

Моделирование частотных характеристик оптомеханических тепловых микросенсоров

А.Г. Козлов

Омский государственный технический университет, agk252@mail.ru

Аннотация — Представлен аналитический метод для определения частотной характеристики оптомеханических тепловых микросенсоров. Рассмотрено три типа микросенсоров: микросенсор с двумя опорными балками в соседних углах платы; микросенсор с двумя опорными балками в противоположных углах платы; микросенсор с четырьмя опорными балками. Принимая во внимание особенности каждого типа микросенсоров, в их структурах выделены области моделирования. Области моделирования разделены на зоны с однородными параметрами. Для каждой зоны получено нестационарное уравнение теплопроводности, которое решается с использованием преобразования Фурье и метода собственных функций. Плотности тепловых потоков между зонами определены из сопряженных граничных условий в частотной области. Получены аналитические выражения для частотных характеристик каждого типа микросенсоров. Метод использован для определения частотной характеристики, частоты среза и постоянной времени для рассматриваемых трех типов оптомеханических тепловых микросенсоров. Для микросенсора с двумя опорными балочными мостами в соседних углах платы определены зависимости чувствительности и постоянной времени от длины участка би-материала балочного моста и толщины слоя алюминия участка би-материала.

Ключевые слова — оптомеханический тепловой микросенсор, распределение температуры, частотная характеристика, преобразование Фурье, метод собственных функций, частота среза, постоянная времени.

I. ВВЕДЕНИЕ

Оптомеханические тепловые микросенсоры представляют собой новый тип тепловых микросенсоров. Их разработка и исследование начались двадцать лет назад и продолжают интенсивно в настоящее время. Работа данных микросенсоров основана на следующих принципах:

- использование биметаллического эффекта в опорных мостовых консолях для перемещения микроплат;
- использование оптического считывания для определения величины перемещения микроплат;
- использование MEMS структур для повышения температурной чувствительности биметаллических элементов.

Указанные принципы позволяют исключить электрическую часть из преобразования измеряемой величины в выходной сигнал и, соответственно, уменьшить влияние электромагнитных эффектов на характеристики микросенсора. Оптомеханические тепловые микросенсоры в виде биметаллических консолей впервые были использованы в качестве химических сенсоров для измерения концентрации вещества по количеству тепла, выделяемому в химических реакциях [1]. Они были также применены для измерения ИК-излучения в качестве ИК-детекторов [2-4], или в качестве элементов сканирующих тепловых матриц изображения [5].

До настоящего времени остается открытым вопрос о динамических характеристиках оптомеханических тепловых микросенсоров. В настоящее время исследования в этой области только начинаются [6, 7]. Динамические характеристики зависят от трех подсистем микросенсора: тепловой, механической и оптической. В большинстве практических случаев, достаточно знать частотные характеристики микросенсора для определения его динамических характеристик. Для оптомеханического теплового микросенсора частотная характеристика может быть представлена следующим образом

$$S_{\omega} = S_{\omega}^{(th)} S_{\omega}^{(mec)} S_{\omega}^{(op)}, \quad (1)$$

где S_{ω} - частотная характеристика микросенсора; $S_{\omega}^{(th)}$, $S_{\omega}^{(mec)}$, $S_{\omega}^{(op)}$ - частотные характеристики тепловой, механической и оптической подсистем микросенсора, соответственно. В данных микросенсорах тепловые процессы имеют значительную инерционность по сравнению с оптическими и механическими процессами, поэтому частотная характеристика микросенсоров определяется в основном его тепловой подсистемой. Для нахождения частотной характеристики тепловой подсистемы необходимо учитывать нестационарные тепловые процессы в оптомеханических тепловых микросенсорах. В связи с этим, целью данной работы является разработка метода моделирования частотных характеристик оптомеханических тепловых микросенсоров на основе рассмотрения нестационарных тепловых процессов в их структуре.

II. МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оптомеханические тепловые микросенсоры относятся к тепловым микросенсорам и изготовлены с использованием поверхностной микрообработки. Основными элементами данных микросенсоров являются [8]:

- 1) плата с поглощающим слоем, где происходит преобразование мощности оптического излучения в тепловую энергию;
- 2) балки, поддерживающие плату над основанием;
- 3) участки биматериалов, которые являются частью балок и индуцируют прогиб пластины в результате биметаллического эффекта.

Рассматриваемые оптомеханические тепловые микросенсоры представлены на рис. 1.

Чтобы найти распределение температуры в структуре оптомеханического теплового микросенсора, а затем определить его частотные характеристики, будет использоваться аналитический метод, предложенный специально для этих целей и учитывающий особенности тепловых микросенсоров [9]. Этот метод был адаптирован в [10] для рассмотрения нестационарных тепловых процессов в тепловых микросенсорах. Алгоритм метода для нестационарного случая имеет следующую последовательность шагов.

1. Теплоизолированная структура (плата и поддерживающие балочные консольные мосты) микросенсора делится на прямоугольные области, в зависимости от состава слоев и теплогенерирующих условий. Каждая зона заменяется эквивалентной зоной с однородными параметрами: эквивалентными толщиной, теплопроводностью, удельный объемной теплоемкостью и температуропроводностью. Значения толщины и теплопроводности для эквивалентной области j определяются следующим образом:

$$d_e^{(j)} = \sum_{i=1}^n k_i^{(j)} d_i^{(j)} ; \quad (2)$$

$$\lambda_e^{(j)} = \left(\sum_{i=1}^n k_i^{(j)} d_i^{(j)} \lambda_i^{(j)} \right) / d_e^{(j)} , \quad (3)$$

где $d_i^{(j)}$ - толщина слоя i в зоне j , n - число слоев в зоне j , $k_i^{(j)}$ - коэффициент, равный отношению общей площади слоя i в зоне j к общей площади этой зоны, $\lambda_i^{(j)}$ - коэффициент теплопроводности слоя i в зоне j . Удельная объемная теплоемкость определяется следующим образом

$$(\rho c)_e^{(j)} = \left(\sum_{i=1}^n k_i^{(j)} d_i^{(j)} \rho_i^{(j)} c_i^{(j)} \right) / d_e^{(j)} , \quad (4)$$

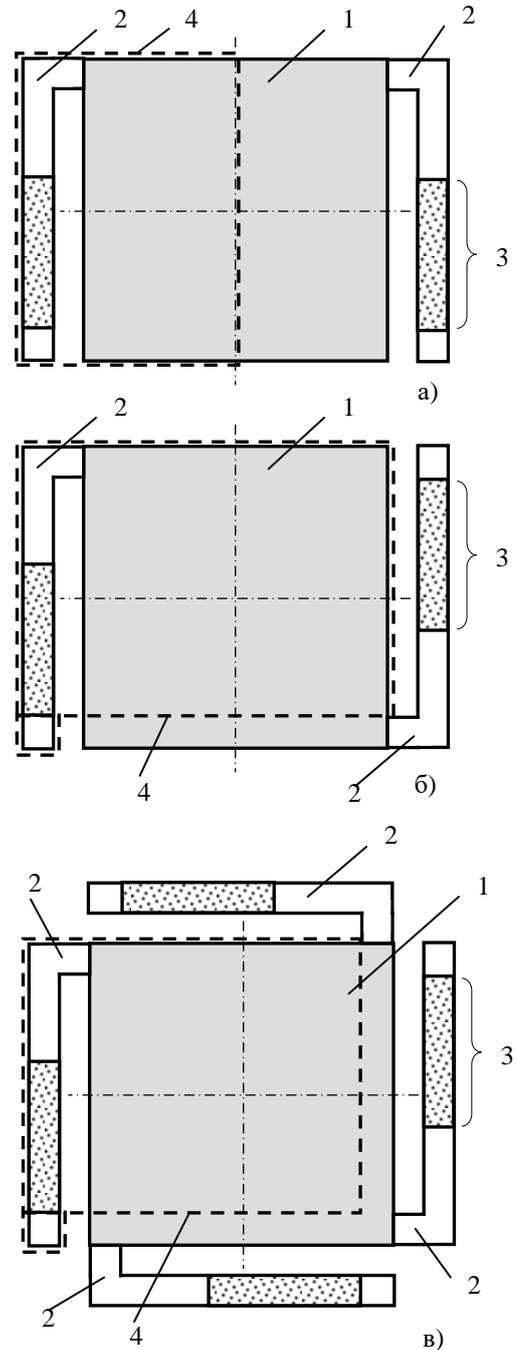


Рис. 1. Оптомеханические тепловые микросенсоры на основе прямоугольных плат, поддерживаемых (а) двумя балками в соседних углах, (б) двумя балками в противоположных углах, (в) четырьмя балками: 1 – плата; 2 – поддерживающая балка; 3 – участок балки с би-материалом; 4 – область моделирования

где $\rho_i^{(j)}$, $c_i^{(j)}$ - плотность и удельная теплоемкость слоя i в зоне j , соответственно.

Разделение структуры рассматриваемых оптомеханических тепловых микросенсоров на зоны имеет следующую особенность. Чтобы уменьшить объем вычислений в структуре каждого микросенсора выделена область моделирования (рис. 1). Размер этой области определяется симметрией структуры микросенсора (зеркальная симметрия или осевая симметрия). Затем области моделирования разделяются на зоны (рис. 2). Как видно из представленных данных на рис. 2, области моделирования для всех типов микросенсоров имеют одинаковую форму. Однако разделение на зоны участков плат, входящих в область моделирования, различно из-за особенностей структуры каждого микросенсора.

2. Для каждой зоны определяются условия теплообмена с окружающей средой посредством теплопередачи через газовую среду и радиационного теплообмена, а также с соседними областями и подложкой путем теплопроводности и начальные условия.

Основными путями теплообмена для каждой зоны являются передача тепла через окружающую атмосферу и радиационный перенос от нижней и верхней поверхностей и перенос тепла путем теплопроводности через границы с соседними зонами и подложкой. Детальный анализ данных путей теплообмена в зонах позволяет определить потери тепла. Суммарную мощность потерь тепла от верхней и нижней поверхности зоны j , нормированную на единицу ее площади ($N_t^{(j)}$), можно представить в следующем виде при условии, что разность между температурой зоны j (T_j) и температура окружающей среды (T_{en}) мала ($T_j - T_{en} \ll T_{en}$)

$$N_t^{(j)} = A_j(T_j - T_{en}), \quad (5)$$

где

$$A_j = h_c + \frac{\lambda_a}{d_1^{(j)}} + 4\sigma(\varepsilon_1^{(j)} + \varepsilon_u^{(j)})T_{en}^3; \quad (6)$$

h_c - коэффициент конвекции для данной структуры теплового микросенсора; λ_a - коэффициент теплопроводности окружающего воздуха, $d_1^{(j)}$ - расстояние между нижней поверхностью области j и поверхностью подложки; σ - постоянная Стефана-Больцмана, $\varepsilon_1^{(j)}$ и $\varepsilon_u^{(j)}$ - излучательные способности нижней и верхней поверхностей зоны j , соответственно. Первое слагаемое в уравнении (6) определяет перенос тепла от верхней поверхности зоны за счет конвекции. Второй член устанавливает отвод тепла от нижней поверхности области j за счет теплопроводности через воздушный зазор между этой поверхностью и поверхностью подложки. Третий член

определяет рассеивание тепла от верхней и нижней поверхностей зоны j излучением.

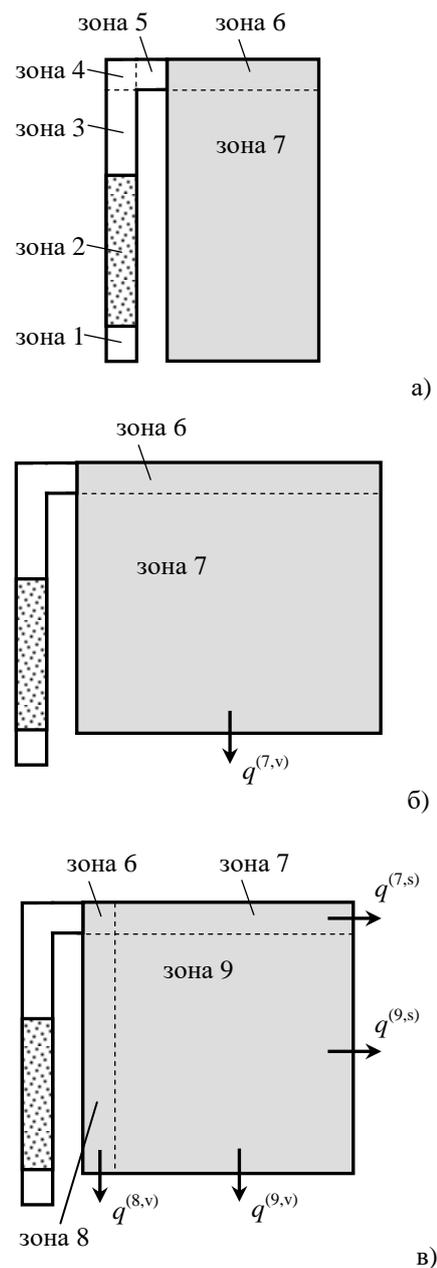


Рис. 2. Разделение области моделирования на зоны для микросенсоров на основе прямоугольных плат, поддерживаемых (а) двумя балками в соседних углах, (б) двумя балками в противоположных углах, (в) четырьмя балками; разделение балки на зоны в вариантах (б) и (в) аналогично варианту (а)

Условия теплообмена для каждой зоны с соседними зонами и подложкой определяются граничными условиями. Этот вопрос был подробно рассмотрен в [9], где в зависимости от комбинации граничных условий были выделены типы зон.

Начальное условие для каждой области определяет распределение температуры в начальный момент времени. В большинстве практических случаев, начальные условия для зон могут быть представлены следующим образом

$$T_j|_{t=0} = T_{\text{en}}. \quad (7)$$

3. Для каждой зоны определяется нестационарное дифференциальное уравнение теплопроводности, которое совместно с граничными условиями и начальным условием модифицируется с использованием преобразования Фурье, чтобы исключить временную переменную. Преобразованное уравнение решается методом собственных функций. Его решение представлено с помощью собственных функций в частотной области. Плотности тепловых потоков между зонами, включенные в решение, представляются в виде суммы ортогональных функций с неизвестными весовыми коэффициентами.

Общий вид нестационарного теплового дифференциального уравнения для регионов может быть представлен следующим образом

$$\frac{\partial T'_j}{\partial t} = a_e^{(j)} \frac{\partial^2 T'_j}{\partial x_j^2} + a_e^{(j)} \frac{\partial^2 T'_j}{\partial y_j^2} - p_j^2 T'_j - \varphi_j, \quad (8)$$

где

$$T'_j = T_j - T_{\text{en}}, \quad (9)$$

$$a_e^{(j)} = \lambda_e^{(j)} / (c\rho)_e^{(j)}, \quad (10)$$

$$p_j^2 = (A_j / d_e^{(j)} (c\rho)_e^{(j)}), \quad (11)$$

$$\varphi_j = -q_j / d_e^{(j)} (c\rho)_e^{(j)}, \quad (12)$$

q_j - генерируемая падающим излучением тепловая мощность на единицу площади зоны j .

Поскольку зоны имеют различные граничные условия, решение уравнения (8) для различных зон будут отличаться. В структуре оптомеханических тепловых микросенсоров большинство зон не имеют границ с подложкой, поэтому рассматривать решение уравнения (8) будем на примере зоны, у которой на всех границах имеются граничные условия 2 рода. Используя преобразования Фурье, нестационарное уравнение теплопроводности (8) с начальным условием (7) преобразуется в следующую форму

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}'_j}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}'_j}{\partial y_j^2} - \left(\frac{p_j^2 + j\omega}{a_e^{(j)}} \right) T'_j = \frac{\tilde{\varphi}_j}{a_e^{(j)}}, \quad (13)$$

где

$$\tilde{T}'_j = \int_{-\infty}^{\infty} T'_j \exp(-j\omega t) dt; \quad (14)$$

$$\tilde{\varphi}_j = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j \exp(-j\omega t) dt. \quad (15)$$

По аналогии со стационарным случаем [9], решение уравнения (13) проводится методом собственных функций. Выражение для распределения температуры в зонах с граничными условиями 2 рода в частотной области можно представить следующим образом

$$\begin{aligned} \tilde{T}'_j = & \tilde{\varphi}_j (p_j^2 + j\omega)^{-1} + a_e^{(j)} \tilde{D}_{0,0}^{(j)} [l_j b_j \lambda_e^{(j)} (p_j^2 + j\omega)]^{-1} + \\ & (2/l_j b_j \lambda_e^{(j)}) \sum_{k=1}^{\infty} \tilde{D}_{k,0}^{(j)} \left\{ (k\pi/l_j)^2 + (p_j^2 + j\omega)/a_e^{(j)} \right\}^{-1} \\ & \cos(k\pi x_j/l_j) + (2/l_j b_j \lambda_e^{(j)}) \sum_{m=1}^{\infty} \tilde{D}_{0,m}^{(j)} \left\{ (m\pi/b_j)^2 + \right. \\ & \left. [(p_j^2 + j\omega)/a_e^{(j)}]^{-1} \cos(m\pi y_j/b_j) + \right. \\ & \left. (4/l_j b_j \lambda_e^{(j)}) \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \tilde{D}_{k,m}^{(j)} \left\{ (k\pi/l_j)^2 + (m\pi/b_j)^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. [(p_j^2 + j\omega)/a_e^{(j)}]^{-1} \cos(k\pi x_j/l_j) \cos(m\pi y_j/b_j) \right\}^{-1}, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{D}_{k,m}^{(j)} = & -(-1)^k \kappa^{(j,s)} \tilde{\delta}_m^{(j,s)} - (-1)^m \kappa^{(j,t)} \tilde{\delta}_k^{(j,t)} + \\ & \kappa^{(j,u)} \tilde{\delta}_m^{(j,u)} + \kappa^{(j,v)} \tilde{\delta}_k^{(j,v)}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\kappa^{(j,s)} = d_e^{(j)} / d_e^{(s)}. \quad (18)$$

В выражениях (16, 17), неизвестными величинами являются весовые коэффициенты, $\tilde{\delta}_m^{(j,s)}$, $\tilde{\delta}_k^{(j,t)}$, $\tilde{\delta}_m^{(j,u)}$ и $\tilde{\delta}_k^{(j,v)}$.

4. Неизвестные весовые коэффициенты определяются с использованием граничных условий сопряжения в частотной области. Определение неизвестных весовых коэффициентов выполняется способом, аналогичным способу для стационарного случая [9]. Отличие нестационарного случая заключается в зависимости неизвестных весовых коэффициентов от частоты. Для того чтобы найти неизвестные весовые коэффициенты, необходимо рассмотреть равенства температуры на всех границах между зонами. Из этого рассмотрения можно получить обобщенную систему линейных уравнений, которую удобно записать в матричном представлении

$$\tilde{M}\tilde{A} = \tilde{\Phi}, \quad (19)$$

где \tilde{M} блочная матрица коэффициентов, \tilde{A} и $\tilde{\Phi}$ - блочные векторы весовых коэффициентов и правых частей, соответственно.

Для того, чтобы определить значения неизвестных весовых коэффициентов в частотной области, решение системы (19) должно проводиться для каждого значения частоты.

5. Выполняется обратное преобразование Фурье по времени. В большинстве практических случаев это преобразование требуется только для определения распределения температуры в зонах с поглощающим слоем и зоне с участком из би-материала. Для определения частотной характеристики такого преобразования не требуется. Частотная характеристика оптомеханических тепловых микросенсоров определяется как

$$S_{\omega} = \frac{\tilde{z}}{\tilde{P}}, \quad (20)$$

где \tilde{z} - вертикальное отклонение пластины в частотной области, \tilde{P} - входная мощность оптического сигнала в частотной области. В данной модели, вертикальное отклонение пластины в частотной области можно найти с помощью распределения температуры в зоне 2, которая содержит участок би-материала балки. Зная это распределение температуры в частотной области, можно найти прогиб балок и, соответственно, отклонение пластины. Для этого используется следующее дифференциальное уравнение для изгиба консольной балки с би-материалом [2]

$$\frac{d^2 \tilde{z}}{d\tilde{y}^2} = 6(\alpha_2 - \alpha_1) \frac{d_1^{(2)} + d_2^{(2)}}{[d_2^{(2)}]^2 K} \left[\tilde{T}_2(y_2) - \tilde{T}_2(y_2) \Big|_{y_2=0} \right], \quad (21)$$

где α_1 и α_2 - коэффициенты теплового расширения слоев 1 и 2, в зоне 2, соответственно;

$$K = 4 + 6 \left(\frac{d_1^{(2)}}{d_2^{(2)}} \right) + 4 \left(\frac{d_1^{(2)}}{d_2^{(2)}} \right)^2 + \frac{E_1}{E_2} \left(\frac{d_1^{(2)}}{d_2^{(2)}} \right)^3 + \frac{E_2}{E_1} \left(\frac{d_2^{(2)}}{d_1^{(2)}} \right); \quad (22)$$

E_1 и E_2 - модули Юнга материалов слоев 1 и 2 в зоне 2, соответственно. Решение уравнения (21) позволяет найти прогиб платы в частотной области.

III. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенная модель была применена для определения частотной характеристики трех типов оптомеханических тепловых микросенсоров (рис. 1). При моделировании были использованы следующие значения параметров:

- размеры платы: длина - 50 мкм; ширина - 50 мкм; толщина - 0,5 мкм;

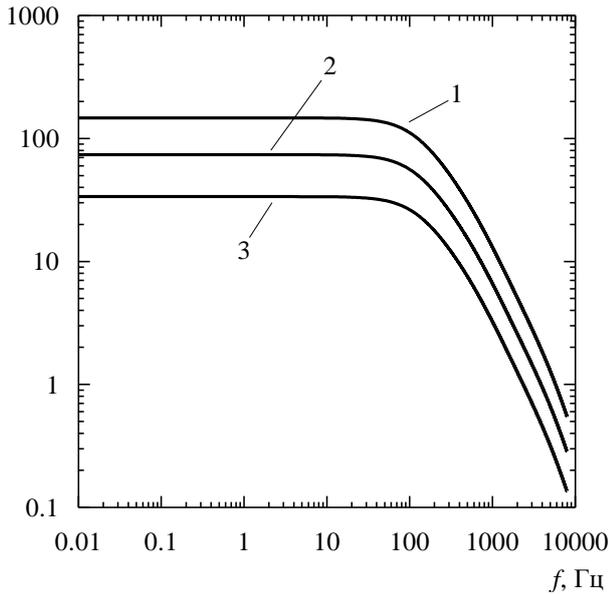
- размеры поддерживающих балок: длина вдоль пластины - 50 мкм; длина участка, прикрепленного к пластине - 4 мкм; ширина - 4 мкм; толщина - 0,5 мкм;
- материал платы и балок - диоксид кремния со следующими свойствами: плотность - 2200 кг/м³; удельная теплоемкость - 740 Дж/(кг·К); теплопроводность - 1,2 Вт/(м·К); коэффициент излучения - 0,5; коэффициент теплового расширения - 6,1·10⁻⁶ К⁻¹; модуль Юнга - 0,65 ГПа;
- материал поглощающего слоя - платина со следующими свойствами: плотность - 21450 кг/м³; удельная теплоемкость - 140 Дж/(кг·К); теплопроводность - 72 Вт/(м·К); коэффициент излучения - 0,9;
- размеры участка с би-материалом в поддерживающих балках: длина - 34 мкм; ширина - 4 мкм;
- толщина слоя 2 участка с би-материалом - 0,4 мкм;
- материал слоя 2 биметаллического участка - алюминий со следующими свойствами: плотность 2700 кг/м³; удельная теплоемкость 904 Дж/(кг·К); теплопроводность 236 Вт/(м·К); коэффициент излучения - 0,55; коэффициент теплового расширения - 23,3·10⁻⁶ К⁻¹; модуль Юнга - 70 ГПа.

Поглощающий слой занимает всю площадь платы, на которой он расположен. Каждый микросенсор располагается в корпусе, размеры которого больше, чем размеры самого микросенсора. Расстояние между нижней поверхностью платы и подложкой принималось равным 20 мкм. Значения других параметров были выбраны следующими: теплопроводность окружающего воздуха - 0,026 Вт/(м·К); коэффициент конвективного теплообмена - 19,8 Вт/(м²·К); температура окружающей среды - 300 К; плотность мощности входного излучения - 2000 Вт/м².

При рассмотрении работы оптомеханических тепловых микросенсоров важное значение имеет распределение температуры на участке из би-материала балок. Анализ температуры в зоне 2, где расположен би-материал показал, что распределение температуры изменяется вдоль оси балки и постоянно в направлении, перпендикулярном данной оси. Этот факт указывает на то, что для расчета прогиба пластины можно использовать уравнение (21).

Зависимости модулей и аргументов частотной характеристики для трех типов оптомеханических тепловых микросенсоров показаны на рис. 3. Как видно из частотных зависимостей модулей, среди микросенсоров конструктивный вариант с платой, поддерживаемой двумя балочными мостами в соседних углах, имеет наибольшую чувствительность. Вариант с платой, поддерживаемой четырьмя балочными мостами, имеет самую низкую чувствительность. Частотные зависимости аргумента для трех вариантов оптомеханических тепловых микросенсоров практически идентичны.

$|S_{\omega}|$, мкМ/Вт



$\text{Arg}(S_{\omega})$, градус

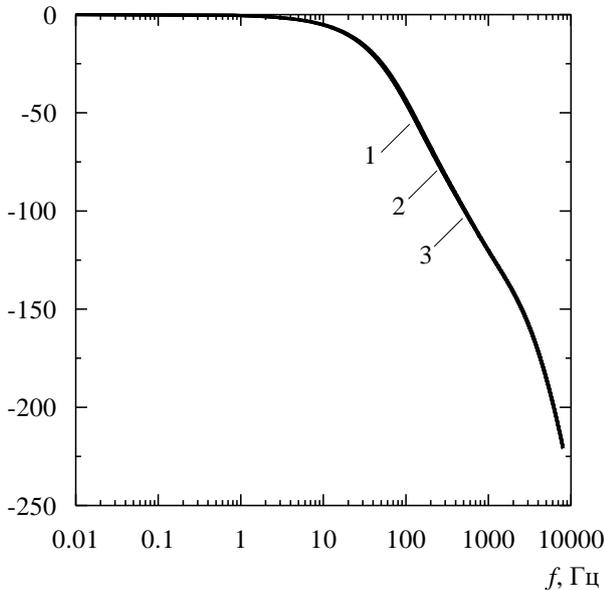


Рис. 3. Модули и аргументы частотных характеристик оптомеханических тепловых микросенсоров: на основе прямоугольных плат, поддерживаемых (1) двумя балками в соседних углах, (2) двумя балками в противоположных углах, (3) четырьмя балками

Аппроксимация динамических характеристик оптомеханических тепловых микросенсоров частотной характеристикой систем первого порядка позволяет оценить соответствующие постоянные времени для каждого типа микросенсоров. Они найдены с помощью частотных зависимостей аргумента. Постоянная времени равна

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}, \quad (23)$$

где f_c частота среза оптомеханического теплового микросенсора. Значение частоты среза соответствует частоте, на которой аргумент частотной характеристики равен -45° . На основании данных, представленных на рис. 4, следующие значения частоты среза и постоянной времени для рассматриваемых микросенсоров получены:

- микросенсор с прямоугольной платой, поддерживаемой двумя балочными мостами в соседних углах: $f_c = 99,4$ Гц; $\tau = 1,6$ мс;

- микросенсор с прямоугольной платой, поддерживаемой двумя балочными мостами в противоположных углах: $f_c = 100,3$ Гц; $\tau = 1,59$ мс;

- микросенсор с прямоугольной платой, поддерживаемой четырьмя балочными мостами: $f_c = 106,6$ Гц; $\tau = 1,49$ мс.

Как видно из имеющихся данных, значения частоты среза и постоянная времени для различных вариантов микросенсоров близки друг к другу. Тем не менее, среди них микросенсор на базе прямоугольной платы, поддерживаемой четырьмя балочными мостами, имеет немного лучшие динамические характеристики.

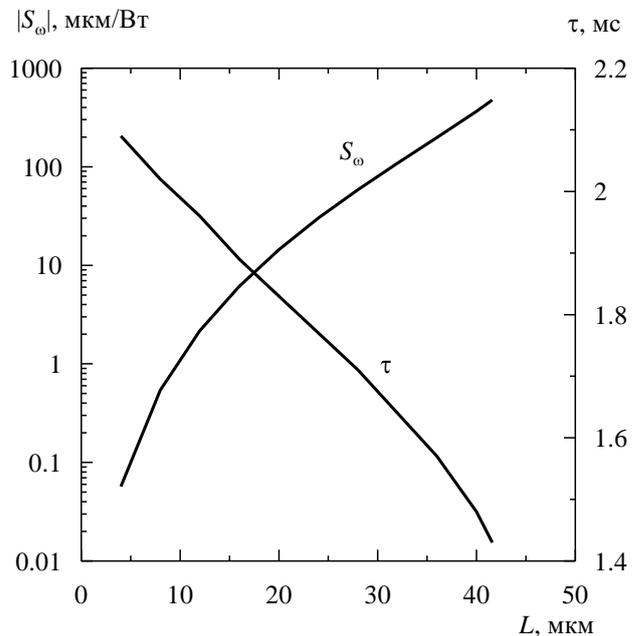


Рис. 4. Зависимость модуля частотной характеристики при частоте $\omega=0$ и постоянной времени оптомеханического теплового микросенсора с двумя балками в соседних углах платы от длины участка с би-материалом

Данный способ был использован для определения зависимости чувствительности и постоянной времени оптомеханических микросенсоров от длины участка би-материала балочных мостов и от толщины слоя алюминия на участке би-материала. Эти зависимости для микросенсора с платой, поддерживаемой двумя балочными мостами в соседних углах, показаны на рис. 4 и 5. Как видно из представленных данных, чувствительность возрастает, а постоянная времени уменьшается с увеличением длины участка с би-материалом. Эта особенность может быть связана с тем, что длина данного участка оказывает большее влияние на изгиб балки, чем на понижение температуры зоны. С увеличением толщины слоя алюминия чувствительность значительно уменьшается, а постоянная времени незначительно растет. Таким образом, увеличение в системе би-материала толщины слоя материала, имеющего более высокий коэффициент теплопроводности, нежелательно, так как приводит к ухудшению характеристик оптомеханического микросенсора.

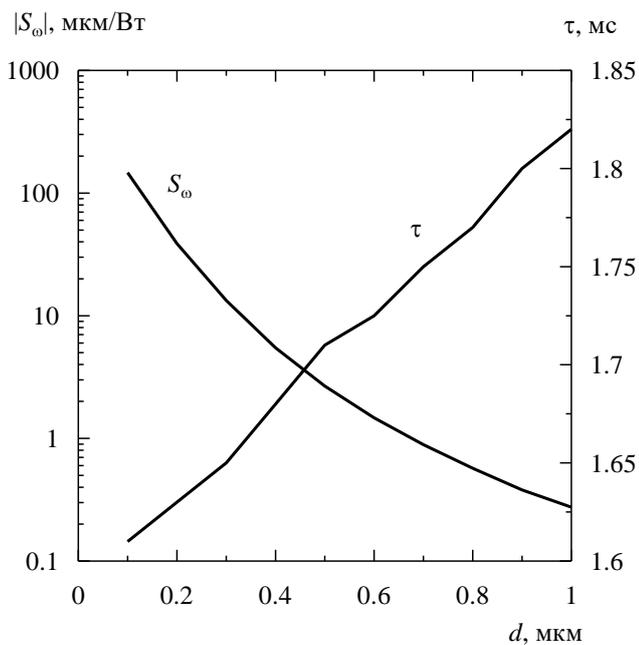


Рис. 5. Зависимость модуля частотной характеристики при частоте $\omega=0$ и постоянной времени оптомеханического теплового микросенсора с двумя балками в соседних углах платы от толщины слоя алюминия на участке с би-материалом

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная модель позволяет определить динамические характеристики оптомеханических тепловых микросенсоров, такие как частотная характеристика, постоянная времени, частоты среза. Она также может служить основой для создания аналитических моделей, позволяющих определить ответную реакцию микросенсоров на различные входные действия во временной области и эквивалентную мощность шума микросенсоров. Метод может быть использован в системах САПР оптомеханических тепловых микросенсоров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gimzewski J.K., Gerber Ch., Meyer E., Schlittler R.R. Observation of a Chemical Reaction Using a Micromechanical Sensor // *Chemical Physics Letters*. 1994. V. 217. P. 589-594.
- [2] Barnes J.R., Stephenson R.J., Woodburn C.N., O'Shea S.J., Welland M.E., Rayment T., Gimzewski J.K., Gerber Ch. A Femtojoule Calorimeter Using Micromechanical Sensors // *Rev. Sci. Instrum.* 1994. V. 65. P. 3793-3798.
- [3] Barnes J.R., Stephenson R.J., Welland M.E., Gerber Ch., Gimzewski J.K. Photothermal Spectroscopy with Femtojoule Sensitivity Using a Micromechanical Device // *Nature*. 1994. V. 372. P. 79-81.
- [4] Varesi J., Lai J., Perazzo T., Shi Z., Majumdar A. Photothermal Measurements at Picowatt Resolution Using Uncooled Micro-optomechanical Sensors // *Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 71. P. 306-308.
- [5] Majumdar A., Lai J., Chandrachud M., Nakabeppu O., Wu Y., Shi Z. Thermal Imaging by Atomic Force Microscopy Using Thermocouple Cantilever Probes // *Rev. Sci. Instrum.* 1995. V. 66. P. 3584-3592.
- [6] Kwon B., Rosenberger M., Bhargava R., Cahill D.G., King W.P. Dynamic Thermomechanical Response of Bimaterial Microcantilevers to Periodic Heating by Infrared Radiation // *Rev. Sci. Instrum.* 2012. V. 83. 015003 (7p.).
- [7] Bijster R., de Vreugd J., Sadeghian H. Dynamic Characterization of Bi-material Cantilevers / *Proceedings 4th Int. Conf. on Sensor Device Technologies and Applications, SENSORDEVICES 2013 – Barcelona, Spain*. 2013. P. 1-8.
- [8] Miao Z., Zhang Q., Chen D., Guo Z., Dong F., Xiong Z., Wu X., Li C., Jiao B. Uncooled IR imaging using optomechanical detectors // *Ultramicroscopy*. 2007. V. 107. P. 610-616.
- [9] Kozlov A.G. Analytical Modelling of Steady-state Temperature Distribution in Thermal Microsensors Using Fourier Method. Part 1. Theory // *Sensors Actuators A. Physical*. 2002. V. 101. P. 283-298.
- [10] Kozlov A.G. Frequency response model for thermal radiation microsensors // *Measurement Science and Technology*. 2009. V. 20. 045204 (11 p).

Modelling of frequency response of optomechanical thermal microsensors

A.G. Kozlov

Omsk State Technical University, agk252@mail.ru

Keywords — optomechanical thermal microsensor, temperature distribution, frequency response, Fourier transform, eigenfunction method, cutoff frequency, time constant.

ABSTRACT

An analytical method is developed to determine the frequency response of optomechanical thermal microsensors. The optomechanical thermal microsensors belong to thermal microsensors and are made using surface micromachining. Basic elements of these microsensors are: plate with absorbing layer; beams which support the plate over substrate; bi-material sections, which are part of the beams and induce the deflection of the plate as the result of bi-material effect.

The three types of microsensors are considered: microsensor with two supporting beams in adjacent corners of the plate; microsensor with two supporting beams in opposite corners of the plate; microsensor with four supporting beams.

Taking into account the features of each type of the microsensors, domains of modelling are marked out in their structures. The size of such domain is determined by the symmetry type of microsensor structure (mirror or axial symmetry). The domains are divided into the regions with homogeneous parameters. For each region, non-steady-state heat conduction equation is obtained that is solved using the time Fourier transform and eigenfunction method. The heat flux densities between the regions are determined using adjoint boundary conditions in the frequency domain. Analytical expression for frequency responses of the microsensors is obtained.

The presented method is applied to find the frequency responses, cutoff frequencies and time constants for the three types of optomechanical thermal microsensors. Among the microsensors, the design variant with the plate supported by two beams in adjacent corners has the most sensitivity. The variant with the plate supported by four beams has the lowest sensitivity. The frequency dependences of the argument for the three variants of optomechanical thermal microsensors are almost identical. The values of the cutoff frequency and the time constant for different variants of the microsensors are close. However, among them the microsensor based on rectangular plate supported by four beams has the slightly better dynamic characteristics. The dependencies of sensitivity and time constant of the microsensor with two supporting beams in adjacent corners on the length of the bi-material section of the beams and on the thickness of the

Al-layer of bi-material section are obtained. Sensitivity increases and time constant decreases with increasing the length of bi-material section. With increasing of the Al-layer thickness, sensitivity decreases and the time constant increases.

The present model allows one to determine the dynamic characteristics of optomechanical thermal microsensors: frequency response, time constant, cutoff frequency.

REFERENCES

- [1] Gimzewski J.K., Gerber Ch., Meyer E., Schlittler R.R. Observation of a Chemical Reaction Using a Micromechanical Sensor // *Chemical Physics Letters*. 1994. V. 217. P. 589-594.
- [2] Barnes J.R., Stephenson R.J., Woodburn C.N., O'Shea S.J., Welland M.E., Rayment T., Gimzewski J.K., Gerber Ch. A Femtojoule Calorimeter Using Micromechanical Sensors // *Rev. Sci. Instrum.* 1994. V. 65. P. 3793-3798.
- [3] Barnes J.R., Stephenson R.J., Welland M.E., Gerber Ch., Gimzewski J.K. Photothermal Spectroscopy with Femtojoule Sensitivity Using a Micromechanical Device // *Nature*. 1994. V. 372. P. 79-81.
- [4] Varesi J., Lai J., Perazzo T., Shi Z., Majumdar A. Photothermal Measurements at Picowatt Resolution Using Uncooled Micro-optomechanical Sensors // *Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 71. P. 306-308.
- [5] Majumdar A., Lai J., Chandrachud M., Nakabeppu O., Wu Y., Shi Z. Thermal Imaging by Atomic Force Microscopy Using Thermocouple Cantilever Probes // *Rev. Sci. Instrum.* 1995. V. 66. P. 3584-3592.
- [6] Kwon B., Rosenberger M., Bhargava R., Cahill D.G., King W.P. Dynamic Thermomechanical Response of Bimaterial Microcantilevers to Periodic Heating by Infrared Radiation // *Rev. Sci. Instrum.* 2012. V. 83. 015003 (7p.).
- [7] Bijster R., de Vreugd J., Sadeghian H. Dynamic Characterization of Bi-material Cantilevers / *Proceedings 4th Int. Conf. on Sensor Device Technologies and Applications, SENSORDEVICES 2013 – Barcelona, Spain*. 2013. P. 1-8.
- [8] Miao Z., Zhang Q., Chen D., Guo Z., Dong F., Xiong Z., Wu X., Li C., Jiao B. Uncooled IR imaging using optomechanical detectors // *Ultramicroscopy*. 2007. V. 107. P. 610-616.
- [9] Kozlov A.G. Analytical Modelling of Steady-state Temperature Distribution in Thermal Microsensors Using Fourier Method. Part 1. Theory // *Sensors Actuators A. Physical*. 2002. V. 101. P. 283-298.
- [10] Kozlov A.G. Frequency response model for thermal radiation microsensors // *Measurement Science and Technology*. 2009. V. 20. 045204 (11 p).