

УДК 621.38.3; 53.082.62

ДВУМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В МЭМС-СТРУКТУРАХ С НАНОЗАБОРОМ

© А. А. Соколов, С. Д. Иванов

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

Для создания микроэлектромеханических систем (МЭМС) большой удельной механической мощности используется система «подвижный электрод — нанометровый зазор — тонкая кристаллическая плёнка материала с большим значением диэлектрической проницаемости — неподвижный электрод». Показано, что в этой системе возникают двумерные электромеханические волны. Возникновение таких возбуждений ограничивает предельную удельную мощность электромеханических преобразователей-актуаторов, МЭМС-двигателей и генераторов. Однако это явление открывает широкие возможности применения подобных структур.

Ключевые слова: МЭМС, микробалка, пластина, двумерная система.

DOI: 10.15372/AUT20230303

Введение. В современной микроэлектронике наиболее интенсивно развивающимся сектором являются микроэлектромеханические системы (МЭМС). Эти системы большой удельной механической мощности могут применяться в актуаторах и микродвигателях, микронасосах для “lab on chip” и в топливных элементах, а также для преобразования механической энергии в электрическую [1–4]. В ряде работ предлагается для создания МЭМС большой удельной механической мощности использовать систему «подвижный электрод — нанометровый зазор — тонкая кристаллическая плёнка материала с большим значением диэлектрической проницаемости — неподвижный электрод» [1–3]. Описанная структура схематично изображена на рис. 1. Подвижный электрод (ПЭ) представляет собой металлическую пластину, опирающуюся на неровности диэлектрика. Прижим ПЭ осуществляется электростатическими силами. В данной работе проведён анализ основных закономерностей движения ПЭ.

Ключевым моментом изготовления МЭМС большой удельной мощности является создание тонкого межэлектродного зазора, в котором осуществляется перемещение ПЭ [2, 3]. В [2] была разработана технология создания нанометровых зазоров на большой площади (до 10^{-3} м²). Суть методики заключается в электростатическом прижатии свободной плёнки металла с высоким модулем Юнга (бронза, хром, никель) к поверхности сегнетоэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости ϵ , в частности ниобата—бария—стронция (НБС) ($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$).

Плёнки НБС обладают совершенной текстурой с ориентацией кристаллической оси C нормально к плоскости подложки. Введение в межэлектродный зазор материала с большим значением диэлектрической проницаемости даёт возможность увеличить электрическое поле в зазоре без возникновения пробоя.

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) и давления (до 10^6 – 10^8 Н/м²) [2]. Минимальная величина зазора d_z (см. рис. 1) зависит от величины приложенного напряжения V

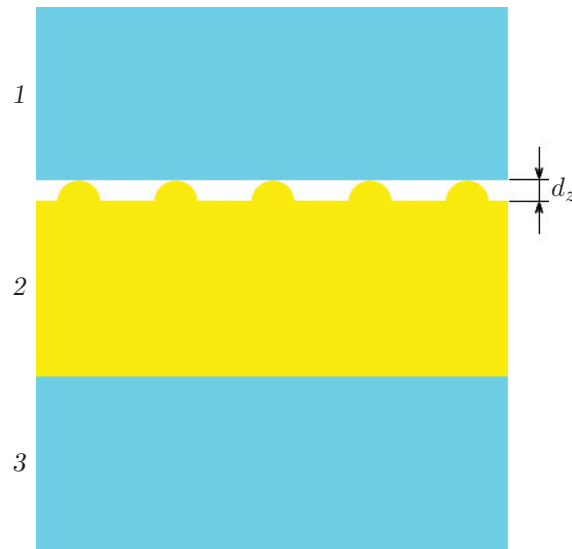


Рис. 1. Система «подвижный электрод — нанометровый зазор — тонкая кристаллическая плёнка материала с большим значением диэлектрической проницаемости — неподвижный электрод»: 1 — подвижный электрод (ПЭ), 2 — диэлектрик с высоким значением диэлектрической проницаемости ε (более 1000), 3 — неподвижный электрод, d_z — нанозазор между поверхностью диэлектрика и ПЭ

и ограничивается шероховатостью поверхности как диэлектрика, так и подвижного электрода, его материалом и толщиной. Величина d_z хорошо воспроизводима.

Высота микровыступов определялась с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа [2]. Установлено, что на площади 10^{-12} м² перепад высот микровыступов находится в пределах 5–150 нм, а число размещённых на этой площади микровыступов, к которым прижимается металлическая плёнка, составляет 100–200.

При электростатическом прижатии тонкой металлической плёнки к поверхности сегнетоэлектрика значительная часть энергии расходуется на упругую механическую деформацию плёнки металла [2]. Следует отметить, что с увеличением напряжения электростатического прижатия металлической плёнки к поверхности сегнетоэлектрика жёсткость элемента возрастает, этот факт установлен экспериментально [5].

Целью данной работы является описание колебаний в такой структуре и возникновения коллективных возбуждений, которые ограничивают мощность электромеханических преобразователей.

Модель. Покажем, как могут возникать колебания в структуре «подвижный электрод — нанометровый зазор — тонкая плёнка с большим значением диэлектрической проницаемости — неподвижный электрод», а также коллективные возбуждения.

Одномерный случай. Рассмотрим случай, когда зазор много меньше толщины как диэлектрика, так и подвижного электрода. У подвижного электрода, который много толще зазора, колеблется только нижняя часть. В одномерном случае

$$P(x, t) = kz + p'' \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2} + p^{IV} \frac{\partial^4 z(x, t)}{\partial x^4}. \quad (1)$$

Здесь $P(x, t)$ — сила, действующая на нижнюю часть подвижного электрода со стороны электрода.

Эта сила вместе с силой электростатического притяжения $F(z)$ создает ускорение \ddot{z} :

$$P(x, t) = \rho \ddot{z}(x, t) + F(z), \quad (2)$$

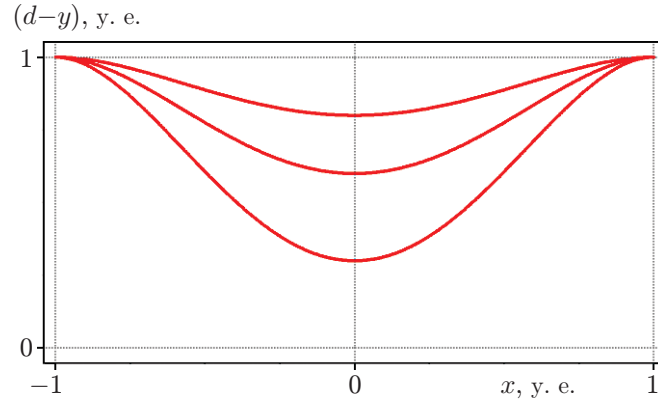


Рис. 2. Изгиб нижнего края подвижного электрода при увеличении напряжения.
Приближение «балка»

где ρ — эффективная линейная плотность движущейся (нижней) части электрода; ось x направлена параллельно плоскости структуры; $z(x, t)$ — положение нижней кромки ПЭ. Из симметрии членов с нечётными степенями производной по x нет.

В (1) первый член определяется сжатием подвижного электрода, а жёсткость k — модулем Юнга ПЭ. Второй — описывает влияние тангенциального натяжения, а третий — изгиб ПЭ как пластины.

В (2) для электростатического притяжения в приближении малого зазора [6]

$$F(z) = \frac{\varepsilon_0 V^2}{2(d_z + h/\varepsilon - z)^2}. \quad (3)$$

Здесь h — толщина диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости ε (см. рис. 1); d_z — зазор под подвижным электродом; V — приложенное к ПЭ напряжение. Объединив (1) и (2), получим

$$kz + p'' \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2} + p^{IV} \frac{\partial^4 z(x, t)}{\partial x^4} = \rho \ddot{z}(x, t) + \frac{\varepsilon_0 V^2}{2(d_z + h/\varepsilon - z(x, t))^2}. \quad (4)$$

В предельных случаях задача упрощается.

1. «Пружинная подвеска»: нижняя часть подвижного электрода упруго закреплена на верхней его части [6]:

$$kz = \rho \ddot{z}(x, t) + F(z). \quad (5)$$

2. «Изгибная балка»: силы изгиба в подвижном электроде преобладают:

$$kz + p^{IV} \frac{\partial^4 z(x, t)}{\partial x^4} = \rho \ddot{z}(x, t) + F(z). \quad (6)$$

На рис. 2 представлен изгиб нижнего края подвижного электрода при увеличении напряжения в приближении балка. Особенность в том, что нагрузка на балку по мере её прогиба возрастает.

3. «Натянутые струны»: глубокий профиль — подвижный электрод находится в растянутом состоянии между опорами. Это приближение работает тогда, когда d_z (см. рис. 1) сравнимо с расстоянием между выступами — глубокий профиль. Определим форму провисания лепестка между опорами: подобно уравнению цепной линии получим уравнение для

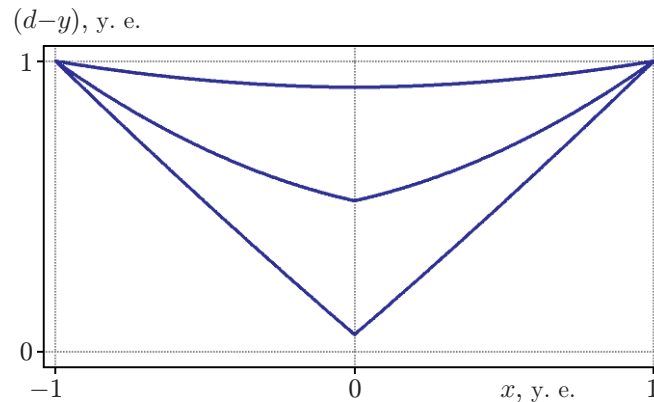


Рис. 3. Эволюция параболы в цепную линию и далее в кривую, похожую на конус Тэйлора при увеличении напряжения на подвижном электроде

нижней кромки подвижного электрода. Для струны (подвижного электрода, натянутого с силой T_0) в электрическом поле

$$\frac{z''}{\sqrt{1-z^2}} = F(z) = \frac{\varepsilon_0 V^2 S}{2(d_z + h/\varepsilon - z)^2 T_0}. \quad (7)$$

Для

$$d_z + h/\varepsilon \gg z \quad (8)$$

получаем уравнение цепной линии. Причём в нём T_0 зависит от формы опоры. Если дополнительно потребуем

$$z' \ll 1, \quad (9)$$

то уравнение становится линейным и его решением является парабола. На рис. 3 показана эволюция параболы в цепную линию и далее в кривую, похожую на конус Тэйлора [7] по мере увеличения электростатического притяжения. При выполнении условия (8) — парабола, при (9) — цепная линия, при большей прогибе — конус Тэйлора. Переход из балки в струну происходит, если d_z становится сравнимым с расстоянием между опорами.

Случай 1 описан в [6]. Здесь отдельные участки подвижного электрода не связаны между собой и бегущие волны не возникают.

Для случая 2 граничные условия над опорой $p'_l = p'_r$ — балка без излома. Бегущие волны обеспечиваются тем, что наклон балки над опорой изменяет граничные условия для соседних балок.

В случае 3 связь возникает через влияние натяжения струны на соседние струны, т. е. натяжение каждой струны зависит от натяжения соседних.

Обсуждение. В описанной структуре могут возникать бегущие волны (бронзоны), причём из-за нелинейностей, обусловленных особенностями статистического распределения микронеоднородностей, между этими возбуждениями существует взаимодействие. Возникновение подобных бегущих волн описано в [8] для упругой пластины, плавающей на свободной поверхности идеальной несжимаемой тяжёлой жидкости. Регулярная структура на поверхности диэлектрика — это частный случай. В структурах, описанных в [1–4], микронеоднородности распределены статистически. Это обеспечивает нелинейность в системе и взаимодействие электромеханических волн.

Заключение. В структуре «подвижный электрод — нанометровый зазор — тонкая кристаллическая плёнка материала с большим значением диэлектрической проницаемости — неподвижный электрод» могут существовать поверхностные электромеханические волны.

Эту особенность структуры с протяжённым нанозазором следует учитывать при разработке МЭМС-устройств на её основе, а также возможно создание специальных МЭМС-устройств, использующих электромеханические волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kostsov E. G.** Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectric Frequency Control: Special Issue on Nanoscale Ferroelectric. 2006. **53**, N 12. P. 2294–2299.
2. **Kostsov E. G.** Electromechanical energy conversion in the nanometer gaps // Proc. SPIE. 2008. **7025**. 70251G.
3. **Baginsky I. L., Kostsov E. G.** Nanometer gap in electromechanical converters — a way to achieve an extremely high energy density // Micromashines. 2019. **10**, N 11. P. 746.
4. **Багинский И. Л.** Предельная удельная мощность ёмкостных электростатических двигателей со структурой металл — тонкоплёночный сегнетоэлектрик // Автометрия. 2021. **57**, № 3. С. 85–91. DOI: 10.15372/AUT20210310.
5. **Косцов Э. Г., Скурлатов А. И., Щербаченко А. М.** Прецизионная оптико-электронная система определения перемещений подвижных элементов MEMS // Автометрия. 2018. **54**, N 4. С. 92–100. DOI: 10.15372/AUT20180412.
6. **Skrzypacz P., Wei D., Nurakhmetov D. et al.** Analysis of dynamic pull-in voltage and response time for a micro-electro-mechanical oscillator made of power-law materials // Nonlinear Dyn. 2021. **105**. P. 227–240. DOI: 10.1007/s11071-021-06653-3.
7. **Taylor G. I.** Disintegration of water drops in an electric field // Proc. Roy. 1964. **A280**, N 1382. P. 383–397. DOI: 10.1098/rspa.1964.0151.
8. **Алексеев В. В., Индейцев Д. А., Мочалова Ю. А.** Колебания упругой пластины, контактирующей со свободной поверхностью тяжёлой жидкости // ЖТФ. 2002. **72**, вып. 5. С. 16–21.

Поступила в редакцию 01.02.2023

После доработки 08.04.2023

Принята к публикации 26.04.2023