

Микроволновая наноэлектромеханическая система: усиление слабых сигналов*

Я.С. ГРИНБЕРГ, А.А. ШТЫГАШЕВ, Ю.Г. ПЕЙСАХОВИЧ, А.Н. СУЛТАНОВ

Статья посвящена исследованию эффекта электромеханического усиления слабого микроволнового сигнала в наноэлектромеханической системе, состоящей из микроволнового СВЧ-резонатора и взаимодействующего с ним посредством емкостной связи низкочастотного наноразмерного механического резонатора (НМР), размеры которого лежат в нанометровой области. Входной микроволновой сигнал возбуждения является суперпозицией двух сигналов с близкими частотами ω_1 и ω_2 , один из которых (сигнал на частоте ω_2) является слабым и подлежит усилению. При этом НМР возбуждается разностной частотой $\omega_1 - \omega_2$, близкой к его собственной частоте. Получены аналитические выражения для амплитудных характеристик усиливаемого сигнала, а также эффективного затухания НМР как функций вынуждающей микроволновой частоты и входной микроволновой мощности. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании сверхчувствительных измерительных устройств на основе наномеханических резонаторов.

Ключевые слова: микроволновой резонатор, наномеханический резонатор, параметрический резонанс.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение слабых электрических сигналов, выделение их на фоне собственного шума детектора или внешних помех является одной из ключевых проблем во многих естественно научных областях, таких как радиофизика, экспериментальная физика, радиотехника, приборостроение и т. п. В ряде задач эту проблему можно решать с помощью схемы, в которой электрические колебания взаимодействуют с механическими. По-видимому, впервые такая схема была рассмотрена группой Брагинского [1–5]. Анализируя возможные способы детектирования гравитационных волн, они рассмотрели последовательный резонансный контур, в котором одна из пластин конденсатора была подвижной. Они обнаружили, что при определенных соотношениях между параметрами электрической и механической частей схемы добротность механического осциллятора зависит от частоты возбуждения электрического контура. Очевидно, что этот эффект можно использовать для усиления как электрических, так и механических сигналов.

В настоящее время эта идея получила новое развитие в микро и наноэлектронике в связи с тем, что современные технологии позволяют изготавливать наноразмерные механические осцилляторы, собственная частота которых лежит в гигагерцовой области, а добротность составляет несколько сотен. Такие наномеханические осцилляторы легко интегрировать на одном чипе с микроволновым СВЧ-трактом. Получающиеся при этом гибридные структуры, называемые наноэлектромеханическими системами (НЭМС), являются перспективными для многих научных и технических применений, таких как детектирование сверхмалых сил, измерение слабых сигналов, исследование квантовых свойств мезоскопических систем и т. п. (см. обзор [6] и имеющиеся там ссылки). Современные технологии позволяют реализовать такие системы в твердотельном исполнении на одном чипе, что открывает новые возможности по их использованию в качестве основы для создания сверхчувствительных измерительных устройств.

В настоящей работе рассматривается система, состоящая из низкочастотного наноразмерного механического резонатора (НМР), являющегося одной из пластин электрического конденсатора, параллельно связанного с высокочастотным резонансным контуром (микроволновым резонатором). Хорошо известно, что в подобных системах добротность и эффективная темпера-

* Статья получена 7 марта 2013 г.

тура НМР в значительной степени зависят от частоты и входной мощности резонансного контура [7–9]. Недавние эксперименты показывают, что, связав на одном чипе наномеханический резонатор с микроволновым резонатором, можно добиться уменьшения флуктуаций смещения НМР вплоть до уровня или ниже стандартного квантового предела [10–12].

На рис. 1 представлена блок-схема НЭМС, которая анализируется в настоящей работе.

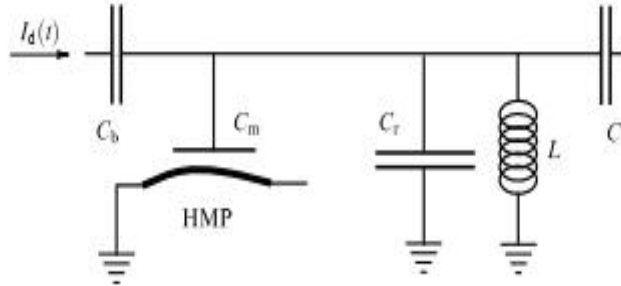


Рис. 1. Нанoeлектромеxаническая система, состоящая из НМР и связанного с ним микрополоскового резонатора:

I_d – ток возбуждения; C_b – ёмкость, связывающая внешнюю измерительную линию с микроволновым резонатором; C_r – ёмкость микрополоскового резонатора; L – индуктивность резонатора; C_m – ёмкость механического резонатора

СВЧ-резонатор возбуждается высокочастотным сигналом, частота которого (как правило, несколько ГГц) близка к собственной частоте микрополоскового резонатора. Наномеханический резонатор, собственная частота которого значительно ниже частоты СВЧ резонатора (как правило, порядка нескольких МГц), представляет собой наноразмерный конденсатор, одна из пластин которого может под действием кулоновских сил колебаться вдоль перпендикулярного направления. Эти колебания в свою очередь приводят к параметрическим колебаниям собственной частоты СВЧ-резонатора, что, в свою очередь, приводит к модуляции выходного сигнала СВЧ-тракта. Эта система обладает довольно богатой динамикой. С помощью высокой частоты можно изменять затухание механического осциллятора, охлаждая или нагревая его фундаментальную моду, что важно, если механический осциллятор используется в качестве чувствительного детектора при измерении малых сил. И наоборот, механический осциллятор может служить в качестве «усилителя» слабого высокочастотного электрического сигнала [13].

Настоящая работа посвящена исследованию эффекта микроволнового усиления электрического сигнала. В отличие от работы [13], где параметры механического осциллятора и температура (25 мК) были таковы, что задача анализировалась в рамках квантовой механики, в настоящей работе проведено классическое рассмотрение этой задачи, что предполагает наблюдение этого эффекта в менее жестких экспериментальных условиях.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Обозначим через C_m , q_m и C_0 , q_0 емкость и заряд механического осциллятора и СВЧ резонатора, соответственно. Положим $C_m \ll C_0$, где $C_m = \epsilon_0 S / (d + x)$, S – площадь пластин, d – равновесное расстояние между пластинами, x – смещение подвижной пластины, под действием кулоновских сил. В линейном приближении, считая $x \ll d$, получим уравнение

$$\ddot{q} + \Gamma_r \dot{q} + \omega_r^2 q + \epsilon \omega_r^2 \frac{x}{d} q = \frac{1}{L} (V_f(t) + V_{rf}(t)), \quad (1)$$

где q – суммарный заряд на емкости СВЧ резонатора и емкости НМР, $\epsilon = C_m^0 / (C_0 + C_m^0)$, $C_m^0 = \epsilon_0 S / d$, $\omega_r^2 = 1 / L(C_m^0 + C_0)$, L – индуктивность микроволнового резонатора; Γ_r – пара-

метр затухания, $V_{rf}(t)$ – входной СВЧ сигнал, $V_f(t)$ – источник электрических тепловых флуктуаций.

Точное уравнение для смещения механического осциллятора имеет следующий вид:

$$\ddot{x} + \Gamma_m \dot{x} + \omega_m^2 x = -\frac{q_m^2}{2mC_m^0 d} + \frac{F_f(t)}{m}, \quad (2)$$

где $m, \Gamma_m, \omega_m, q_m$ – соответственно, масса, затухание, собственная частота и заряд емкости механического осциллятора, $F_f(t)$ – источник механических тепловых флуктуаций. Поскольку емкости C_0 и C_m включены параллельно, то между зарядами q и q_m существует очевидное соотношение $q_m = qC_m / (C_m + C_0)$, так что в линейном по x/d приближении $q_m \approx q\epsilon(1 - \alpha x/d)$. Подставив это выражение в (2), мы получим уравнение для механического осциллятора в линейном по x/d приближении, которое вместе с уравнением (1) будет являться исходным для дальнейшего анализа.

$$\ddot{x} + \Gamma_m \dot{x} + \omega_m^2 x = -dD \left(1 - 2\alpha \frac{x}{d} \right) q^2 + \frac{F_f(t)}{m}, \quad (3)$$

где $D = \frac{\epsilon^2}{2mC_m^0 d^2}$, $\alpha = \frac{C_0}{C_0 + C_m^0}$.

Идея усиления слабого сигнала состоит в следующем. Во входной тракт микрополоскового резонатора подается сигнал на частоте ω_1 , смещенной вправо относительно резонансной частоты ω_r на резонансную частоту механического осциллятора ω_m :

$$\omega_1 = \omega_r + \Omega; \quad \Omega \approx \omega_m \ll \omega_r. \quad (4a)$$

Известно, что при таком смещении параметр затухания НМР, Γ_m уменьшается и его добротность возрастает [1, 3, 13]. Если теперь во входной тракт подать сигнал на частоте ω_2 , близкой к частоте резонанса электрического контура

$$\omega_2 = \omega_r - \Delta; \quad \Delta \ll \omega_r, \quad (4b)$$

то этот сигнал будет усилен за счет параметрического преобразования механических колебаний в электрические. В соответствии с постановкой задачи величина Ω всегда положительна, а величина Δ может иметь любой знак.

В соответствии с вышесказанным входной внешний сигнал в уравнении (1) выбираем в виде:

$$V_{rf}(t) = V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t, \quad (5)$$

где первое слагаемое представляет несущий сигнал, частота которого смещена относительно резонансной частоты ω_r на резонансную частоту механического осциллятора ω_m , а второе слагаемое представляет слабый сигнал (подлежащий усилению), частота которого настроена на частоту ω_r резонансного контура.

Заряд q в (1) представим в виде суммы $q = q_0 + q_1$, где q_0 подчиняется уравнению

$$\ddot{q}_0 + \Gamma_r \dot{q}_0 + \omega_r^2 q_0 = \frac{1}{L} V_{rf}(t), \quad (6)$$

решение которого имеет вид

$$q_0 = A \cos \omega_1 t + B \sin \omega_1 t + a \cos \omega_2 t + b \sin \omega_2 t, \quad (7)$$

где с учетом (4а) и (4б)

$$A = -\frac{V_1}{2\omega_r L} \frac{\Omega}{\Omega^2 + \gamma^2}; \quad B = \frac{V_1}{2\omega_r L} \frac{\gamma}{\Omega^2 + \gamma^2}, \quad (8a)$$

$$a = \frac{v_2}{2\omega_r L} \frac{\Delta}{\Delta^2 + \gamma^2}; \quad b = \frac{v_2}{2\omega_r L} \frac{\gamma}{\Delta^2 + \gamma^2}, \quad (8б)$$

где $\gamma = \Gamma_r/2$.

Заряд q_1 ($q_1 \ll q_0$) представляет поправку, учитывающую смещение механического осциллятора и флуктуации, как в электрической части контура, так и механического осциллятора. Величина q_1 удовлетворяет уравнению

$$\ddot{q}_1 + \Gamma_r \dot{q}_1 + \omega_r^2 q_1 = -\varepsilon \omega_r^2 \frac{x}{d} q_0 + \frac{1}{L} V_f(t). \quad (9)$$

Подставляя $q = q_0 + q$ в правую часть уравнения (3), получим

$$\ddot{x} + \Gamma_m \dot{x} + \omega_m^2 x = -dD \left(1 - 2\alpha \frac{x}{d} \right) q_0^2 - dD 2q_0 q_1 + \frac{F_f(t)}{m}. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) являются исходными для дальнейшего анализа.

2. РАСЧЕТ СТЕПЕНИ УСИЛЕНИЯ СЛАБОГО СИГНАЛА

В этом разделе мы пренебрегаем в уравнениях (9) и (10) флуктуационными источниками $V_f(t)$ и $F_f(t)$. Решение уравнения (9) ищем в виде

$$q_1 = A_1 \cos \omega_1 t + B_1 \sin \omega_1 t + a_1 \cos \omega_2 t + b_1 \sin \omega_2 t, \quad (11)$$

где коэффициенты A_1, B_1, a_1, b_1 являются медленными функциями времени с частотой порядка ω_m , которая много меньше частоты ω_r . Задача заключается в нахождении амплитуд a_1 и b_1 , и сравнения их с амплитудами исходного сигнала a и b . Алгоритм следующий:

1. Подставляем (11) в (9) и посредством усреднения по высокой частоте ω_1 выражаем медленные переменные A_1, B_1, a_1, b_1 через медленную амплитуду механического осциллятора x .
2. Полученный результат подставляем в правую часть уравнения (10), получая тем самым замкнутое уравнение для x в медленных переменных.
3. Решаем уравнение (9) для x .
4. Зная как a_1, b_1 зависят от x (см. п. 1) и используя результат п. 3, находим выражения для a_1, b_1 через параметры системы.

Подставляем (11) в (9) и, применяя метод медленных переменных Боголюбова–Митропольского (коэффициенты A_1, B_1, a_1, b_1 представляют медленно меняющиеся по сравнению с ω_r амплитуды), получим связь между фурье-компонентами амплитуд A_1, B_1, a_1, b_1 и фурье амплитудой смещения НМР, $u(\omega) = x(\omega)/d$: $a_1(\omega) = f_1(\omega) u(\omega)$; $b_1(\omega) = f_2(\omega) u(\omega)$; $A_1(\omega) = f_3(\omega) u(\omega)$; $B_1(\omega) = f_4(\omega) u(\omega)$, где

$$f_1(\omega) = \frac{\varepsilon v_2}{4L} \frac{\Delta^2 - \gamma^2 - i\omega\gamma \left(1 - \frac{\Delta}{\omega_r} \right)}{(\Delta^2 + \gamma^2)(\omega^2 - \gamma^2 - \Delta^2 - 2i\omega\gamma)}, \quad (12)$$

$$f_2(\omega) = \frac{\varepsilon V_2}{4L} \frac{2\Delta\gamma + i\omega \left(\Delta + \gamma \frac{\gamma}{\omega_r} \right)}{(\Delta^2 + \gamma^2)(\omega^2 - \gamma^2 - \Delta^2 - 2i\omega\gamma)}, \quad (13)$$

$$f_3(\omega) = \frac{\varepsilon V_1}{4L} \frac{\Omega^2 - \gamma^2 - i\omega\gamma}{(\Omega^2 + \gamma^2)(\omega^2 - \Omega^2 - \gamma^2 - 2i\omega\gamma)}, \quad (14)$$

$$f_4(\omega) = -\frac{\varepsilon V_1}{4L} \frac{2\Omega\gamma + i\omega \left(\Omega - \frac{\gamma^2}{\omega_r} \right)}{(\Omega^2 + \gamma^2)(\omega^2 - \Omega^2 - \gamma^2 - 2i\omega\gamma)}. \quad (15)$$

При выводе уравнений (12)–(15) учтена малость частотной отстройки от соответствующих резонансов: $\omega_r^2 - \omega_2^2 \approx 2\omega_r\Delta$; $\omega_r^2 - \omega_1^2 \approx -2\omega_r\Omega$. Текущая частота ω в этих уравнениях является низкой частотой порядка частоты НМР ω_m .

Проведем усреднение по периоду быстрых осцилляций в уравнении (10):

$$\ddot{u} + \Gamma_m \dot{u} + \omega_m^2 u = -D(1 - 2\alpha u) \langle q_0^2 \rangle - 2D \langle q_0 q_1 \rangle. \quad (16)$$

Усредненные величины имеют следующую структуру:

$$\langle q_0^2 \rangle = \Lambda_{00} + \Lambda_{01} \cos \Omega t + \Lambda_{02} \sin \Omega t, \quad (17a)$$

$$\langle q_0 q_1 \rangle = \Lambda_{10} + \Lambda_{11} \cos \Omega t + \Lambda_{12} \sin \Omega t. \quad (17b)$$

Коэффициенты Λ_{ij} представляют собой комбинации произведений амплитуд заряда на СВЧ тракте и амплитуд заряда на НМР: $\Lambda_{00} = (A^2 + B^2 + a^2 + b^2)/2$; $\Lambda_{01} = Aa + Bb$; $\Lambda_{02} = Ba - Ab$; $\Lambda_{10} = (AA_1 + BB_1 + aa_1 + bb_1)/2$; $\Lambda_{11} = (Aa_1 + Bb_1 + aA_1 + bB_1)/2$; $\Lambda_{12} = (Ba_1 - Ab_1 + aB_1 - bA_1)/2$.

Таким образом, правая часть в (16) приводит к перенормировке частоты и затухания НМР. При этом, правая часть уравнения (16) примет вид

$$-D_1(1 - 2\alpha u) \langle q_0^2 \rangle - 2D \langle q_0 q_1 \rangle = -D(\Lambda_{01} \cos \Omega t + \Lambda_{02} \sin \Omega t) + 2\alpha u D \Lambda_{00} - 2D \Lambda_{10}. \quad (18)$$

Последние два слагаемых в правой части этого выражения приводят к перенормировке частоты и затухания НМР, а первое слагаемое представляет собой внешнее возбуждение НМР на низкой частоте Ω , которое обусловлено именно слабым сигналом на частоте ω_2 в (7). С учетом вышесказанного решение уравнения (16) в фурье-компонентах имеет следующий вид:

$$Z(\omega)u(\omega) = F_0(\omega), \quad (19)$$

где $F_0(\omega)$ есть фурье-компонента первого слагаемого в правой части (18) и

$$Z(\omega) = \omega_{eff}^2(\omega) - \omega^2 + i\omega\Gamma_{eff}(\omega), \quad (20)$$

где ω_{eff} , Γ_{eff} – эффективные частота и затухание НМР.

Таким образом, решение уравнения (16) имеет следующий вид:

$$u(\omega) = u_1(\Omega)\delta(\omega - \Omega) + u_1^*(\Omega)\delta(\omega + \Omega), \quad (23a)$$

где

$$u_1(\Omega) = -\pi D \frac{(\Lambda_{01} - i\Lambda_{02})}{Z(\Omega)}. \quad (23б)$$

Из (23а) следует, что эффективные параметры ω_{eff} и Γ_{eff} входят в амплитуды сигнала на частоте $\omega = \Omega$. При этом выражения для этих величин значительно упрощаются при дополнительных условиях $\gamma/\omega_r \ll 1$, $\Omega/\omega_r \ll 1$, $\Delta/\omega_r \ll 1$.

$$\omega_{\text{eff}}^2(\Omega) = \omega_m^2 - 2\alpha D \Lambda_{00} + \frac{\varepsilon D}{8\omega_r L^2} \left(\frac{V_1^2}{(\Omega^2 + \gamma^2)} \frac{\Omega}{\gamma^2 + 4\Omega^2} + \frac{v_2^2}{(\Delta^2 + \gamma^2)} \frac{\Delta(\Omega^2 - \Delta^2 - \gamma^2)}{(\Omega^2 - \Delta^2 - \gamma^2)^2 + 4\gamma^2 \Omega^2} \right) \quad (24)$$

$$\Gamma_{\text{eff}}(\Omega) = \Gamma_m - \frac{\varepsilon D \gamma}{4\omega_r L^2} \left(\frac{V_1^2}{(\Omega^2 + \gamma^2)} \frac{\Omega}{\gamma^4 + 4\gamma^2 \Omega^2} - \frac{v_2^2}{(\Delta^2 + \gamma^2)} \frac{\Delta}{(\Omega^2 - \Delta^2 - \gamma^2)^2 + 4\gamma^2 \Omega^2} \right). \quad (25)$$

С учетом (23) и выражений (12) и (13) получим комплексные фурье амплитуды выходного сигнала на частоте ω_2 , обусловленного влиянием НМР. Вследствие (23) очевидно, что амплитуды a_1 и b_1 являются максимальными на частоте резонанса механического осциллятора, т. е. там, где $|Z(\Omega)|$ имеет минимум. Во временном представлении амплитуды a_1 и b_1 запишутся следующим образом:

$$a_1 = \alpha_1 \cos(\Omega t - \chi_1), \quad (26а)$$

$$b_1 = \beta_1 \cos(\Omega t - \chi_2). \quad (26б)$$

Амплитуда α_1 и фаза χ_1 выражаются через фурье-компоненты (12) и (23б):

$$\alpha_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{[\text{Re}(f_1(\Omega)u_1(\Omega))]^2 + [\text{Im}(f_1(\Omega)u_1(\Omega))]^2}; \quad \text{tg} \chi_1 = \frac{\text{Im}(f_1(\Omega)u_1(\Omega))}{\text{Re}(f_1(\Omega)u_1(\Omega))}. \quad (26в)$$

Выражения для β_1 и χ_2 аналогичны (26в) с заменой $f_1(\Omega)$ на $f_2(\Omega)$ из (13). В выходном спектре, который представляет собой сумму двух сигналов q_0 (7) и q_1 (11)), появляется сигнал s на частоте ω_2 , модулированный на низкой частоте Ω , близкой к резонансной частоте НМР:

$$s = [\dot{a} + \alpha_1 \cos(\Omega t - \chi_1)] \cos \omega_2 t + [b + \beta_1 \cos(\Omega t - \chi_2)] \sin \omega_2 t. \quad (27)$$

Аппаратными средствами можно выделить как амплитуды α_1 и β_1 по отдельности, так и любую их комбинацию.

Конкретный расчет мы проведем для следующих параметров системы: $m = 10^{-11}$ г, $\omega_m/2\pi = 2$ МГц, $\Gamma_m/2\pi = 200$ Гц, $d = 1$ мкм, $\omega_r/2\pi = 7.5$ ГГц, $\Gamma_r/2\pi = 2$ МГц, $C_0 = 1$ пФ, $L = 450$ пГн, $T_r = T_m = 100$ мК, $\varepsilon = 0.01$, $\alpha = 0.99$, $V_1 = 24$ мкВ, $v_2 = 14.5$ мкВ.

На рис. 2 представлена зависимость эффективного затухания НМР от расстройки по высокой частоте Δ для случая, когда $\Omega = \omega_m$. Из этого графика следует, что при выбранных параметрах системы величина параметра затухания НМР, обусловленная его взаимодействием с микроволновым трактом, всегда остается меньше своего собственного значения Γ_m и даже может принимать отрицательные значения, что соответствует неустойчивому режиму возбуждения. Тот факт, что эффективное затухание НМР зависит от Δ и Ω (см. (25)), позволяет управлять амплитудами сигнала модуляции a_1 и b_1 , с помощью частот ω_1 , ω_2 внешнего сигнала.

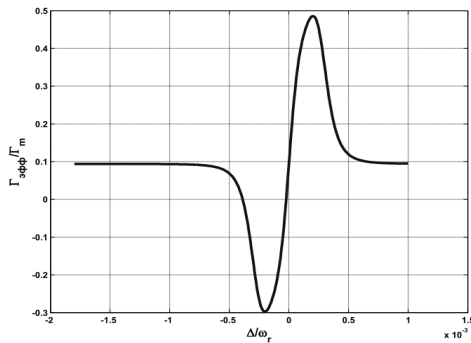
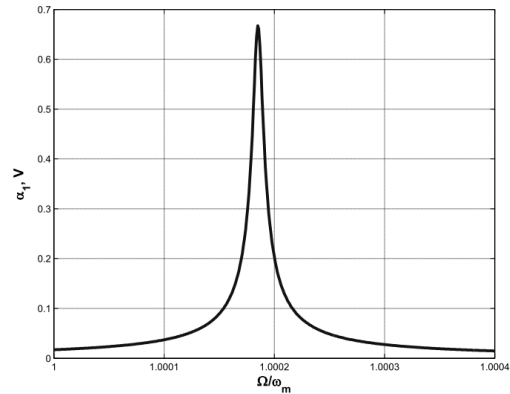


Рис. 2. Зависимость эффективного затухания НМР от расстройки по высокой частоте

Рис. 3. Зависимость амплитуды выходного сигнала α_1 от расстройки по низкой частоте

Эффект усиления состоит в том, что в выходном сигнале (27) появляются амплитуды α_1 , β_1 , пропорциональные амплитуде v_2 во входном сигнале и модулированные на низкой частоте Ω близкой к собственной частоте НМР. Поскольку эти амплитуды, в отличие от амплитуд a и b , являются частотно модулированными, то их можно выделить аппаратными средствами независимо от величины амплитуд a и b . В частности, при настройке второго сигнала в (5) на точный резонанс ($\Delta = 0$), амплитуда a в (26) обращается в нуль. На рис. 3 представлена зависимость амплитуды α_1 от расстройки по низкой частоте Ω для случая, $\Delta = 0$, т. е. входной слабый сигнал настроен точно на резонанс микроволнового тракта. Сравнение графиков на рис. 2 и 3 показывает, что максимум амплитуды α_1 и ширина этого резонанса соответствуют $\Gamma_{\text{эфф}} = 0.1 \Gamma_m$, что и определяет эффект усиления: в данном случае максимум амплитуды $\alpha_1 = 0.67 \text{ В}$ следует сравнить с величиной $b = 54 \text{ мВ}$. То есть в данном случае коэффициент усиления равен примерно 12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена наноэлектромеханическая система, состоящая из микроволнового СВЧ резонатора и наномеханического резонатора, взаимодействующего с микроволновым трактом посредством емкостной связи. Входной микроволновой сигнал возбуждения является суперпозицией двух сигналов с близкими частотами ω_1 и ω_2 , один из которых (сигнал на частоте ω_2) является слабым и подлежит усилению. При этом НМР возбуждается разностной частотой $\omega_1 - \omega_2$, близкой к его собственной частоте. Показано, что выходной микроволновой сигнал представляет собой суперпозицию сигналов, амплитуды которых модулированы частотой близкой к собственной частоте НМР. Величинами этих амплитуд можно управлять, подстраивая частоты ω_1 и ω_2 входного сигнала. В линейном приближении получены аналитические выражения для амплитуды выходного сигнала на частоте ω_2 и эффективного затухания НМР как функций вынуждающей микроволновой частоты и входной микроволновой мощности. Численный расчет, проведенный для конкретных параметров системы, которые в настоящее время достижимы технологически, показывает, что за счет уменьшения эффективного затухания НМР можно достичь существенного усиления входного сигнала по амплитуде. Для рассмотренных конкретных параметров схемы коэффициент усиления составил примерно 12. Полученные в настоящей работе результаты можно использовать при практической реализации наноэлектромеханических устройств подобного типа с целью усиления слабых сигналов. Работа осуществлена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы развития научного потенциала высшей школы, грант № 2.1.2./11.626 и АВЦП 7.1667.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Брагинский В.Б.** Влияние системы измерения малых смещений на динамические свойства механических колебательных систем / В.Б. Брагинский, И.И. Минакова // Вестник МГУ. – 1964. – Сер. III. – № 1. – С. 83.
- [2] **Манукин А.Б.** О колебательном контуре с емкостью – механическим осциллятором / А.Б. Манукин, М.Ю. Тихонов // Вестник МГУ. – 1970. – Сер. III. – № 5. – С. 584.
- [3] **Брагинский В.Б.** Детектор малых механических колебаний для гравитационной антенны / В.Б. Брагинский, В.И. Панов, В.Д. Попельнюк // Письма в ЖЭТФ. – 1981. – Т. 33. – С. 423.
- [4] **Брагинский В.Б.** Физические эксперименты с пробными телами / В.Б. Брагинский. – М.: Наука, 1970. – 136 с.
- [5] **Брагинский В.Б.** Измерение малых сил в физических экспериментах / В.Б. Брагинский, А.Б. Манукин. – М.: Наука, 1974. – 152 с.
- [6] **Гринберг Я.С.** Наномеханические резонаторы / Я.С. Гринберг, Ю.А. Пашкин, Е. Ильичёв // Успехи Физических Наук. – 2012. – Т. 182. – № 4. – С. 407–436. **Greenberg Ya.S.** Nanomechanical resonators / Ya.S. Greenberg, Yu.A. Pashkin, E. Il'ichev // Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences). – 2012. – Vol. 55. – № 4. – P. 382–407.
- [7] **Wineland D.J.** Cantilever cooling with radio frequency circuits / D.J. Wineland, J. Britton, R. J. Epstein, D. Leibfried, R.B. Blakestad, K. Brown, J.D. Jost, C. Langer, R. Ozeri, S. Seidelin, J. Wesenberg. – Mode of access: <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0606180.pdf>.
- [8] **Brown K.R.** Passive Cooling of a Micromechanical Oscillator with a Resonant Electric Circuit / K.R. Brown, J. Britton, R.J. Epstein, J. Chiaverini, D. Leibfried, and D. J. Wineland // Phys. Rev. Lett. – 2007. – Vol. 99. – № 137205.
- [9] **Grajcar M.** Lower limit on the achievable temperature in resonator-based sideband cooling / M. Grajcar, S. Ashhab, J. R. Johansson, Franco Nori // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 78. – № 035406.
- [10] **Regal C.A.** Measuring nanomechanical motion with a microwave cavity interferometer / C.A. Regal, J.D. Teufel, K.W. Lehnert // Nature Phys. – 2008. – Vol. 4. – P. 555–560.
- [11] **Teufel J.D.** Nanomechanical motion measured with an imprecision below that at the standard quantum limit / J.D. Teufel, T. Donner, M.A. Castellanos-Beltran, J.W. Harlow, K.W. Lehnert // Nature Nanotech. – 2009. – Vol. 4. – P. 820.
- [12] **Hertzberg J.B.** Back-action-evading measurements of nanomechanical motion / J.B. Hertzberg, T. Rocheleau, T. Ndukum, M. Savva, A.A. Clerk, K.C. Schwab // Nature Physics. – 2010. – Vol. 6. – P. 213.
- [13] **Massel F.** Microwave amplification with nanomechanical resonators / F. Massel, T.T. Heikkilä, J.-M. Pirkkalainen, S.U. Choi, H. Saloniemi, P.J. Hakonen, A. Sillanpää // Nature. – 2011. – Vol. 480. – P. 351

REFERENCES

- [1] Braginskij V.B., Minakova I.I., Vlijanie sistemy izmerenij malyh smeshhenij na dinamicheskie svoystva mekhanicheskikh kolebatel'nyh system. Vestnik MGU, 1964, Ser. III, no.1, p. 83.
- [2] Manukin A.B., Tihonov M.Ju. O kolebatel'nom konture s emkost'ju- mehanicheskim oscilljatorom. Vestnik MGU, 1970, Ser. III, no.5, p. 584.
- [3] Braginskij V.B., Panov V.I., Popel'njuk V.D. Detektor malyh mekhanicheskikh kolebanij dlja gravitacionnoj anteny. Pis'ma v ZhJeTF, 1981, vol. 33, p. 423.
- [4] Braginskij V.B. Fizicheskie jeksperimenty s probnymi telami. M.: Nauka, 1970, 136 p.
- [5] Braginskij V.B., Manukin A. B. Izmerenie malyh sil v fizicheskikh jeksperimentah. M.: Nauka, 1974, 152 p.
- [6] Grinberg Ja.S., Pashkin Ju.A., Il'ichjov E. Nanomechanicheskie rezonatory. Uspehi Fizicheskikh Nauk, 2012, t. 182, № 4, pp. 407–436.
- [7] Cantilever cooling with radio frequency circuits [Electronic resource] / D.J. Wineland, J. Britton, R.J. Epstein, D. Leibfried, R.B. Blakestad, K. Brown, J.D. Jost, C. Langer, R. Ozeri, S. Seidelin, J. Wesenberg. – Mode of access: <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0606180.pdf>.
- [8] Brown K.R. Passive Cooling of a Micromechanical Oscillator with a Resonant Electric Circuit / K.R. Brown, J. Britton, R.J. Epstein, J. Chiaverini, D. Leibfried, D.J. Wineland // Phys. Rev. Lett. – 2007. – V. 99. – article number 137205.
- [9] Grajcar M. Lower limit on the achievable temperature in resonator-based sideband cooling / M. Grajcar, S. Ashhab, J.R. Johansson, Franco Nori // Phys. Rev. B. – 2007. – V. 78, article number 035406.
- [10] Regal C.A. Measuring nanomechanical motion with a microwave cavity interferometer / C.A. Regal, J.D. Teufel, K.W. Lehnert // Nature Phys. – 2008. – v. 4. – p. 555.
- [11] Teufel J.D. Nanomechanical motion measured with an imprecision below that at the standard quantum limit / J.D. Teufel, T. Donner, M.A. Castellanos-Beltran, J.W. Harlow, K.W. Lehnert // Nature Nanotech. – 2009. – v. 4. – p. 820.
- [12] Hertzberg J.B. Back-action-evading measurements of nanomechanical motion / J.B. Hertzberg, T. Rocheleau, T. Ndukum, M. Savva, A.A. Clerk, K.C. Schwab // Nature Physics. – 2010. – v. 6. – p. 213.
- [13] Massel F. Microwave amplification with nanomechanical resonators / F. Massel, T.T. Heikkilä, J.-M. Pirkkalainen, S.U. Choi, H. Saloniemi, P.J. Hakonen, A. Sillanpää // Nature. – 2011, v. 480, p. 351.

Гринберг Яков Симеонович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры прикладной и теоретической физики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – квантовые явления в твердотельных тонкопленочных гибридных наноструктурах и метаматериалах. Имеет более 60 публикаций. E-mail: greenberg@online.nsk.su

Пейсахович Юрий Григорьевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей физики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – физика конденсированного вещества, распространение электромагнитных волн в тонкопленочных гетероструктурах. Имеет более 40 публикаций, в том числе две монографии. E-mail: yugp@rambler.ru

Штыгашев Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований – распространение электромагнитных волн в одномерных метаматериалах, математическое моделирование волновых процессов в тонкопленочных гетероструктурах. Имеет более 20 публикаций, в том числе 1 монографию. E-mail: shtygash@yandex.ru

Султанов Айдар Наильевич, магистрант факультета радиотехники и электроники Новосибирского государственного технического университета.

Ya.S. Greenberg, A.A. Shtygashov, Yu.G. Peisakhovich, A.N. Sultanov

Microwave nanoelectromechanical system: amplification of weak signals

The paper is devoted to the effect of the amplification of a weak signal by the nanoelectromechanical system which represents microwave strip resonator interacting by means of parametric capacitance with the low frequency nanomechanical oscillator. The input driving signal is a superposition of two signals with nearby frequencies ω_1 and ω_2 with the second signal being amplified. Nanomechanical resonator is being excited by the signal at the difference frequency $\omega_1 - \omega_2$ which is close to its resonance frequency ω_m . In this arrangement the damping of nanomechanical resonator is controlled by the position of the frequency of the input driving signal relative to the resonance frequency of microwave strip resonator. In the linear approximation to the displacement of the capacitance plate of the mechanical resonator we obtain the analytical expressions for the voltage output amplitude of the low frequency modulation signal which is caused by the influence of mechanical oscillator. The results obtained in the paper can be useful for the development of supersensitive devices based on nanomechanical resonators.

Key words: microwave resonator, nanomechanical oscillator, parametric resonance, amplification, hybrid circuit, effective damping, effective detuning, frequency modulation.