

УДК 004.942, 53.082

Моделирование поведения чувствительных элементов термоэлектромеханических преобразователей

С.А. Воронов, Д.В. Барышева, И.А. Киселев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Modeling of the behavior of sensing elements in thermo-electro-mechanical converters

S.A. Voronov, D.V. Barysheva, I.A. Kiselev

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.



e-mail: voronovsa@yahoo.com, darya.barysheva.bmstu@mail.ru, i.a.kiselev@yandex.ru

i Разработка термоэлектромеханических преобразователей (ТЭМП) является перспективной и актуальной задачей, поскольку применение устройств на основе этих приемников позволит создать новые системы безопасности и медицинские приборы, использующие проникающее ТГц-излучение для анализа состояния исследуемых объектов. Представлены разработанные методы математического моделирования поведения МЭМС ТЭМП, используемых для измерения излучения в терагерцовом диапазоне частот. Проектирование чувствительных элементов преобразователей ТГц-излучения требует применения новых методов анализа протекающих в них взаимосвязанных физических процессов. Разработаны модели поведения микроэлектромеханических чувствительных элементов, работающих на основе эффекта автоэлектронной эмиссии под воздействием стационарных тепловых и механических внешних полей. Представлено решение тестовой задачи в связанной мультифизической нелинейной постановке с учетом взаимного влияния тока автоэлектронной эмиссии и электростатических сил. Предложенный подход к моделированию задачи позволяет получить рабочие характеристики чувствительных элементов и оценить степень влияния на них нелинейных факторов и паразитных воздействий.

Ключевые слова: математическое моделирование, чувствительный элемент, МЭМС, ТГц-излучение, автоэлектронная эмиссия, связанные мультифизические задачи.

i The methods for modeling the behavior of thermo-electro-mechanical converters used for measuring radiation in the terahertz frequency range are developed. The design of such converters is very important for creating new security systems and medical devices using penetrating THz radiation for the analysis of the state of the objects under consideration. The development of sensing elements for THz-radiation converters requires the development of new methods for the analysis of coupled physical processes that are typical for them. The models of MEM sensing elements allowing for field emission effects and thermal and mechanical stationary external fields are proposed. A solution is obtained for a coupled multiphysics nonlinear problem taking into account the mutual influence of the field emission current and electrostatic forces. The proposed approach makes it possible to obtain the performance characteristics of sensing elements and estimate the influence of nonlinear factors and parasitic effects.

Keywords: modeling, sensor, terahertz radiation, field emission, coupled multiphysics problems.

Перспективным направлением является разработка чувствительного элемента (ЧЭ) микроэлектромеханического приемника [1] для измерения интенсивности ТГц-излучения, основанного на эффекте автоэлектронной эмиссии [2]. На базе таких приемников могут быть построены новые системы безопасности и медицинские приборы, использующие проникающее ТГц-излучение для анализа состава и внутреннего состояния исследуемых объектов. В этом случае особенно важно отсутствие ионизирующего воздействия (в отличие от рентгеновских лучей), способного нанести вред исследуемому объекту, например, телу человека. В процессе работы рассматриваемого приемника в его ЧЭ происходят взаимосвязанные процессы упругого деформирования, электростатического взаимодействия, протекания электрического тока (с сопутствующим тепловыделением), автоэлектронной эмиссии, а также изменения температуры под действием падающего ТГц-излучения. Проектирование такого типа ЧЭ требует разработки методов численного моделирования, учитывающих взаимосвязь перечисленных выше физических процессов для достижения наилучших рабочих характеристик устройства.

Расчет микроэлектромеханических устройств широко представлен в научной литературе [1–6]. Многие исследователи применяют для моделирования как программные комплексы широкого назначения, реализующие метод конечных элементов (ANSYS, ABAQUS), так и специально созданные для анализа МЭМС комплексы (NODAS, MEMSCAP, COMSOL). В работе [3] приведены результаты моделирования элемента Пельтье в термоэлектрической статической и динамической постановке с учетом закона Джоуля — Ленца, эффекта Пельтье, эффекта Томпсона и эффекта Зеебека, но без учета деформирования конструкции. В статье [4] рассмотрено моделирование динамических характеристик емкостного датчика ускорения в сильно связанной электро-механической постановке; получены значения собственных частот упругого элемента датчика с учетом и без учета напряжения питания устройства. В отличие от слабо связанной постановки, когда решение электрической и механической задачи проводится последовательно в рамках общего итерационного процесса, в сильно связанной постановке формируется общая система уравнений, учитывающая обе группы физических эффектов. В работе [5] для анализа оптической силы зеркал в условиях падающего лазерного излучения представлена модель микрзеркал в стационарной термоэлектрической постановке,

построенная средствами программного комплекса ABAQUS. Рассмотрено многовариантное моделирование с целью выбора оптимального сочетания используемых материалов конструкции и технологических параметров ее функционирования. Однако в литературе не описаны исследования, учитывающие действие эффекта автоэлектронной эмиссии в микроразмерных термоэлектромеханических преобразователях.

Цель работы — разработка методики математического моделирования ЧЭ термоэлектромеханических преобразователей (ТЭМП), основанных на принципе автоэлектронной эмиссии, и расчет рабочих характеристик примера конструкции такого ЧЭ.

Принципиальная схема ЧЭ ТЭМП консольной конструкции представлена на рис. 1. ЧЭ представляет собой биметаллическую балку, консольно закрепленную над поверхностью подложки. К основанию балки через дополнительное сопротивление (сопротивление нагрузки) R_n подведено напряжение питания U_n . Под свободным концом балки располагается вискер — малогабаритное (приблизительно в 100 раз меньше зазора) острие, создающее высокую напряженность электростатического поля ($\sim 10^7 \dots 10^8$ В/м), необходимую для протекания автоэлектронной эмиссии. К основанию вискера через подложку устройства подведен нулевой потенциал электрической схемы. Величина начального зазора Δ_0 подбирается исходя из условий обеспечения требуемого тока автоэлектронной эмиссии, который ограничивается, главным образом, тепловым режимом работы вискера. Выходное напряжение устройства U_e (совпадающее с напряжением эмиссии) снимают в точке соединения основания балки и дополнительного сопротивления.

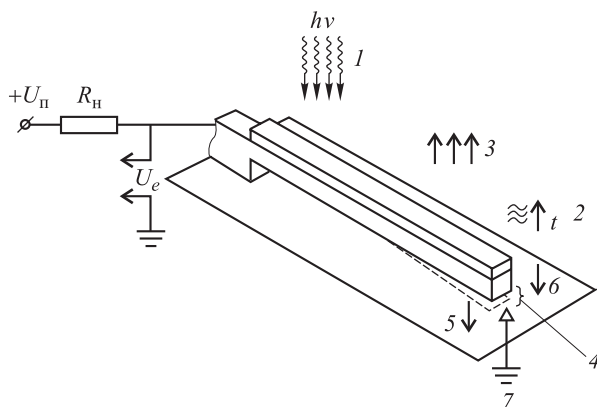


Рис. 1. Принципиальная схема ЧЭ:

- 1 — нагрев падающим излучением; 2 — нагрев протекающим током; 3 — поле ускорения; 4 — зазор;
- 5 — электростатическая сила притяжения к вискеру;
- 6 — ток автоэлектронной эмиссии; 7 — вискер

Многослойную конструкцию балки используют для регистрации интенсивности падающего на ЧЭ ТГц-излучения. Материал верхнего слоя ЧЭ должен обеспечивать эффективное поглощение падающего потока ТГц-излучения. Нагрев ЧЭ падающим ТГц-излучением обуславливает различное тепловое расширение его слоев из-за отличия коэффициентов линейного температурного расширения используемых материалов (никеля и алюминия) и, как следствие, к изгибу ЧЭ за счет биметаллического эффекта. Изгиб ЧЭ приводит к перемещению его свободного конца f и изменению зазора между свободным концом балки и вискером (рабочий зазор Δ), что вызывает изменение тока автоэлектронной эмиссии, описываемого соотношением [6]

$$i_e = K_i \frac{U_e^{3/2}}{\Delta^2}, \quad (1)$$

где i_e — ток автоэлектронной эмиссии, А; K_i — приведенный коэффициент тока эмиссии, $K_i = 5,4 \cdot 10^{-8} S_0 M^{1/2}$, А·м²·В^{2/3}; M — молекулярный вес заряженных частиц (электронов), а.е.м; S_0 — площадь поверхности эмиссионного слоя, м²; U_e — напряжение тока автоэлектронной эмиссии, В; Δ — рабочий зазор, $\Delta = \Delta_0 - f$, м; Δ_0 — начальный зазор, м; f — перемещение свободного конца балки, м.

Изменение тока автоэлектронной эмиссии обуславливает изменение выходного напряжения U_e устройства, которое может быть зарегистрировано внешней аппаратурой. Зависимость выходного напряжения от интенсивности падающего ТГц-излучения, определяемого температурой источника излучения, называют рабочей характеристикой устройства:

$$U_e = U_n - i_e(R_n + R_{чЭ}), \quad (2)$$

где U_n — напряжение питания, В; R_n — сопротивление нагрузки, Ом; $R_{чЭ}$ — сопротивление упругого (чувствительного) элемента, Ом.

На рабочую характеристику устройства могут оказывать влияние внутренние особенности, присущие конструкции ЧЭ, и внешние факторы, связанные с паразитными воздействиями. К внутренним особенностям относятся: 1 — нагрев ЧЭ протекающим током автоэлектронной эмиссии; 2 — действие электростатической силы на свободный конец балки (ЧЭ) со стороны вискера, обусловленное разностью их электрических потенциалов [7]:

$$F = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 U_e^2 S_f}{2\Delta^2}, \quad (3)$$

где F — электростатическая сила, Н; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость;

ϵ_0 — электрическая постоянная; S_f — площадь поверхностей, между которыми происходит электростатическое взаимодействие, м².

Перечисленные особенности обуславливают возникновение в системе механизмов положительной обратной связи. Допустим, за счет увеличения интенсивности падающего ТГц-излучения произошло уменьшение рабочего зазора, сопровождающееся ростом тока автоэлектронной эмиссии. Повышение тока эмиссии приводит к дополнительному нагреву ЧЭ, его дополнительному прогибу, и, следовательно, к дополнительному увеличению тока эмиссии. Аналогично для электростатической силы: уменьшение зазора приводит к увеличению электростатической силы притяжения между вискером и свободным концом балки, что вызывает дальнейшее уменьшение зазора. Однако в последнем случае описанный эффект частично компенсируется снижением напряжения эмиссии при росте тока эмиссии, вызванном уменьшением зазора.

Основным внешним паразитным воздействием для ЧЭ является действие поля ускорения, возникающее при работе устройства в условиях вибрации или ударного воздействия. Действие внешнего ускорения способно оказать существенное влияние на рабочую характеристику устройства, а также снизить его чувствительность. Для оценки влияния заданного уровня ускорения на показания прибора, а также для определения допустимого уровня ускорения необходимо учитывать действие сил инерции на ЧЭ в модели устройства.

Таким образом, параметры состояния ЧЭ (напряжение эмиссии, ток эмиссии, рабочий зазор, электростатическая сила) оказываются взаимосвязанными посредством соотношений (1)–(3), законов механики деформируемого твердого тела, теплопроводности и электропроводности, описывающих распределение поля электрического тока, поля температур ЧЭ, а также процесс его деформирования. Следовательно, анализ поведения ЧЭ при эксплуатационных режимах работы требует решения нелинейной мультидисциплинарной задачи.

В настоящей работе для решения поставленной задачи в квазистатической слабосвязанной нелинейной постановке предлагается использовать итерационный подход, объединяющий моделирование всех перечисленных выше особенностей, универсальный для различных типов ЧЭ и пригодный для моделирования поведения ЧЭ с различной геометрией. Общий алгоритм решения (рис. 2) представляет собой реализацию метода простой итерации. В качестве параме-

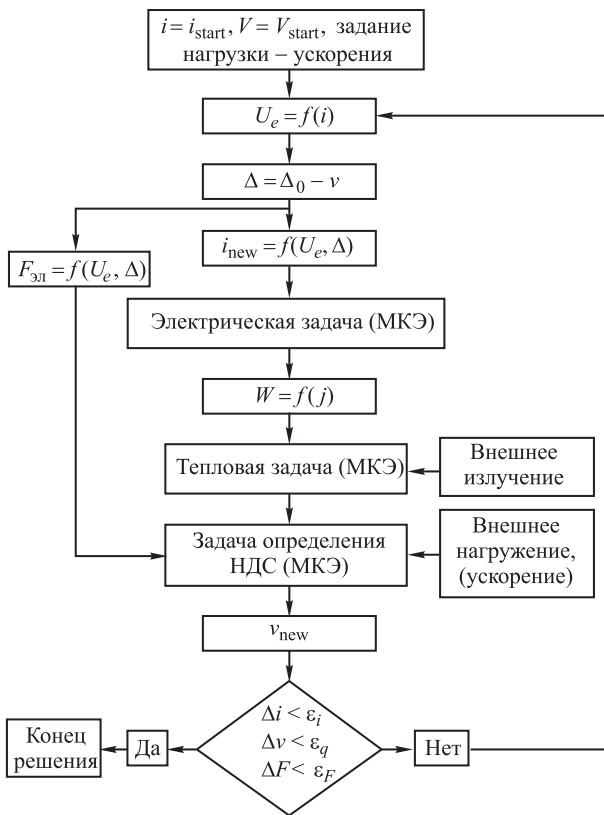


Рис. 2. Итерационный алгоритм решения электротермомеханической задачи

тров итерационного процесса являются следующие: ток эмиссии, прогиб балки над вискером и электростатическая сила. Алгоритм численного моделирования состоит из следующих основных этапов:

1) ввод исходных данных. Задание геометрических параметров ЧЭ, генерация конечно-элементной сетки; задание параметров используемых материалов; задание напряжения питания U_p , дополнительного электрического сопротивления R_H , начального значения зазора Δ_0 и тока автоэлектронной эмиссии (первое приближение) i_e ;

2) определение напряжения эмиссии U_e в соответствие с соотношением (2);

3) вычисление электростатической силы F , действующей на упругий элемент со стороны вискера за счет электрического поля в рабочем зазоре;

4) определение поля напряжений и распределения плотности тока j в теле ЧЭ. Для решения данной задачи применяется метод конечных элементов [8] с использованием трехмерных электромагнитных элементов SOLID231 программного комплекса ANSYS. Граничные условия задачи изображены на рис. 3;

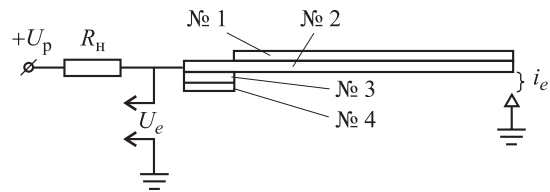


Рис. 3. Граничные условия электрической задачи

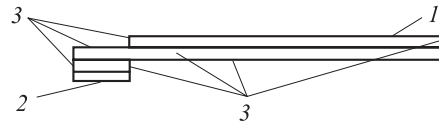


Рис. 4. Граничные условия температурной задачи:
1 — заданная плотность теплового потока;
2 — поверхность с заданной температурой (температура подложки); 3 — поверхности с адиабатическими граничными условиями

5) вычисление поля температуры в теле ЧЭ. Для решения этой задачи применяется метод конечных элементов с использованием трехмерных 20-узловых элементов SOLID90 программного комплекса ANSYS. Граничные условия на внешних поверхностях ЧЭ для температурной задачи представлены на рис. 4 [9]. На поверхности, поглощающей падающее излучение, задана плотность теплового потока, определяемая законом Стефана—Больцмана (4). Предполагается, что излучение исходит от диффузного плоского источника бесконечных размеров, таким образом обеспечивается параллельный равномерный падающий поток излучения, нормальный к поверхности ЧЭ:

$$q = \varepsilon \sigma_0 (T_n^4 - T_{чЭ}^4), \quad (4)$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²; ε — коэффициент излучения (степень черноты тела); σ_0 — постоянная Стефана—Больцмана, $\sigma_0 = 5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T_n — температура излучающей поверхности, К; $T_{чЭ}$ — температура поверхности ЧЭ, К;

Для каждого конечного элемента на основе расчета в п. 4 задана мощность теплового источника на единицу объема W , вызванного протеканием электрического тока, по закону Джоуля—Ленца [7]:

$$W = j^2 \rho, \quad (5)$$

где W — удельная мощность теплового источника, Вт/м³; j — плотность тока, А/м; ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом/м.

Для основания опоры ЧЭ в качестве граничного условия задана температура подложки. На

остальных поверхностях ЧЭ заданы адиабатические граничные условия (отсутствие теплового потока);

б) определение напряженно-деформированного состояния ЧЭ. Для решения данной задачи применяется метод конечных элементов с использованием трехмерного 20-узлового элемента SOLID186 в программном комплексе ANSYS. Заданы следующие граничные условия: перемещения основания опоры ЧЭ запрещены, температурные деформации определяются на основе расчета в п. 5, на свободный конец ЧЭ действует электростатическая сила (п. 3) по направлению к висцеру. При наличии поля ускорения к телу ЧЭ прикладываются силы инерции в соответствии с принципом Д'Аламбера. Таким образом определяется величина прогиба свободного конца балки и новое значение рабочего зазора $\Delta = \Delta_0 - f$;

7) подстановка нового значения рабочего зазора, определенного в п. 6, в соотношение (1) с целью вычисления нового приближения для значения тока автоэлектронной эмиссии;

8) проверка условия сходимости по прогибу, току эмиссии и электростатической силе. Относительная погрешность k -го приближения контролируемого параметра (ток эмиссии, зазор и электростатическая сила) не должна превышать заданного допуска ϵ :

$$2 \left| \frac{i_{\Delta k+1} - i_{\Delta k}}{i_{\Delta k+1} + i_{\Delta k}} \right| \leq \epsilon_i; \quad 2 \left| \frac{\Delta_{k+1} - \Delta_k}{\Delta_{k+1} + \Delta_k} \right| \leq \epsilon_g;$$

$$2 \left| \frac{F_{k+1} - F_k}{F_{k+1} + F_k} \right| \leq \epsilon_F.$$

Если условие сходимости не выполнено, то требуется осуществить переход к п. 2 алгоритма.

Для того чтобы обеспечить численную устойчивость итерационного процесса требуется назначить ограничение на допустимое изменение за итерацию одного или нескольких параметров итерационного процесса. Установлено, что в большинстве практически значимых случаев достаточно ограничить допустимое изменение напряжения эмиссии (п. 2) на итерации значением $U_{e \max} = 0,01 U_{\Pi}$.

Рассмотренная численная модель позволяет рассчитать рабочие характеристики различных термоэлектромеханических ЧЭ с помощью блочно-модульной структуры и использования в ряде блоков метода конечных элементов. При переходе к новым моделям ЧЭ необходимо только заменить блок, отвечающий за создание конечно-элементной сетки.

В качестве примера рассмотрим расчет ЧЭ балочного типа, предназначенного для реги-

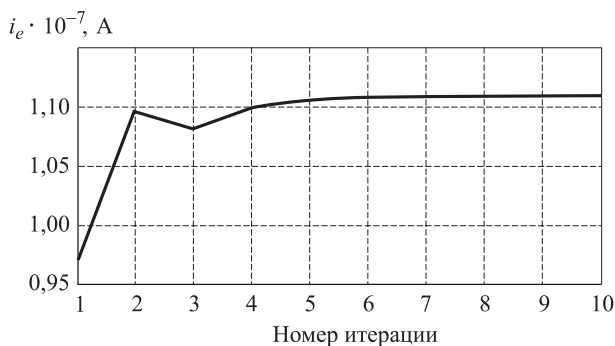


Рис. 5. Сходимость итерационного процесса по току эмиссии при $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $U_{\Pi} = 10 \text{ В}$, $S_f = 40 \text{ мкм}^2$

страции теплового излучения. Параметры конструкции и исходные данные приведены ниже. Нумерация слоев балки показана на рис. 3. Предполагается, что источник излучения удовлетворяет требованиям п. 5 алгоритма. Сходимость итерационного процесса изображена на примере тока автоэлектронной эмиссии (рис. 5).

Результаты расчета для средних значений напряжений питания и площади поверхности электростатического взаимодействия из ряда значений, указанных в таблице, представлены на рис. 6. Приведенное на рисунке значение температуры представляет собой разность между температурой источника и температурой ЧЭ в недеформированном состоянии до включения источника излучения, которая была принята равной $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Зависимость выходного напряжения представлена для четырех случаев: без учета нагрева протекающим током и действия электростатической силы, с учетом только нагрева протекающим током, с учетом только действия электростатической силы и с учетом обоих эффектов. Сравнение этих четырех зависимостей позволяет сделать вывод о том, что в отличие от электростатической силы, нагрев протекающим током не оказывает существенного влияния на рабочую характеристику устройства.

Рабочие характеристики устройства при изменении значения напряжения питания показаны на рис. 7. Чувствительность устройства определяется углом наклона касательной к рабочей характеристике в каждой ее точке. На рисунке видно, что средняя чувствительность в выбранном диапазоне температур возрастает (при $U_{\Pi} = 5 \text{ В}$ средний коэффициент чувствительности $K = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ В}/^\circ\text{C}$, при $U_{\Pi} = 30 \text{ В}$ — $K = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ В}/^\circ\text{C}$) с повышением напряжения питания (увеличивается изменение выходного напряжения при изменении температуры источника от 0 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$).

Исходные данные для расчета консольной конструкции

Параметр	Значение			
	1-й слой	2-й слой	3-й слой	4-й слой
Материал	Алюминий	Никель	Медь	Никель
Толщина, $\cdot 10^{-6}$, м	1	1	0,5	0,5
Модуль упругости, $\cdot 10^{11}$, Па	2,02	0,71	1,2	2,02
Коэффициент Пуассона	0,3	0,32	0,35	0,3
Плотность, кг/м ³	8 900	2 700	8 950	8 900
Коэффициент линейного температурного расширения, $\cdot 10^{-6}$, K ⁻¹	14,3	23,8	17,7	14,3
Теплопроводность, Вт/(м·К)	90	237	400	90
Теплоемкость, Дж/К	450	900	385	450
Электрическое сопротивление, 10^{-5} , Ом·м	8,7	2,71	1,75	8,7
Длина балки, м	$200 \cdot 10^{-6}$			
Ширина балки, м	$3 \cdot 10^{-6}$			
Длина опоры, м	$20 \cdot 10^{-6}$			
Температура спаивания, °С	0			
Температура источника, °С	0–100			
Коэффициент черноты	1			
Температура отвода (подложки), °С	0			
Начальная температура конструкции, °С	0			
Сопротивление нагрузки, МОм	20			
Напряжение питания, В	5, 10, 20, 30			
Среднее значение напряжения питания, В	10			
Площадь поверхности электростатического взаимодействия, 10^{-12} , м ²	1, 10, 20, 60			
Среднее значение площади поверхности электростатического взаимодействия, м ²	$10 \cdot 10^{-12}$			
Коэффициент тока эмиссии	$3 \cdot 10^{-21}$			
Относительная диэлектрическая проницаемость	1			
Точность итерационного уточнения	10^{-3}			

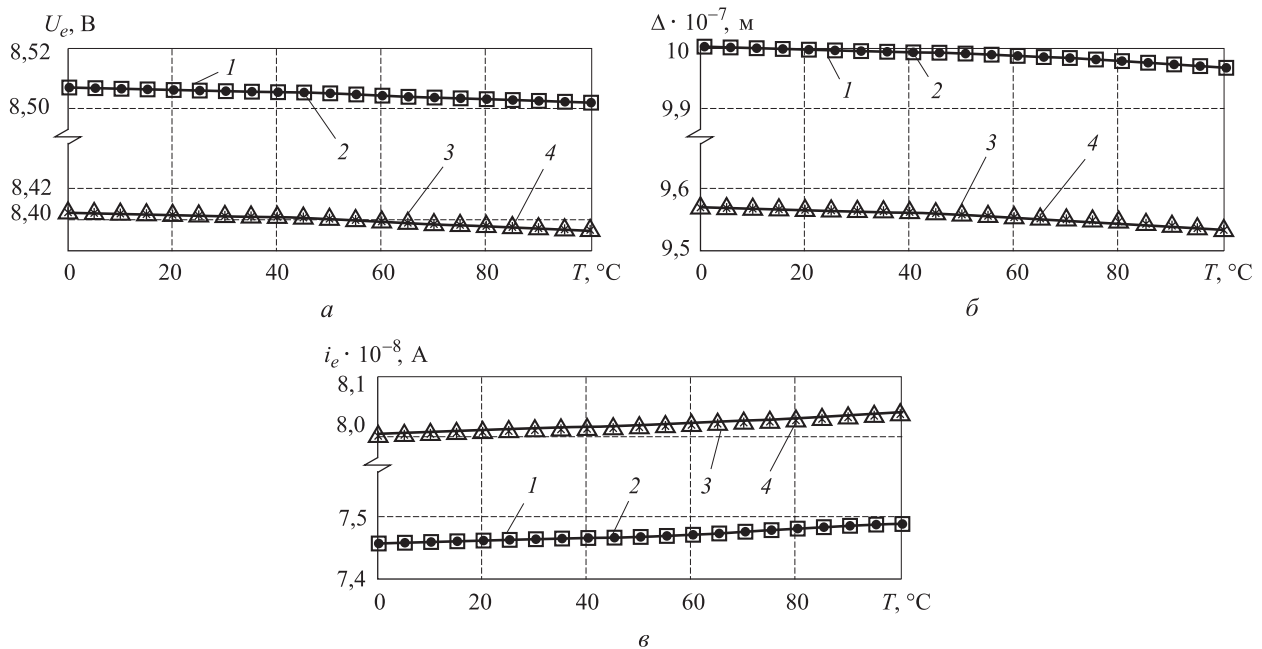


Рис. 6. Зависимости напряжения эмиссии (а), рабочего зазора (б) и тока эмиссии (в) от температуры источника излучения:

1 — с учетом нагрева протекающим током и без учета действия электростатической силы и нагрева протекающим током; 2 — без учета действия электростатической силы и нагрева протекающим током; 3 — с учетом действия электростатической силы и без учета нагрева протекающим током; 4 — с учетом действия электростатической силы и нагрева протекающим током

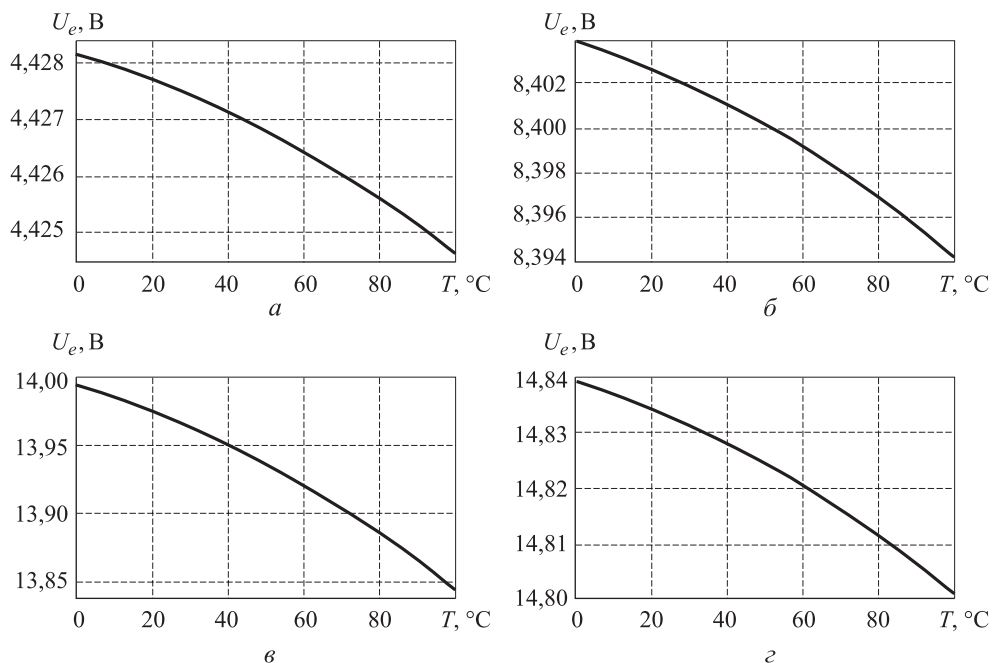


Рис. 7. Зависимость напряжения эмиссии от температуры источника излучения при различных значениях напряжения питания:

a — $U_n = 5$ В; *б* — $U_n = 10$ В; *в* — $U_n = 20$ В; *г* — $U_n = 30$ В

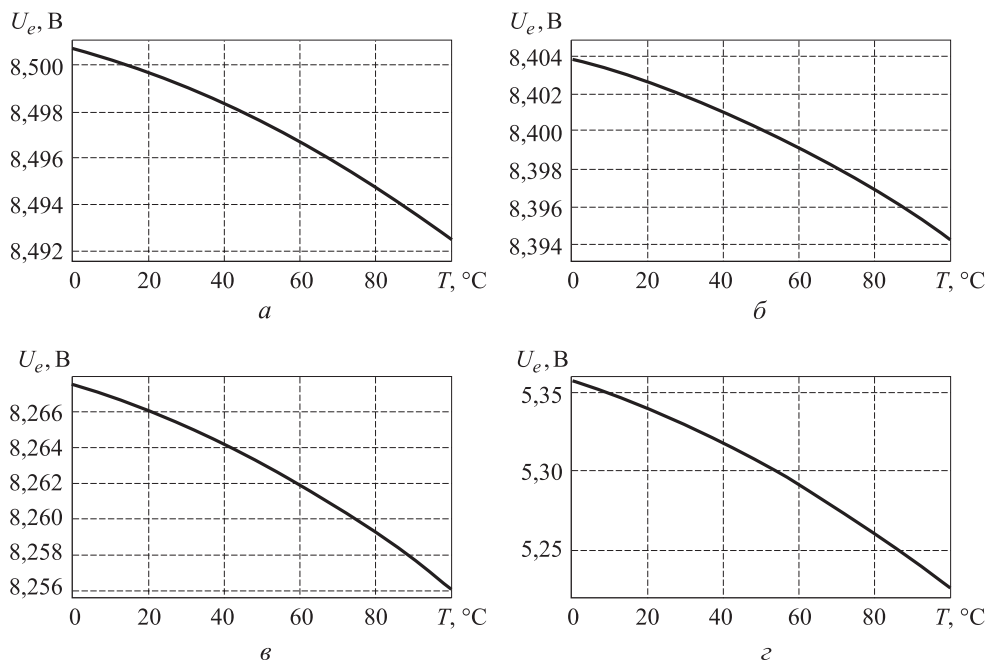


Рис. 8. Зависимости напряжения эмиссии от температуры источника излучения при различных размерах площади поверхности электростатического взаимодействия:

a — $S_f = 1$ мкм²; *б* — $S_f = 10$ мкм²; *в* — $S_f = 20$ мкм²; *г* — $S_f = 60$ мкм²

Рабочие характеристики устройства при среднем уровне напряжения питания и различных размерах площади поверхности электростатического взаимодействия приведены на рис. 8. Полученные результаты показывают, что увеличение электростатической силы приводит к повышению чувствительности устройства (при

$S_f = 1$ мкм² средний коэффициент чувствительности $K = 7,5 \cdot 10^{-5}$ В/°С, при $S_f = 60$ мкм² — $K = 1,26 \cdot 10^{-3}$ В/°С).

Зависимость выходного напряжения устройства от ускорения в направлении, указанном на рис. 1, представлена на рис. 9. Расчет проводился в статической постановке, однако полу-

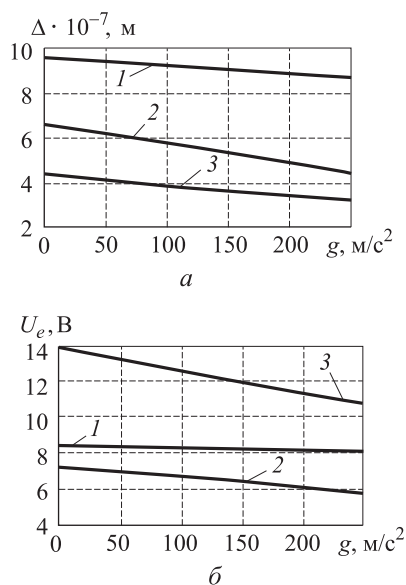


Рис. 9. Зависимость зазора (а) и напряжения эмиссии (б) от ускорения:

1 — $U_{п} = 10$ В, $S_f = 10$ мкм²; 2 — $U_{п} = 10$ В, $S_f = 50$ мкм²;
3 — $U_{п} = 30$ В, $S_f = 10$ мкм²

ченные результаты могут быть использованы и для оценки амплитуды колебаний выходного напряжения устройства при работе в условиях вибрационного воздействия, поскольку ожидаемая верхняя частота его спектра (<1 000 Гц) существенно ниже первой резонансной частоты ЧЭ (> 40 000 Гц для выбранной конструкции). Результаты расчета показывают, что изменение выходного напряжения устройства за счет нагрева источника излучения на 100 °С (см. рис. 6), являющегося полным диапазоном работы устройства, может быть достигнуто за счет действия внешнего ускорения, приблизительно равного 20g (см. рис. 9). Таким образом, важной задачей является обеспечение надлежащей виброзащиты регистрирующих устройств, основанных на описанном в статье принципе действия.

Следует отметить, что в случае превышения некоторого критического уровня ускорения за счет действия положительной обратной связи, обусловленной электростатической силой, ЧЭ

полностью притягивается к висцеру (полностью выбирается зазор), что приводит к многократному возрастанию тока эмиссии и разрушению вискера. Критический уровень ускорения позволяет оценить предельно допустимый уровень ударного воздействия на регистрирующий прибор в процессе его работы. При меньшем уровне ударного ускорения прибор сохранит работоспособность, хотя в выходной сигнал будут внесены существенные искажения во время удара.

Выводы

1. Разработана математическая модель ЧЭ микроразмерного приемника ТГц-излучения, включающая совместное решение термоэлектромеханической задачи в слабо связанной постановке. Модель учитывает: нелинейную зависимость электростатической силы от зазора и напряжения эмиссии; нелинейную зависимость тока эмиссии от напряжения эмиссии и рабочего зазора; влияние температурных деформаций при протекании рабочего тока через упругий элемент; действие внешних нагрузок (тепловых и механических).

2. На примере ЧЭ балочного типа выявлено существенное влияние внешних низкочастотных вибраций на выходное напряжение устройства, что свидетельствует о необходимости применения систем виброзащиты для рассматриваемых приемников излучения.

3. Проведенные расчеты показывают, что повышение рабочего напряжения и увеличение площади поверхности электростатического взаимодействия повышают чувствительность прибора.

4. Установлено, что при рассмотренных параметрах и режимах работы устройства температурные деформации, вызванные протекающим электрическим током, оказывают слабое влияние на рабочую характеристику устройства и в дальнейшем могут не рассматриваться при моделировании динамики ЧЭ, что продемонстрировано на рис. 6.

Литература

- [1] Yun-Shik Lee. *Principles of Terahertz Science and Technology*. Springer, 2009. 340 p.
- [2] Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А., Ачильдиев В.М., Бедро Н.А., Воронин И.В., Седова А.Д. Наноэлектромеханический преобразователь с автоэлектронной эмиссией — новый приемник длинноволнового оптического излучения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, № 12, с. 49–56.
- [3] Antonova E.E., Looman D.C. Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS. *ICT 2005 24th International Conference on Thermoelectrics*, 2005, pp. 215–218.
- [4] Gyimesi M., Ostergaard D., Electro-Mechanical Transducer for MEMS in ANSYS. *Proc. 1999 Int. Conf. Modeling/Simulation Microsystems*, 1999, vol. 7, pp. 270–273.

- [5] Zhang J., Lee Y.C., Tuantranont A., Bright V.M. Thermal analysis of micromirrors for high-energy applications. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2003, vol. 26(3), pp. 310–317.
- [6] Ачильдиев В.М. Бесплатформенные инерциальные блоки на основе микромеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения. Москва, ГОУ ВПО МГУИ, 2007. 223 с.
- [7] Матвеев А.Н. *Электричество и магнетизм*. Москва, ОНИКС 21 век, Мир и Образование, 2005. 464 с.
- [8] Zienkiewicz O.Z., Taylor R.L. *The Finite element method. Vol. 1: The basis*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 690 p.
- [9] Брюханов О.Н., Шевченко С.Н. *Тепломассообмен*. Москва, АСВ, 2005. 460 с.

References

- [1] Yun-Shik Lee. *Principles of Terahertz Science and Technology*. Springer, 2009. 340 p.
- [2] Gruzevich Iu.K., Soldatenkov V.A., Achil'diev V.M., Bedro N.A., Voronin I.V., Sedova A.D. Naneoлектромеханический преобразователь с автотронной эмиссией — новый приемник длинноволнового оптического излучения [Nano electromechanical transducer FED — new receiver longwave optical radiation]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering]. 2012, no. 12, pp. 49–56.
- [3] Antonova E.E., Looman D.C. Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS. *ICT 2005 24th International Conference on Thermoelectrics*, 2005, pp. 215–218.
- [4] Gyimesi M., Ostergaard D. Electro-mechanical capacitor element for MEMs analysis in ANSYS. *Proc. Modeling and Simulation of Microsystems*, 1999, vol. 7, pp. 270–273.
- [5] Zhang J., Lee Y.C., Tuantranont A., Bright V.M. Thermal analysis of micromirrors for high-energy applications. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2003, vol. 26(3), pp. 310–317.
- [6] Achil'diev V.M. *Besplatformennye inertial'nye bloki na osnove mikromekhanicheskikh datchikov uglovoi skorosti i lineinogo uskoreniia* [Strap down inertial blocks based on micromechanical angular rate sensors and linear acceleration]. Moscow, MSFU publ., 2007. 223 p.
- [7] Matveev A.N. *Elektrichestvo i magnetizm* [Electricity and Magnetism]. Moscow, ONIKS 21 vek, Mir i Obrazovanie publ., 2005. 464 p.
- [8] Zienkiewicz O.Z., Taylor R.L. *The Finite element method. Vol. 1: The basis*. Oxford, Butterworth-Heinemann publ., 2000. 690 p.
- [9] Briukhanov O.N., Shevchenko S.N. *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, ASV publ., 2005. 460 p.

Статья поступила в редакцию 03.04.2014

Информация об авторах

ВОРОНОВ Сергей Александрович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика», директор НИИ АПП МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: voronovsa@yahoo.com).

БАРЫШЕВА Дарья Валерьевна (Москва) — аспирант, ассистент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: darya.barysheva.bmstu@mail.ru).

КИСЕЛЕВ Игорь Алексеевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: i.a.kiselev@yandex.ru).

Information about the authors

VORONOV Sergey Aleksandrovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Applied Mechanics» Department, Director of Research Institute «Production Process Automation». Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: voronovsa@yahoo.com).

BARYSHEVA Dar'ya Valer'evna (Moscow) — Post-Graduate, Assistant of «Applied Mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: darya.barysheva.bmstu@mail.ru).

KISELEV Igor' Alekseevich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Applied Mechanics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: i.a.kiselev@yandex.ru).