

Принципы проектирования и моделирование микротермомеханических приёмников ИК-изображения с оптическим считыванием

А.М. Белин¹, М.А. Белин¹, В.А. Федирко^{1,2}, Е.А. Фетисов¹, Р.З. Хафизов^{1,3}

¹МИЭТ, ambelin@mail.ru

²МГТУ «Станкин»

³ООО «ГрафИмпресс»

Аннотация — Рассмотрены принципиальные аспекты проектирования неохлаждаемых приёмников ИК-изображения на основе термомеханических микродетекторов с оптическим считыванием. Отмечены потенциальные преимущества. Представлены результаты теоретического и компьютерного моделирования микротермомеханических элементов для рассматриваемых систем.

Ключевые слова — ИК-фотоприёмники, термомеханический ИК-детектор, оптическое считывание изображения, МЭМС-технологии, проектирование матрицы ИК-фотоприёмника, теоретическое и компьютерное моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Неохлаждаемые приёмники изображения инфракрасного (ИК) диапазона имеют широкие перспективы применения как в коммерческих, так и в специальных областях. Рядом преимуществ обладают ИК-фотоприёмники на основе микротермомеханических элементов (МТМЭ) [1-3], которые по своим характеристикам могут успешно конкурировать как с используемыми в настоящее время неохлаждаемыми болометрическими приёмниками, так и с охлаждаемыми фотоприёмниками.

Вопросы проектирования ИК МЭМС-фотоприёмников с ёмкостным считыванием рассматривались нами ранее [4-6]. Особый интерес представляет создание на основе таких элементов систем с оптическим считыванием. Наноразмерные пространственные девиации термомеханических чувствительных элементов регистрируются в такой системе оптическим методом, обеспечивая возможность реализации принципа «прямого ИК-видения». При этом существенно снижается конструктивная и технологическая сложность сенсора, поскольку схема считывания является электрически пассивной и не требует формирования на кристалле электронных цепей. Это

позволяет рассчитывать на заметное снижение стоимости системы.

В настоящей работе представлены принципиальные аспекты построения термомеханических систем с оптическим считыванием ИК изображения (ИК ТМСОС) и приведены результаты трёхмерного компьютерного моделирования фоточувствительных структур МТМЭ.

II. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИК ТМСОС

Принципиальная схема ИК ТМСОС представлена на рис. 1 [5].

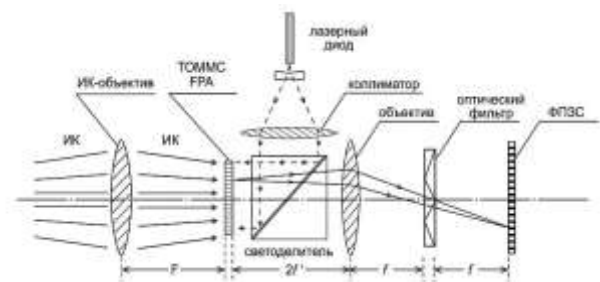


Рис. 1. Схема ИК ТМСОС

На входной поверхности матрицы термомеханических детекторов ИК излучения под действием этого излучения создается распределение температуры, а на ее выходной поверхности образуется соответствующий зеркальный рельеф, создаваемый смещением микрзеркал. ОСС с источником света в диапазоне, близком к видимому ($\lambda=0,7 \div 0,9$ мкм), преобразует этот рельеф в фазовый рельеф волны, отраженной от промодулированной зеркальной поверхности матрицы ИК-фотоприёмника (FPA). Затем ОСС с помощью оптической фильтрации в фокальной плоскости объектива превращает полученное фазовое изображение в амплитудно-модулированное изображение, которое проектируется на ПЗС или КМОП-фотоприёмник.

Наиболее привлекательным методом регистрации термомеханического отклика элементов фотоприёмной матрицы на тепловое излучение объекта представляется дифракционный метод оптического считывания.

Основные преимущества, которые отличают неохлаждаемые ИК ТМСОС с дифракционным оптическим считыванием от других типов неохлаждаемых тепловых приемников, состоят в следующем:

- чувствительные элементы сенсора представляют собой полностью пассивные структуры, не требующие для своего функционирования никаких электрических соединений с элементами, размещенными на подложке, в результате чего может быть достигнута максимально возможная тепловая изоляция теплоприёмной мембраны;
- отсутствие электрической разводки элементов обеспечивает возможность их легкого топологического масштабирования до минимальных технологических размеров с целью достижения высокого разрешения, поэтому ИК ТМСОС дают потенциальную возможность увеличения их формата без существенной потери чувствительности;
- для изготовления кристалла матрицы ТМЭ с оптическим считыванием используются стандартные процессы МЭМС-технологии, требующие минимального количества фотошаблонов;
- циклический характер изменения интенсивности дифрагированного света предотвращает насыщение регистрируемого отклика, что позволяет осуществлять обнаружение тепловых объектов в широком диапазоне температур с высокой чувствительностью;
- системы с оптическим считыванием характеризуются существенно меньшими значениями рассеиваемой мощности по сравнению с системами, основанными на электрических методах считывания сигнала, что снижает требования к обеспечивающим устройствам электропитания и терморегулирования.

Одним из вариантов реализации дифракционной системы оптического считывания является, например, встроенная микроскопическая дифракционная решетка. Последняя формируется с помощью стандартной технологии на кремниевой подложке.

Проектирование матрицы ТМЭ осуществляется исходя из следующих требований:

- чувствительный элемент должен обеспечивать максимальный термомеханический отклик в условиях заданных ограничений на размеры (шаг следования) пикселя матрицы;
- коэффициент заполнения элемента областью, поглощающей тепловое излучение, должен быть максимален;
- время реакции элемента на изменение теплового излучения должно обеспечивать регистрацию изображения в реальном времени.

Требования к материалам, входящим в структуру, могут быть сформулированы следующим образом:

- для эффективного использования энергии теплового излучения элемент должен включать в себя материал, обеспечивающий хорошее поглощение ИК излучения в диапазоне 8-14 мкм;
- для формирования системы оптического считывания необходим материал с высокой отражательной способностью в видимой области спектра;
- биматериальные консоли должны состоять из материалов с высоким различием коэффициентов термического расширения, при этом хотя бы один из этих материалов должен иметь низкую теплопроводность;
- выбор материалов должен производиться с учетом возможностей их применения в современной технологии микрообработки;
- необходимо, чтобы слои материалов при включении их в структуру элемента не давали высоких остаточных напряжений после проведения всех технологических операций.

Основной характеристикой ИК-приёмников изображения служит эквивалентная шуму разность температур (NETD). Достигнутый к настоящему времени уровень разработок ИК ТМСОС характеризуется значением $NETD = 500 \text{ мК}$ при формате $\sim 256 \times 256$ и значением NETD от 100 до 200 мК для приемников с малым форматом $\sim 100 \times 100$. Измеренные экспериментальные величины NETD системы на один-два порядка хуже расчетных значений для собственно ТМЭ [1]. Как показано в [7] это связано с тем, что определяющий вклад в NETD ИК ТМСОС вносят шумы считывающей системы.

Исследование, проведенное в [7], показывает, что приемники ИК изображения на биматериальных структурах ИК ТМСОС с более эффективной оптической интерференционной системой считывания и за счет увеличения мощности считывающего лазера могут обеспечить $NETD \approx 20 \text{ мК}$ для приёмников среднего формата $\sim 200 \times 300$, сравнимую с NETD микрометрических матриц.

Вместе с тем такие предельные значения чувствительности предполагают необходимость реализации очень высоких требований к технологии создания чувствительного массива фокальной плоскости. Важными параметрами, которые прежде всего необходимо учитывать, являются:

- предельно воспроизводимые геометрические размеры элементов ИК МЭМС чувствительной ячейки, которые при дифракционном методе считывания имеют характерные значения в нанометровом диапазоне;
- точность совмещения технологических слоев при формировании биматериальных кантелеверных консолей;

- возможности реализации контролируемых низкотемпературных технологических операций с целью минимизации нежелательных механических деформаций пленочных наноструктур;
- высокая однородность протекания химико-технологических процессов по площади кристалла во время производства ИК МЭМС приемника;
- технологические операции формирования ИК МЭМС элемента (осаждение слоев, термический отжиг, травление жертвенного слоя и др.) должны минимизировать уровень неоднородности всех физических параметров элементов, обеспечивающих дифракционное оптическое считывание.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Нами были исследованы тестовые ТМЭ на основе биматериальных микроантилеров, схема которых представлена на рис. 2.

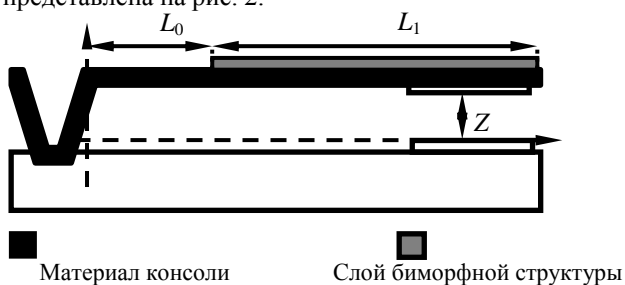


Рис. 2. Схема термочувствительного элемента

В качестве материала консоли был выбран слабо напряженный слой нитрида кремния, полученный химическим осаждением при низком давлении на жертвенный слой, а в качестве другого слоя биморфной структуры - золото.

Теоретический анализ термомеханических элементов на основе полиморфных структур проведен в [1, 8, 9]. Полученные расчётные формулы позволяют оптимизировать конструктивные параметры ТМЭ. В частности, термомеханический отклик двухзвенного микроантилера с 2-слойным биморфным сегментом (рис. 2), то есть смещение его свободного края ΔZ , описывается выражением:

$$\Delta Z = \frac{3\Delta T \Delta \alpha \cdot L^2 (1-\ell)^2 (\eta+1)}{h_1 \beta \eta^3 + 4\eta^2 + 6\eta + 4 + (\beta \eta)^{-1}}; \quad (1)$$

$$\ell = \frac{L_0}{L}, \quad \beta = \frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_1}, \quad \bar{E}_i = \frac{E_i}{1-\sigma_i}, \quad \eta = \frac{h_2}{h_1}$$

где ΔT – изменение температуры консоли; $\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ – разность линейных коэффициентов термического расширения материалов слоев; $L = L_0 + L_1$ – длина консоли; L_0 – длина термоизолирующего звена; h_i – толщина i -го слоя; E_i и σ_i – соответственно, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала i -го слоя ($i=1,2$).

гости и коэффициент Пуассона материала i -го слоя ($i=1,2$).

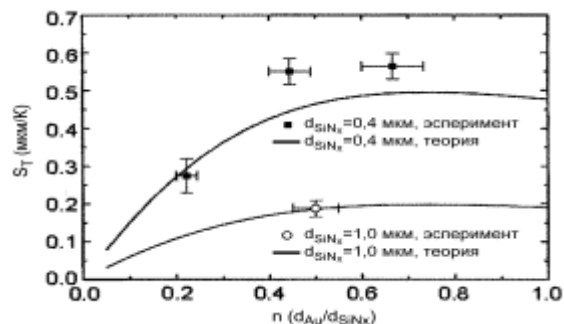


Рис. 3. Термомеханическая чувствительность биморфной структуры SiNx- Au [10]

На рис. 3 представлена измеренная зависимость термомеханической чувствительности от соотношения толщин слоёв [10]. Экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с расчётами по формуле (1). Максимальная термомеханическая чувствительность достигается при соотношении $\sim h_2/h_1=0,75$ в соответствии с теоретическим значением.

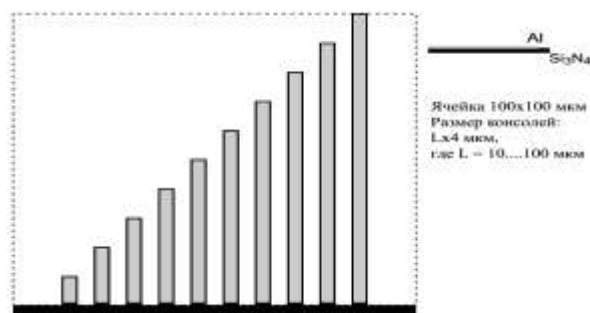


Рис. 4. Конструкция тестового элемента для контроля угловых деформаций биматериальных консолей

На основе теоретических расчётов были спроектированы экспериментальные тестовые ТМЭ. Для отработки экспериментальной технологии ТМЭ изготавливалась тестовая структура, представленная на рис. 4.

Было выполнено компьютерное моделирование тепловой деформации консолей с помощью пакета ANSYS. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

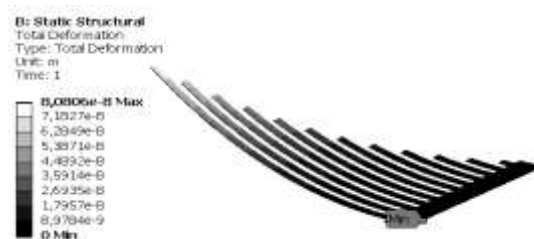


Рис. 5. Механическая деформация биматериальных консолей при $\Delta T=1^\circ\text{C}$

Консоли разной длины, как и следует из теоретических расчётов [1, 8, 9], изготавливаются однородным об-

разом. Величина изгиба описывается формулой (1) для всех консолей. Изгиб самой длинной консоли длиной 100 нм составляет 81 нм. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными исследованиями изготовленных образцов позволяет провести их эффективный анализ и корректировку технологии.

Было также выполнено моделирование тестовых ТМЭ, закладываемых в проектируемую топологию экспериментальных матричных кристаллов с числом элементов 64x64 и шагом элементов 100 мкм. Результаты моделирования деформации элемента с одной двухсторонней консолью при нагреве на 1°C показаны на рис. 6. Величина смещения мембраны составляет около 10 нм.



Рис. 6. Механическая деформация тестовой ячейки

На рис. 7 представлен результат моделирования смещения элемента с двумя консолями при сильном нагреве на 80°C.

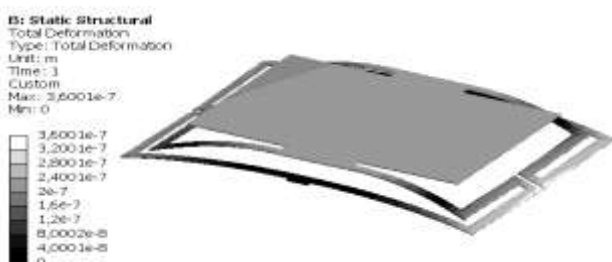


Рис. 7. Механическая деформация тестовой ячейки с двойными консолями при $\Delta T=80^\circ\text{C}$

Результаты моделирования показывают, что полученные расчётные теоретические формулы дают надёжную основу для проектирования элементов термочувствительных биморфных элементов. Исследованные конструкции позволяют рассчитывать на возможность создания высокочувствительных термомеханических ИК-фотоприёмников.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный нами анализ показывает, что в настоящее время на имеющейся отечественной кремниевой технологии МЭМС возможно создание неохлаждаемых термомеханических фотоприёмников в ИК диапазоне с системой оптического считывания изображения (ИК ТМСОС) со следующими параметрами:

- спектральный диапазон $\lambda=8-14$ мкм;
- размер кадра (число пикселей) N_k ...от 20 Кпикс до 0,3 Мпикс;
- чувствительность NETD $\leq 100 \text{ мК}^\circ$ при формате 120x160;
- частота кадров 30 Гц.

Они сопоставимы с характеристиками существующих приёмников на основе матриц микроболлометров, но ИК ТМСОС являются технологически значительно менее сложными.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 14.430.12.0004).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федирко В.А. Фетисов Е.А. Беспалов В.А. Приемники ИК изображения на основе термомеханических наноразмерных мембран // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 66–72.
- [2] Федирко В.А., Фетисов Е.А. Вакуумные оптомеханические приемники ИК изображения // XVI научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» / под ред. проф. Д.В. Быкова. М.: МИЭМ, 2009. С. 155–158.
- [3] Фетисов Е.А. Федирко В.А. Хафизов Р.З. Золотарёв В.И. Зенюк Г.А. Рудаков Д.А. Нанoeлектромеханические термочувствительные элементы // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010». Сб. трудов / под общ. ред. акад. РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИПИМ РАН, 2010. С. 638–641.
- [4] Фетисов Е.А. Хафизов Р.З. А.М. Белин, Рудаков Г.А. Золотарев В.И. Федирко В.А. Рыгалин Д.Б. Инфракрасные фоточувствительные элементы на основе МЭМС // V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2012». Сб. трудов / под общ. ред. акад. РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИПИМ РАН, 2012. С. 658–661.
- [5] Федирко В.А. Зенюк Д.А. Математическое моделирование емкостного элемента МЭМС // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 4 (17). С. 53–58.
- [6] Федирко В.А., Фетисов Е.А. Электромеханика МДП МЭМС. // Труды Первой российско-белорусской конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники». РНТОРЭС им. А.С. Попова, Нижний Новгород. 2013. Т. 2. С. 13–16.
- [7] Свидзинский К.К. Фетисов Е.А. Оценка чувствительности неохлаждаемых приемников ИК-изображения на основе микротермооптомеханических систем с оптическим считыванием // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 367–373.
- [8] Федирко В.А., Зенюк Д.А. Моделирование термоотклика мультиморфных микроантиселеров // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2009. № 4 (8). С. 75–81.
- [9] Зенюк Д.А. Федирко В.А. Моделирование микрoэлектромеханического термосенсора // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 4 (17). С. 64–68.
- [10] Zhao Y., Mao M., Horowitz Roberto, Majumdar A., Varesi J., Norton P., Kitching J. Optomechanical Uncooled Infrared Imaging System: Design, Microfabrication, and Performance // Journal of Microelectromechanical Systems. April 2002. V. 11. № 2.