

МИКРО- И НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNOLOGY

УДК 621.38.049.77

Модель теплообмена тепловыделяющих элементов микрзеркальных МЭМС

В.К. Самойликов, С.П. Тимошенко, С.С. Евстафьев

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Some Features of Heat Exchange in Micro System Elements

V.K. Samoylikov, S.P. Timoshenkov, S.S. Evstafev

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Показана возможность использования закономерностей макроscopic (классической) термогидродинамики и определены ее пространственно-временные ограничения при моделировании теплообмена микронных тепловыделяющих элементов микрзеркальных микроэлектромеханических систем (МЭМС) различной геометрии. Основными задачами моделирования являются определение эксплуатационных характеристик микрзеркальных МЭМС и пути оптимизации этих показателей. Приведен пример практической апробации модели теплообмена тепловыделяющего элемента термомеханического актюатора, входящего в состав микрзеркальной МЭМС. Результаты моделирования подтверждены адекватностью экспериментальным исследованиям.

Ключевые слова: МЭМС; термогидродинамика; теплообмен; термомеханический актюатор; моделирование; методы расчета.

The possibility of using the macroscopic laws of (classical) thermohydrodynamics and its space-time limitations in modeling heat transfer from micron-sized MEMS micromirror elements of different geometry has been discussed. The main objectives of the modeling is to determine the performance of MEMS micromirror and the direction of ways to optimize these parameters. An example of practical testing of heat transfer model of thermo-mechanical actuator, which is a part of the micromirror MEMS, has been provided. The modelling results have been justified by the adequacy with the experimental testing.

Keywords: MEMS; thermohydrodynamics; heat transfer; thermomechanical actuator; modeling; calculation methods.

Введение. Стремительному развитию микроэлектромеханических систем (МЭМС) способствуют хорошо освоенная технология изготовления интегральных схем (ИС) и большая потребность в малогабаритных и энергоэффективных устройствах различного функционального назначения. Именно технология микроэлектроники позволяет реализовать множество элементов, которые невозможно изготовить на основе макротехнологий.

Характерные размеры большинства элементов МЭМС, которые можно оценить отношением объема элемента V к ограничивающей его поверхности F ($L_x \cong V/F$), находятся в пределах 0,5 – 100 мкм и существенно отличаются от характерных размеров макросистем.

Управляющие воздействия на активную структуру элемента или узла сопровождаются, как правило, тепловыделениями, требующими последующего рассеяния. В тех случаях, когда тепловыделение происходит в относительно медленных (равновесных) условиях, успешно могут быть использованы известные физические закономерности макромира. Однако рост быстродействия активных структур приводит к уменьшению их размеров, что может изменить характер теплообмена, смещая его в сторону от равновесия. Поэтому фактор «характерного размера» становится все более значимым при переходе к микро- и наноразмерам.

Методики и средства прямых измерений физических состояний активных структур, изменяющихся в процессе теплообмена, становятся трудно реализуемыми, что существенно усложняет разработку и изготовление более эффективных МЭМС. Поэтому приоритет отдается косвенным методикам исследования, а также методам математического и физического моделирования. Моделирование позволяет определять эксплуатационные характеристики МЭМС, находить оптимальные конструктивные соотношения, не прибегая к прямым измерениям, которые своим вмешательством могут исказить физическую картину.

Таким образом, разработка методов и средств исследования и проектирования МЭМС с интегральными тепловыми преобразователями является актуальной задачей.

Обоснование выбора метода исследования. Теоретическая база работы теплофизических МЭМС основана на явлениях переноса и законах сохранения энергии, массы, импульса и законах равновесной термодинамики. Законы сохранения и переноса в телах различной природы – газах, конденсированных телах и плазме – могут быть описаны и исследованы с позиций феноменологического (макроскопического) и статистического (микроскопического) методов. Как первый, так и второй методы имеют свои преимущества и недостатки. Макроскопический метод проверен в многочисленных исследованиях, а также при разработках и создании различных тепловых устройств, агрегатов и машин, поэтому его применение не вызывает сомнения.

Пространственные масштабы в классической термогидродинамике. При макроскопическом описании переноса тепла в газовой среде предполагается, что макроскопические свойства систем (с характерным размером L_x) достаточно медленно изменяются вдоль систем на масштабах, значительно превышающих среднюю длину свободного пробега молекул газа Λ , т.е. в случаях, когда $L_x \gg \Lambda$. Так, в классической термогидродинамике размерные (масштабные) эффекты, обусловленные в основном плотностью носителей (молекул или атомов) в единице объема, могут быть оценены числом Кнудсена ($Kn = \Lambda/L_x$). Численное значение числа Кнудсена определяет характер среды и связанные с ним интенсивности теплообмена (рис.1).

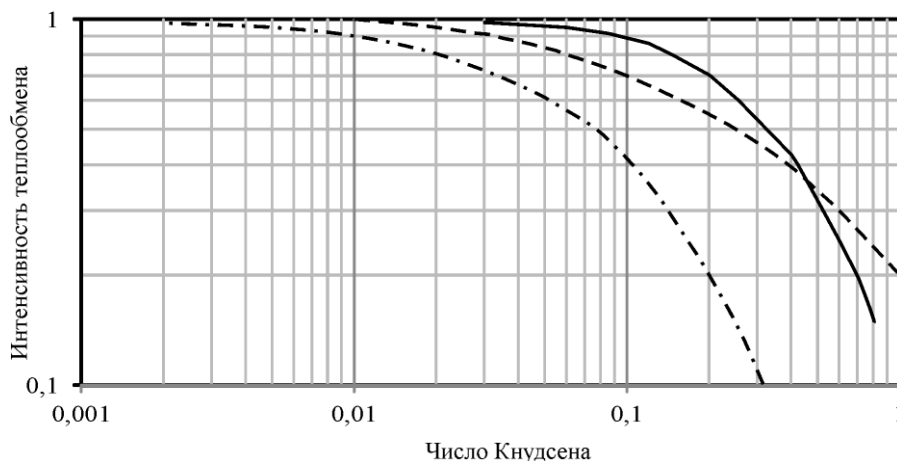


Рис. 1. Изменение интенсивности теплообмена в среде воздуха в зависимости от характерного размера тела L_x (пространственного масштаба): — тонкая проволока [1]; - · - микроканал [2]; - - - неподвижный газ между пластинами [3]

Как видно из рис. 1, в диапазоне $0,001 < Kn \leq 0,01$ до верхней границы сплошной среды ($Kn \cong 0,01$) интенсивность теплообмена практически не изменяется, в то время как при $Kn \cong 0,1$ интенсивность теплообмена начинает снижаться, особенно это становится заметным при течении в микроканалах.

Уменьшение характерного размера тела L_x , омываемого газовым потоком, приводит к росту значения числа Кнудсена и снижению интенсивности теплообмена, что свойственно потокам пониженного давления. Так, например, при течении воздуха ($\Lambda \cong 60$ нм при нормальных условиях) классическим закономерностям будут отвечать устройства с характерным размером $L_x \geq 6$ мкм.

При характерных размерах, находящихся в пределах $60 \text{ нм} \leq L_x \leq 6 \text{ мкм}$, течение переходит в режим течения со скольжением, при котором в уравнения сплошности необходимо вводить корректировку [1–3].

В условиях течения со скольжением безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта) может быть вычислен из следующего выражения [3]:

$$Nu = 1 / \left(\frac{1}{Nu^0} + \varphi \frac{Kn}{Pr} \right),$$

где Nu^0 – число Нуссельта, характеризующее теплообмен без скольжения; $\varphi \cong 2...3$ – коэффициент, учитывающий величину температурного скачка, свойства газа и материала (определяется экспериментально).

Временные масштабы при теплообмене теплопроводностью. Одной из важнейших эксплуатационных характеристик теплофизических МЭМС является постоянная времени, определяемая динамикой нагрева и охлаждения тепловыделяющих (активных) элементов МЭМС. Поэтому представляет интерес оценка временного масштаба при периодическом нагреве (охлаждении) этих элементов. Если активная структура периодически нагревается тепловым потоком с периодом нагрева τ_0 , то характер изменения температурного поля зависит от величины τ_0 и будет определяться соотношением периода нагрева и времени термализации τ_T (характерного временного масштаба теплопроводности) [4]. В условиях, когда $\tau_0 \gg \tau_T$, система успевает перейти к равновес-

ному состоянию и «отслеживает» изменения периодичности нагрева. В противном случае тело не успевает отслеживать вариации нагрева и воспринимает изменение теплового потока только в среднем.

Таким образом, при условии, когда $\tau_0 \leq \tau_T$ временные масштабы становятся критичными к выбору классического механизма переноса тепла. Для дальнейшего анализа возможности использования классического механизма переноса тепла от активных элементов МЭМС проведем оценку времени термализации. Усредненное время термализации сплошной среды, например молекул воздуха, при нормальных условиях $\tau_T \cong 10^{-9}$ с [5].

Для оценки временных масштабов в условиях отсутствия макроскопического движения используется коэффициент температуропроводности, или коэффициент термической диффузии газа

$$a = \frac{\lambda}{\rho c},$$

где λ – коэффициент теплопроводности газа; ρ – плотность газа; c – удельная теплоемкость газа.

За характерное время термализации, т.е. за время установления термодинамического равновесия $\tau_x = \tau_T \sim \frac{L_x^2}{a} \tau_T$, тепловое возмущение распространится на расстояние

$$L_T \sim \sqrt{a\tau_T}.$$

Проведем оценку временного масштаба $\tau_x = \tau_T$ для классических закономерностей (условия сплошности) и классических закономерностей с учетом эффекта скольжения. В среде воздуха при нормальных условиях $a = 21,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

При нормальных условиях сплошной среды (отсутствия эффекта скольжения, $L_x \geq 600$ нм) $\tau_x \approx 2 \cdot 10^{-6} \geq \tau_T \approx 10^{-9}$ с. В условиях с учетом эффекта скольжения $10^{-11} \leq \tau_x = \tau_T \leq 10^{-9}$ с.

Так как характерные времена (на 3-5 порядков) больше времени термализации, для построения теоретической базы для разработки модели теплообмена тепловыделяющих элементов микрзеркальных МЭМС могут применяться классические закономерности. Отметим, что при отклонениях от указанных временных ограничений могут быть использованы решения уравнения Больцмана для носителей энергии, учитывающего конечную скорость распространения тепловых возмущений:

$$\tau_p \frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \vec{q} = -\lambda \nabla t, \quad (1)$$

где \vec{q} – вектор плотности теплового потока; ∇t – градиент температуры.

Уравнение (1) характеризует распространение тепловых возмущений с конечной скоростью $v_p \sim \sqrt{\frac{a}{\tau_p}}$. Отсюда

$$\tau_p \sim \frac{a}{v_p^2}.$$

Скорость распространения тепловых возмущений в теле может быть определена из уравнения распространения температурной волны в полугораниченном массиве [5]:

$$v_p \sim \sqrt{\frac{a}{z}},$$

где z – продолжительность полного периода колебаний температуры.

Временные масштабы в процессах конвективного теплообмена. В неподвижной среде и в условиях, близких к термодинамическому равновесию, определяемому температурой в каждом конкретном месте тела, перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности. При наличии видимого движения среды (жидкостей, газов) к переносу энергии теплопроводностью добавляется конвективный перенос, обусловленный перемещением масс среды.

Удельный поток конвективного переноса тепла без учета энергии возможных превращений определяется произведением удельного потока массы $\rho \vec{w}$ на суммарную энергию единичной массы среды [5]:

$$\vec{q}_k = \rho \vec{w}(cT + H),$$

где $\rho \vec{w}$ – энергия давления; cT – тепловая энергия; H – энтальпия единичной массы среды.

При взаимодействии потока с обтекаемым телом носители энергии обмениваются не только с частицами среды, но и с частицами тела.

Заменим путь переноса энергии по направлению нормали к поверхности тела, на котором осуществляется перепад температуры ($T_F - T_\infty$), пограничным слоем толщиной δ , состоящим из n элементарных слоев с равномерным перепадом температуры в каждом элементарном слое. Тогда можно записать

$$\frac{T_i - T_{i+1}}{\bar{l}} = \frac{T_F - T_\infty}{\delta},$$

где \bar{l} – толщина элементарного слоя; T_F – температура поверхности.

Величина δ может рассматриваться как некоторый неизвестный пространственный масштаб, на котором определяется равновесная температура.

Допуская прямолинейный характер изменения температуры в пограничном слое (рис.2), запишем выражение для удельного потока переноса энергии к стенке:

$$q_F = \frac{\lambda}{\delta}(T_F - T_\infty) = \alpha(T_F - T_\infty),$$

где $\frac{\lambda}{\delta} = \alpha$ – коэффициент теплоотдачи тела с окружающей средой, отражающий эквивалентный перенос тепла теплопроводностью на пути перепада $T_F - T_\infty$.

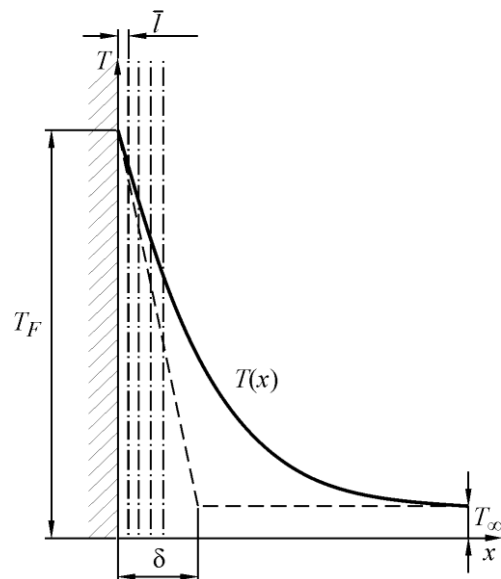


Рис.2. Схема методики определения переноса энергии в среде на границе с поверхностью тела

Полученное выражение отвечает известному закону Ньютона – Рихмана для определения теплоотдачи тел в окружающей среде.

Для определения характерного временного масштаба нагрева или охлаждения тела объемом V и площадью поверхности F в процессе конвективного теплообмена необходимо рассмотреть уравнение теплового баланса:

$$\rho c V \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha F (T_F - T_\infty).$$

Предположив, что тело при охлаждении остается изотермичным (число $Bi \ll 1$), получим следующее выражение для оценки характерного временного масштаба конвективного теплообмена:

$$\tau_k \sim \frac{\rho c V}{\alpha F} = \frac{\rho c}{\alpha} L_x. \quad (2)$$

Преобразуем уравнение (2):

$$\tau_k = \frac{\rho c}{\alpha} L_x \frac{\lambda L_x}{\lambda L_x} = \frac{L_x^2}{a} \frac{1}{Nu} = \frac{\tau_T}{Nu}, \quad (3)$$

где $Nu = \frac{\alpha}{L_x} \lambda$ – число Нуссельта, характеризующее интенсивность конвективного теплообмена.

Из уравнения (3) следует, что увеличение числа Нуссельта, которое повышается также с уменьшением L_x , приводит к снижению постоянной времени и улучшает динамические характеристики активного элемента и всей МЭМС в целом. В практическом приложении (для тепловых устройств микросистемной техники) представляет интерес теплоотдача естественной конвекцией линейных источников (термоактюаторов), нагреваемых проходящим током.

Из уравнения (3) видно, что время термализации в условиях конвективного теплообмена τ_k прямо пропорционально времени термализации τ_T процесса переноса тепла теплопроводностью и обратно пропорционально числу Нуссельта.

Оценим время термализации конвективного переноса тепла с учетом зависимостей, представленных на рис.3. Минимальное значение числа Нуссельта $Nu = 0,22$ имеет место при числе Рэлея $Ra = 10^{-5}$. Этому значению числа $Ra = Gr \cdot Pr$ соответствует пространственный масштаб (характерный размер) $L_x = 3$ мкм. Полученным значениям Nu и L_x при температуре перегрева (термоактюатора) $\Delta T = 100$ °С и коэффициенту теплоотдачи $\alpha = 2600$ Вт/м²·К соответствует временной масштаб $\tau_k \sim 10^{-6}$ с.

Сопоставим полученное значение времени термализации с временем термализации переноса тепла теплопроводностью тела с таким же характерным размером ($L_x = 3$ мкм). Из сравнения значений видно, что $\tau_k > \tau_T$. Это означает, что конвективный перенос тепла осуществляется в квазиравновесных условиях. Следовательно, уравнения классической термогидродинамики могут быть использованы при расчетах теплообмена тел микронных размеров.

Практическая апробация изложенной методики анализа теплообмена теплофизических МЭМС проведена при исследовании эксплуатационных характеристик микрозеркального элемента, приводимого в движение термомеханическим актюатором [7, 8].

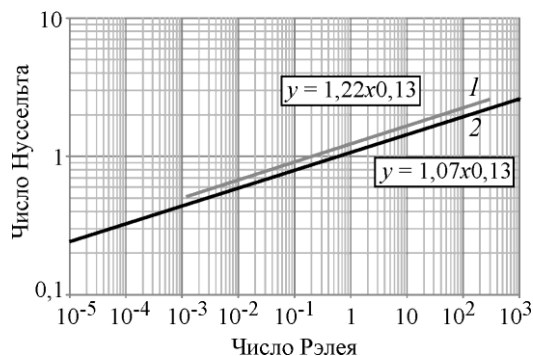


Рис.3. Теплоотдача при естественной конвекции от горизонтальных микропроволочных нагревателей: 1 – работа [6]; 2 – работа [1]

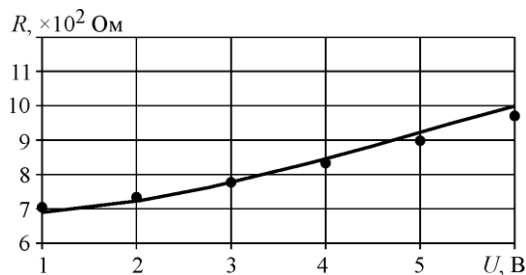


Рис.4. Результаты расчета по модели (сплошная линия) и опытные данные (точки) исследования зависимости сопротивления зеркального элемента от управляющего воздействия сигнала

На рис.4 и 5 представлены основные результаты исследования статических и динамических характеристик микрзеркальной МЭМС. Методика исследования базировалась на измерении электрического сопротивления нагревательного элемента, являющегося функцией температуры и определяемого управляющим напряжением. Более подробно методики исследования приведены в работах [7, 8].

Анализ зависимостей, представленных на рис.4 и 5, показывает хорошую адекватность результатов моделирования и экспериментов. Это свидетельствует о правомерности использования модельных представлений, базирующихся на макрофизических закономерностях теплообмена, для расчета и проектирования тепловых узлов и элементов теплофизических МЭМС.

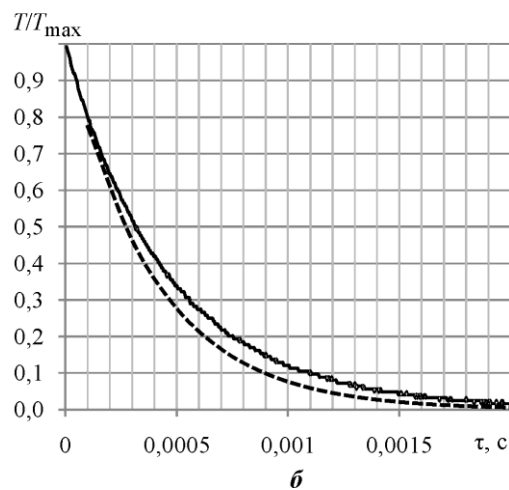
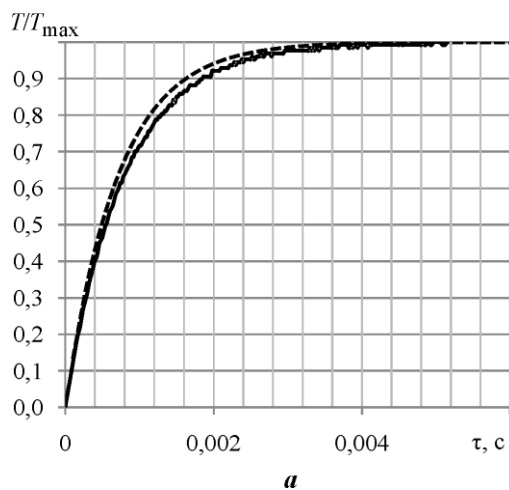


Рис.5. Результаты расчета по модели (пунктирная линия) и опытные данные (сплошная линия) исследования динамики нагрева (а) и охлаждения (б) микрзеркального элемента

Выводы. Установлено, что классические закономерности теплообмена могут быть использованы для тел с характерным размером $L_x \geq 6$ мкм. Для тел с характерным размером $60 \text{ нм} \leq L_x \leq 6$ мкм необходимо вводить поправку на эффект скольжения. В условиях периодического нагрева (охлаждения) тепловыделяющих элементов время нагрева (охлаждения) должно значительно превышать время термализации ($\sim 10^{-9}$ с).

Проведенные исследования эксплуатационных характеристик микрозеркальной МЭМС подтвердили правомерность использования модельных представлений, базирующихся на классических закономерностях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (договор № 02.G25.31.0200 от 27.04.2016 г., соглашение № 14.575.21.0069, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0069).

Литература

1. *Kurdyumov V. N., Lifian A.* Free convection from a point source of heat, and heattransfer from spheres at small Grashof numbers // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1999. – Vol. 42. – P. 3849–3860.
2. *Mohammad H. S., Arman S., Belmiloudi A.* Heat transfer - mathematical modelling, numerical methods and information technology. – InTech, 2011. – 654 p.
3. *Болгарский А. В., Мухачев Г. А., Щукин В. К.* Термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с.
4. *Дмитриев А. С.* Тепловые процессы в наноструктурах. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 302 с.
5. *Шорин С. Н.* Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1966. – 490 с.
6. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
7. Расчет и экспериментальное исследование температурной зависимости угла отклонения элемента микрозеркала / *С.П. Тимошенко, С.С. Евстафьев, И.М. Бритков и др.* // Изв. вузов. Электроника. – 2014. – № 3(107). – С. 43–49.
8. Распределение температуры по длине термомеханического актюатора / *С.П. Тимошенко, В.К. Самойликов, С.С. Евстафьев и др.* // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 4. – С. 397–404.

Статья поступила
20 января 2016 г.

Самойликов Вячеслав Константинович – доктор технических наук, профессор кафедры микроэлектроники (МЭ) МИЭТ. *Область научных интересов:* теория и практика теплообмена в технологических процессах, теплообмен в элементах и устройствах микросистемотехники, термоэлектрические преобразователи и генераторы, гидрогазодинамика в плазмохимических процессах и оборудовании.

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой МЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка конструкций и технологий изготовления малогабаритных преобразователей линейного ускорения (микроакселерометров), угловой скорости (микрогироскопов), инклинометров, микроповоротных зеркал, систем позиционирования и элементов навигационных блоков, блоков инерциальной информации на основе кремниевых чувствительных элементов.

Евстафьев Сергей Сергеевич – инженер кафедры МЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* тепловые микроактюаторы, микрозеркальные оптические системы.
E-mail: madcatse@gmail.com