

УДК 534.13

Оценка характеристик многослойных микроэлектромеханических чувствительных элементов на основе численного решения термомеханической задачи

09, сентябрь 2012

Барышева Д.В.

*Студент,
Кафедра «Прикладная механика»*

*Научный руководитель: Воронов С.А.
д.т.н., профессор кафедры «Прикладная механика»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
darya.barysheva.bmstu@mail.ru

Основной целью проекта является разработка принципиально нового класса чувствительных элементов микроэлектромеханических матричных приемников электромагнитного излучения, чувствительных в терагерцовой области электромагнитного спектра.

Многим веществам присуща способность излучать в тепловом терагерцовом (ТГц) диапазоне волн - участке инфракрасного спектра, лежащего между видимым светом и высокочастотными радиоволнами, границы которого лежат в диапазоне частот $10^{11} - 10^{13}$ Гц и диапазоне длин волн $3 - 0,03$ мм соответственно. Огромный диапазон частот, присущий терагерцовому диапазону, весьма перспективен и привлекателен для практического применения. Это объясняется тем, что именно ТГц-диапазону частот соответствуют колебательные и вращательные спектры большого числа окружающих нас веществ, в том числе многих органических молекул. При этом каждому веществу соответствует свой уникальный спектральный портрет в данном частотном диапазоне. Другим важным свойством ТГц излучения является способность, подобно рентгеновскому излучению, в различной степени проникать сквозь одежду, кожу, пластмассу и другие материалы. При этом ТГц излучение не наносит вред исследуемому объекту (например, телу человека), поскольку в отличие от рентгеновских лучей не ионизирует среду. Таким образом, применение методов исследования, основывающихся на регистрации «изображения» объекта в ТГц диапазоне частот, является перспективным в сфере обеспечения безопасности (например, для проверки багажа, поиска взрывчатых или наркотических веществ), в медицине для получения объемных изображений различных патологий внутренних органов без побочных эффектов и ограничений, присущих ионизирующим методам исследования, в астрофизических наблюдениях, где исследуется состав удаленных звезд и галактик и т.д.

Несмотря на то, что описанные выше свойства ТГц излучения известны достаточно давно (изучение ТГц диапазона волн начинает развиваться с 60—70-х годов 20-го века, когда стали доступны первые источники и приёмники такого излучения), до настоящего времени не удалось создать эффективного и доступного по стоимости приемника в данном диапазоне частот. Как технологии, традиционно использующиеся для регистрации инфракрасного теплового излучения (микроболометрические матрицы), так и технологии,

разрабатываемые специально для регистрации ТГц излучения (фотонные приемники, приемники на эффекте Джозефсона и др.), обладают существенными недостатками: требуют высокой степени охлаждения рабочей матрицы, что выражается в существенной стоимости изделия, либо не обеспечивают достаточной точности и чувствительности измерения.

Перспективным является направление разработки **принципиально нового чувствительного элемента терагерцового микроэлектромеханического приемника (ТЭМП)** основанного на эффекте автоэлектронной эмиссии. Принцип действия ТЭМП основан на преобразовании теплового терагерцового излучения в механическую деформацию микроразмерной многослойной металлической пластины, установленной на опоре.

Одна из возможных структур чувствительного элемента (ЧЭ) представлена на Рис.1.

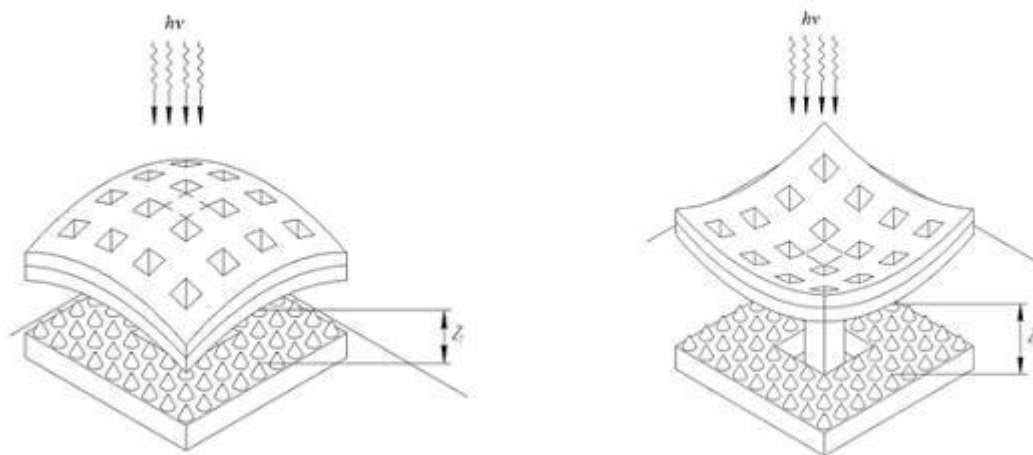


Рис.1

Чувствительный элемент ТЭМП при нагреве (слева) и охлаждении (справа) относительно базовой температуры

Целями и задачами данной работы являются расчет и анализ температурных полей возникающих в упругом элементе в процессе регистрации ТГц излучения, определение соответствующего температурным полям напряженно - деформированного состояния, с целью выбора оптимальных параметров конструкции ЧЭ, обеспечивающих высокую чувствительность приемника и малое время регистрации изображения при соблюдении технологических ограничений. Для данного анализа необходимо решить следующие задачи:

- нестационарный температурный расчет с моделированием различных видов источника излучения и граничных условий на поверхностях конструкции, с целью получения распределения температурных полей в зависимости от времени, определение времени переходного процесса (нагрев – стационарный режим - охлаждение)
- расчет напряженно-деформированного состояния конструкции в зависимости от соответствующих температурных полей во времени; определение пределов чувствительности чувствительного элемента.
- динамический расчет, определение собственных частот и форм колебаний, с целью определения их влияния на переходный процесс.

Решение температурной задачи

Теплопередача представляет собой процесс передачи тепла из области с более высокой температурой в область с более низкой. Все многочисленные процессы, которые описываются передачей тепла внутри тела или между телами и окружающей средой, являются объектами изучения термодинамики. Разность температуры представляет собой характерное свойство тепловой энергии, которое предопределяет интенсивность теплообмена.

Процесс теплопередачи подразделяют на три основных вида: теплопроводность, конвективный теплообмен и излучение, которые были смоделированы в данной работе.

Ввиду того, что аналитическое решение уравнений теории теплообмена может быть получено только в ряде простых случаев, в данном проекте решения стационарной и нестационарной задачи теплопередачи, проводим методом конечных элементов (МКЭ).

Решение нестатической задачи теплопередачи сводится к решению дифференциального уравнения теплового баланса (1.1) в области V , занятой телом, при соответствующих краевых условиях на границе S и начальным условиям. На границе могут быть заданы краевые условия трех типов: на части границы S_T задана температура, на части границы S_q задан тепловой поток интенсивности q , на части границы S_α задан теплообмен с внешней средой по закону Ньютона (1.2). Для трехмерного случая задача теории теплопередачи описывается следующими уравнениями: в области V уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.1)$$

и на границе уравнениями

$$\begin{aligned} T|_{S_T} &= T_0 \\ q|_{S_q} &= -(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z) \\ \alpha(T - T_{cp})|_{S_\alpha} &= -(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Решение уравнения должно удовлетворять начальному условию в виде

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0(x, y, z)$$

где $T_0(x, y, z)$ - температура в начальный момент времени.

Ряд матричных преобразований приводит к следующему матричному линейному обыкновенному дифференциальному уравнению первого порядка

$$CU + PU = F$$

где C - глобальная матрица теплоемкости всей системы конечных элементов, P -
глобальная матрица теплопроводности всей системы конечных элементов, F -
вектор тепловых нагрузок.

Определение напряженно - деформированного состояния

С точки зрения механики, данная задача является задачей термоупругости. В качестве нагружения в ней используется температура, вызывающая температурные деформации

$$\varepsilon_t = \alpha T \quad (2.1)$$

Полученные на предыдущем этапе решения температурные поля передаются в качестве входных параметров в решение задачи определения напряженно - деформированного состояния конструкции.

Наличие градиента изменения температуры в пластине приводит к изгибу пластины, т.к. в соответствии с формулой (2.1) каждый элементарный объем пластины будет иметь разные деформации.

В связи с необходимостью получения максимальной чувствительности разрабатываемой модели, используется конструкция пластины из слоев с разными коэффициентами температурного линейного расширения, что приводит к ее дополнительному изгибу.

Минимизация полной потенциальной энергии ансамбля конечных элементов приводит к матричному уравнению характерному для метода конечных элементов (2.2), которое представляет собой систему линейных алгебраических уравнений,

$$KU = F \quad (2.2)$$

где K - глобальная матрица жесткости всей системы конечных элементов, F - вектор нагрузки в узлах конечно-элементной модели.

Результаты

Задачи определения поля температур в объеме ЧЭ и его НДС в данной работе рассматриваются последовательно. Результат решения нестационарной температурной задачи – поле распределения температуры, изменяющееся во времени, используется в качестве исходных данных при решении задачи определения напряженно-деформированного состояния на каждом шаге по времени.

На Рис. 2 продемонстрированы температурные поля в конструкции в заданный момент времени; на Рис.3 - напряженно-деформированное состояние, вызванное данным распределением температур.

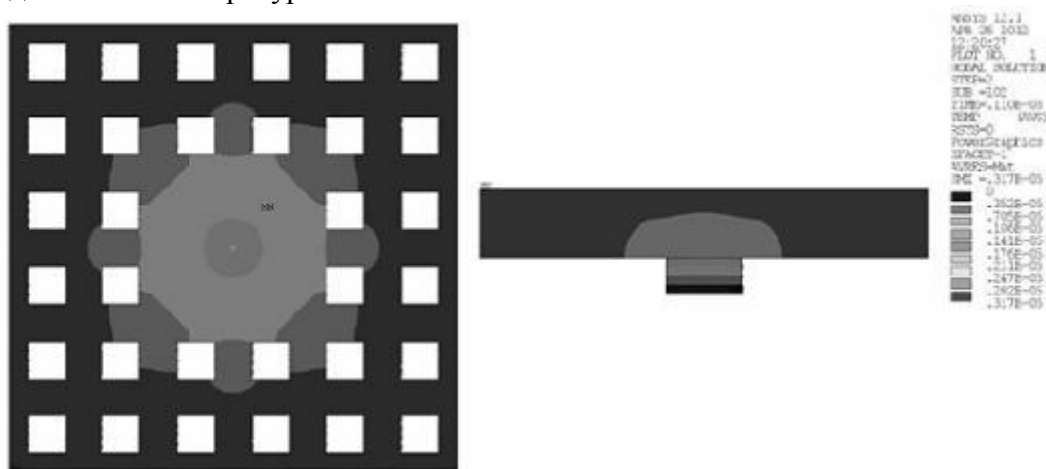


Рис.2

Поле распределения температур

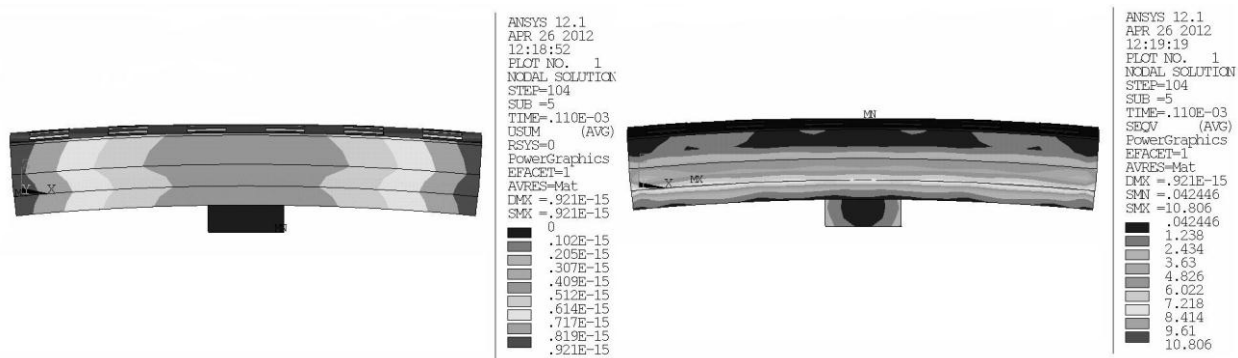


Рис.3

Напряженно-деформированное состояние:
деформация (слева), напряжения (справа)

Проведенные расчеты позволяют на основании полученных результатов выбрать оптимальное сочетание материалов слоев ЧЭ, а также геометрические параметры конструкции, обеспечивающие максимальную чувствительность при допустимом времени протекания переходного процесса и соблюдении технологических ограничений.

Заключение

1) Разработана программа для решения нестационарной термомеханической задачи методом конечных элементов, путем последовательного решения задачи теплопроводности и задачи отыскания напряженно-деформированного состояния, для

которой поля температур используются в качестве заданной нагрузки. Данная программа позволяет моделировать переходные процессы в конструкции разрабатываемого чувствительного элемента, связанные с изменением температуры источника излучения тепла.

2) Разработан алгоритм программы отыскания оптимальных параметров, отвечающих необходимым требованиям.

В дальнейшем развитие работы должно быть направлено на:

- усложнение модели исследуемого процесса (учет электромагнитных полей, влияние соседних ЧЭ друг на друга);
- совершенствование конечно-элементной модели;
- экспериментальная проверка результатов моделирования.

Список используемой литературы

1. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемого твердого тела. Харьков: Основа, 1991. 272 с.
2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. Ansys в руках инженера. М.: Едиториал УРСС, 2003. 354 с.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
4. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение., 1980. 326 с.
5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат, 1979. 212 с.
6. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. Л.: Машиностроение, 1983. 213 с.