то, что отношение потенциальной энергии, накапливаемой в упругих элементах резонатора, к энергии, теряемой за один период, — добротность Q — очень велико; величина Q в воздушной среде может превышать 10^9 . С увеличением G при соответствующей массе платформы относительная роль силы сопротивления среды будет уменьшаться, а Q возрастать.

Можно отметить также, что вопрос о практически полном исключении влияния сопротивления среды на параметры колебаний в современных МЭМС-осцилляторах решается помещением их в вакуум и герметизацией с использованием специального геттера, время сохранения вакуума (10^{-6} торр) в полости прибора составляет до 25 лет.

Как и МЭМС-генераторы, рассматриваемое устройство должно содержать наряду с самим микрорезонатором схемы для управления его работой, в том числе схему внешнего возбуждения для обеспечения незатухающих колебаний платформы. Кроме того, необходима схема для стабилизации температуры и частоты. В качестве регистрируемого параметра можно использовать величину изменения ёмкости межэлектродного зазора, составляющую 10^{-16} – 10^{-17} Ф.

Заключение. Проведённый в данной работе анализ особенностей функционирования нанорезонатора со структурой металл—диэлектрик с высоким значением диэлектрической проницаемости—нанозазор—подвижный электрод показал, что такая его конструкция даёт возможность достичь гигагерцовых частот при микрометровых размерах подвижного электрода. Особенности распределения возбуждающего электрического поля в двухслойном конденсаторе, когда напряжение прикладывается к нанозазору без его электрического пробоя, позволяют использовать амплитуды напряжения, достаточные для преодоления сил упругости элементов с высокими коэффициентами жёсткости при соответствующей высокой частоте колебаний подвижного электрода.

Получены аналитические оценки, с помощью которых можно установить связь частоты, амплитуды колебаний подвижного элемента, изменений ёмкости устройства, энергоёмкости возбуждающего актюатора и его конструктивных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косцов Э. Г. Состояние и перспективы микро- и нанoeлектромеханики // Автометрия. 2009. 45, № 3. С. 3–52.
2. Гринберг Я. С., Пашкин Ю. А., Ильичев Е. В. Наномеханические резонаторы // УФН. 2012. 182, № 4. С. 407–436.

3. **Cimalla V., Niebelschütz F., Tonisch K. et al.** Nanoelectromechanical devices for sensing applications // *Sensors and Actuators B*. 2007. **126**, N 1. P. 24–34.
4. **Cagliani A., Davis Z. J.** Ultrasensitive bulk disk microresonator-based sensor for distributed mass sensing // *Journ. Micromech. Microeng.* 2011. **21**, N 4. 045016.
5. **Tappura K., Pekko P., Sepp H.** High-*Q* micromechanical resonators for mass sensing in dissipative media // *Journ. Micromech. Microeng.* 2011. **21**, N 6. 065002.
6. **Kostsov E. G.** Nanoelectromechanical systems, NEMS // *Encyclopedia of Life Support Systems*. Vol. Nanoscience and Nanotechnologies. UNESCO-EOLSS Publishers, 2010. P. 662–676.
7. **Lu M., Lu X., Jang M.-W. et al.** Characterization of carbon nanotube nanoswitches with gigahertz resonance frequency and low pull-in voltages using electrostatic force microscopy // *Journ. Micromech. Microeng.* 2010. **20**, N 10. 105016.
8. **Kostsov E. G.** Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control*. 2006. **53**, N 12. P. 2294–2299.
9. **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.
10. **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'05)*. P. 423–424.
11. **Chen W.-C., Fang W., Li S.-S.** A generalized CMOS-MEMS platform for micromechanical resonators monolithically integrated with circuits // *Journ. Micromech. Microeng.* 2011. **21**, N 6. 065012.
12. **Colinet E., Juillard J., Guessab S., Kielbasa R.** Actuation of resonant MEMS using short pulsed forces // *Sensors and Actuators A*. 2004. **115**, N 1. P. 118–125.
13. **Phan K. L., Fey R. H. B., Hulshof J. et al.** Amplitude saturation of MEMS resonators explained by autoparametric resonance // *Journ. Micromech. Microeng.* 2010. **20**, N 10. 105012.
14. **Lee M.-C. M., Wu M. C.** Tunable coupling regimes of silicon microdisk resonators using MEMS actuators // *Opt. Express*. 2006. **14**, N 11. P. 4703–4712.
15. **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 8. P. 1720–1733.
16. **Гридчин В. А., Драгунов В. П.** Физика микросистем: Учеб. пособие. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 415 с.
17. **Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э.** Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 916 с.

Поступила в редакцию 16 августа 2012 г.
