

Тепловые сенсоры на основе биморфных МЭМС для дистанционного контроля температурного распределения

И.А. Решетников¹, Д.Б. Рыгалин^{1,2},
Е.А. Фетисов^{1,2}, Р.З. Хафизов^{2,3}

¹ НИУ МИЭТ, ² ОАО «Зеленоградский
инновационно-технологический центр»,
³ ООО «Элем Инфо»

Температура – важнейшее свойство любых объектов. Контроль и измерение температуры – один из самых распространенных видов наблюдений за любыми объектами. Существует немало методов измерения и контроля температуры, однако один из самых «заманчивых» методов измерения является измерение температуры и пространственного распределения температуры по поверхности объектов дистанционно (пирометрия и термография), т.е. путем измерения интенсивности теплового излучения тел и определения его пространственного распределения.

Одним из перспективных направлений развития в пирометрии и термографии в последние годы стало применение микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе биморфных кантилеверов в качестве одноэлементных или многоэлементных (матричных) сенсоров (приемников) теплового излучения в диапазоне длин волн 7-14 мкм.

В основе функционирования данного типа сенсоров лежит термомеханический эффект, в соответствии с которым при изменении температуры приёмной части (теплочувствительной мембраны) происходит изгиб биматериальной микроконсоли. Изгиб возникает из-за разности коэффициентов теплового расширения (КТР) используемой пары материалов. Пара образуется из материала с малым КТР (например, из нитрида кремния) и из материала с большим КТР (например, из алюминия). Величина отклонения микроконсоли при изменении температуры наблюдаемого ИК-объекта на 1 К составляет от нескольких единиц до нескольких сотен нанометров.

Сенсоры на основе биморфных МЭМС имеют два основных вида реализации: сенсоры с электрическим и оптическим считыванием сигнала. В данной работе рассматриваются матричные тепловые сенсоры на МЭМС с оптическим считыванием сигнала.

В последние годы особый интерес для исследователей-разработчиков представляют матричные приемники инфракрасного излучения на основе биморфных структур. Приемники ИК-излучения на основе биморфных структур при правильном построении оптической системы смогут обеспечить эквивалентную шуму разность температур NETD ≈ 20 мК, в чем не уступают матрицам микроболлометров, при этом являясь технологически значительно менее сложными.

Данный тип матричных приемников теплового излучения в перспективе позволит создавать тепловизионные приборы нового поколения, которые смогут работать в жестких условиях эксплуатации, в том числе при воздействии ионизирующих излучений. Так, согласно литературным источникам, исследованные аналогичные структуры биморфных микрокантилеверов показали высокую

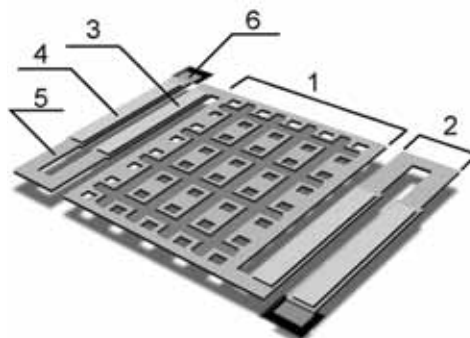


Рис. 1. Схематичное представление сенсора теплового излучения на биморфных МЭМС
Pic. 1. Schematic representation of a bimorph MEMS thermal sensor

устойчивость к воздействию λ -излучению и рентгеновскому излучению.

Силами нашего коллектива разработаны и изготовлены образцы матричных приемников теплового излучения на основе биморфных чувствительных элементов.

Чувствительные МЭМС элементы, являющиеся элементарными ячейками матрицы, представляют собой микрзеркала (или микрокантилеверы), подвешенные над Si подложкой на высоте около 2,5 мкм. Схематичное представление сенсора теплового излучения на биморфных МЭМС представлено на рис. 1.

Размер ячейки матрицы в плане составляет 25-50 мкм при суммарной толщине слоев менее 1 мкм. Теплочувствительная мембрана биматериального сенсора (см. рис. 1, поз. 1) изготовлена из нитрида кремния толщиной около 400 нм. Мембрана подвешена над поверхностью подложки на расстоянии примерно

500 нм с помощью микроконсоль (поз. 2), которые также изготовлены из нитрида кремния.

Для уменьшения деформаций, возникающих в процессе изготовления, мембрана содержит армирующую сетку (рёбра жёсткости). Микроконсоли биматериальных приёмников имеют два плеча. Одно плечо – рабочее (поз. 3), дающее отклик на изменение температуры, и второе плечо – компенсирующее (поз. 4), оно предназначено для предотвращения нагрева чувствительных элементов от подложки. Кроме того, компенсирующее плечо служит для противодействия термическим деформациям, которые возникают в ходе выполнения высокотемпературных технологических операций при изготовлении. Для снижения теплообмена между чувствительным элементом и подложкой микроконсоль имеет участок термоизоляции (поз. 5). Биматериальный ИК-приёмник крепится к подложке в двух местах (поз. 6). С целью снижения теплообмена между чувствительным элементом и подложкой ИК-приёмник должен размещаться в вакуумированном корпусе.

На рис. 2 показана последовательность технологических операций формирования теплового сенсора на биморфных МЭМС. Исходной подложкой для формирования теплового сенсора на основе биморфных МЭМС является монокристаллический Si. Процесс изготовления состоит из 5 – 7 фотолитографических циклов и включает в себя следующие основные процессы формирования элементов: осаждение жертвенного слоя SiO_2 ; осаждение Si_3N_4 ; напыление и травление слоев NiCr и Al ; травление слоя Si_3N_4 и наконец удаление жертвенного слоя. Таким образом, технологические

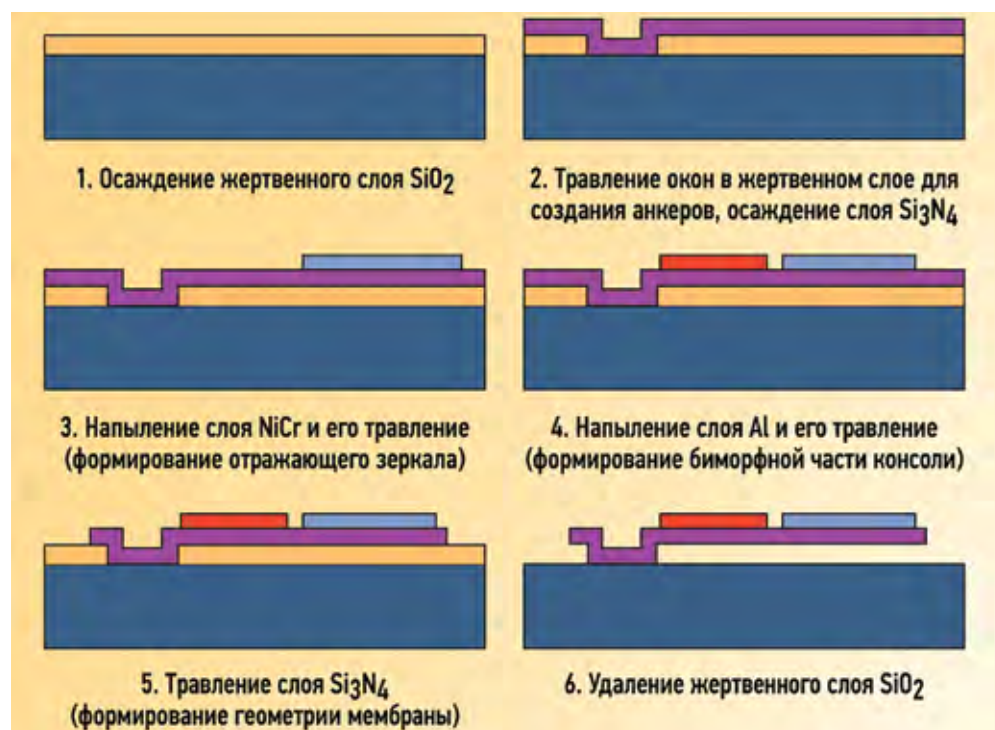


Рис. 2. Последовательность технологических операций для формирования теплового сенсора на биморфных МЭМС

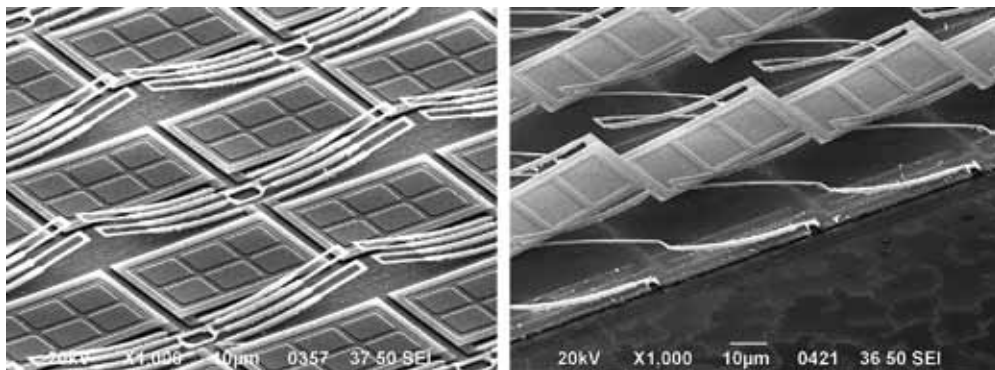


Рис. 3. Изображения элементов биморфных МЭМС, имеющие различные конструкции
Pic. 3. Images of bimorph MEMS elements of various construction

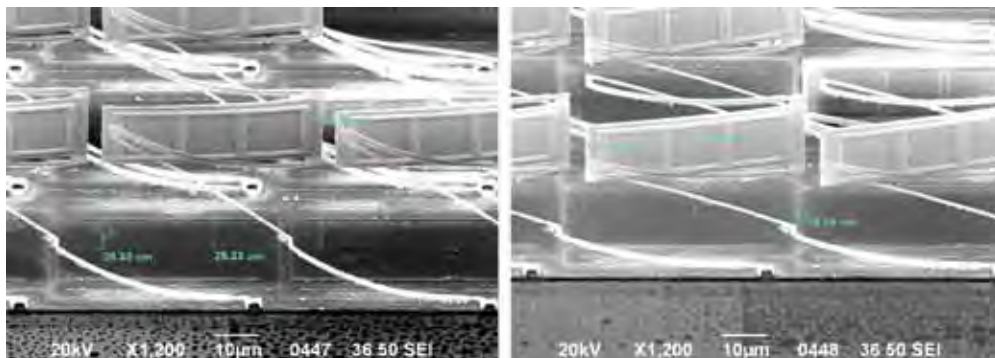


Рис. 4. Изображения ячеек теплового сенсора, находящихся при двух различных температурах: – 24°C (справа) и +150°C (слева) / Pic. 4. Cells of a thermal sensor under two different temperatures – 24°C (on the right) и +150°C (on the left)

операции, применяемые при изготовлении сенсоров на биморфных МЭМС, совместимы со стандартными технологическими процессами микроэлектроники.

В результате проведенных работ нашему коллективу удалось разработать и изготовить экспериментальные образцы тепловых сенсоров на основе биморфных МЭМС со степенью интеграции до 160x120 элементов.

На рис. 3 приведены изображения элементов биморфных МЭМС, имеющие различные конструкции. Изображения получены с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

На изображениях четко видны теплочувствительные мембраны, подвешенные над подложкой на биматериальных консолях. Высота подъема мембраны (без воздействия температуры) зависит от конфигурации биматериальной консоли и способа закрепления мембраны и консоли (по одной стороне мембраны или по диагонали).

Для измерения термомеханических деформаций тепловых сенсоров использовался РЭМ JSM-6490LV (Jeol, Япония) и вакуумсовместимый столик, обеспечивающий установку, под-

держание и измерение температуры образца от -30°C до +160°C. Применение данного оборудования позволило визуально наблюдать за функционированием биморфных сенсоров под воздействием температуры.

На рис. 4 приведены изображения ячеек теплового сенсора, находящихся при двух различных температурах: – 24°C (справа) и +150°C (слева). По установленным маркерам можно оценить величину отклонения теплочувствительной мембраны относительно подложки в диапазоне температур, для данного образца оно составило 10 мкм.

Проведенные таким методом исследования полученных экспериментальных образцов с различными конфигурациями сенсоров позволили вычислить термомеханическую чувствительность $K=(z_1-z_2)/(T_2-T_1)$, которая составила около 100 нм/°C (для наиболее удачных конфигураций чувствительных элементов).

Следующим этапом в исследовании тепловых сенсоров на основе МЭМС стало проецирование ИК-изображения на матрицу сенсоров. Спроецированное на матрицу тепловых сенсоров изображение должно привести к изменению положения (высоты) теплочувстви-

тельных мембран, что приведет к изменению всего рельефа матрицы.

Для исследования рельефа матрицы, находящейся под воздействием ИК-излучения, был использован оптический профилометр (интерферометрический микроскоп) Wyko NT9300 (Bruker, Германия) и отдельные компоненты, включающие в себя вакуумный корпус с входными окнами, прозрачными в видимой или ИК-области (7-14 мкм) спектра, а также ряд компонентов, позволяющих закрепить компоненты стенда на оптической оси под объективом микроскопа. В качестве источника ИК-излучения использовалось абсолютно черное тело Micron 316, а также ряд стандартных оптомеханических компонентов, позволяющих спроецировать изображение на матрицу. Фотография стенда для исследования отклика матрицы приведена на рис. 5 (справа) и вакуумная камера с размещенной в ней матрицей тепловых сенсоров на МЭМС (слева).

В данный момент исследования матриц тепловых сенсоров на МЭМС не закончены и проводятся на приведенном выше стенде, а также с помощью тепловизионного микроскопа FLIR SC5700 с разрешением по температуре 25 мК.

Выводы

Разработанные тепловые сенсоры на МЭМС имеют следующие преимущества: более дешёвое производство по сравнению с производством ИК-приемников на основе микроболюметров; нет необходимости в охлаждении приёмника до криогенных температур; данный тип приемников обещает быть более устойчивым к воздействию специальных факторов.

Для построения приборов на основе разработанных тепловых сенсоров на МЭМС существует ряд технических проблем, однако преодоление этих сложностей позволит создать тепловизор, обладающий рядом преимуществ относительно существующих на данный момент промышленных технологий.

Предложенные матрицы тепловых сенсоров на МЭМС могут найти широкое применение в аппаратуре, применяемой как в военной, так и в гражданской сферах. В качестве гражданского применения следует отметить такие области, как строительство, промышленность, энергетика и жилищно-коммунальное хозяйство, автотранспорт, службы спасения в медицине.

Работа выполнена при поддержке министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.514.11.4074).



Рис. 5. Фотография стенда и вакуумная камера с размещенной в ней матрицей тепловых сенсоров на МЭМС
Pic. 5. Photo of a stand and a vacuum chamber containing a matrix of MEMS thermal sensors (to the left)

Thermal Sensors Based on Bimorph MEMS for Remote Control over Thermal Distribution

**I. Reshetnikov¹, D. Rygalin^{1,2},
E. Fetisov^{1,2}, R. Khafizov^{2,3}**

**¹ National Research University of
Electronic Technology MIET, ² «Zelenograd
innovation and technology centre» OJSC
(ZITC), ³ «Elem Info» LLC**

Temperature is the most important property of all the objects. Temperature measurement and control represent one of the most common methods of site surveillance. There are numerous approaches to measuring and controlling the temperature, but one of the most attractive measurement methods implies remote measuring of the temperature and spatial thermal distribution over the surface of objects (pyrometry and thermography), that is through measuring the intensity of thermal radiation of bodies and determining its spatial distribution.

An upcoming trade in pyrometry and thermography development today is application of microelectromechanical systems (MEMS) based on the bimorph cantilevers as single or multi (matrix) sensors (detectors) of thermal radiation in the wavelength range of 7-14 microns.

Sensors of this type operate based on the principle of thermomechanical effect, according to which temperature variation of a receiving part (thermosensitive membrane) causes bimaterial microcantilever bending. Bending occurs because two types of materials used are different in coefficients of thermal expansion (CTE). A twin is formed from a material with low CTE (e.g. silicon nitride), and a high CTE material (such as aluminum). The rate of microcantilever deflection, that occurs when the temperature of an observed infrared object changes by 1 K, varies from a few to several hundred nanometers.

Bimorph MEMS-based sensors have two main types of implementation: sensors with electrical or optical signal reading. In this paper we shall consider matrix thermal MEMS-based sensors with optical signal reading.

In recent years, R&D developers take particular interest in matrix infrared detectors based on bimorph structures. Subject to proper construction of the optical system IR radiation detectors based on bimorph structures can provide noise equivalent temperature difference NETD ≈ 20 mK, thus they are in no way inferior to microbolometer matrices, while being considerably less technologically sophisticated.

In the long run this type of matrix thermal detectors will enable a new generation of thermal imaging devices that can operate in harsh environment, including the effects of ionizing radiation. Thus, according to published sources, after proper examination similar structures of bimorph microcantilevers showed high resistance to λ -rays and X-rays.

Due to joint efforts of our team samples of matrix thermal detectors based on bimorph sensor elements were designed and manufactured.

Sensitive MEMS elements that are elementary cells of the matrix represent micromirrors (or microcantilevers) suspended above the Si substrate at the height of about 2.5 microns. Schematic representation of a bimorph MEMS thermal sensor is shown on Pic. 1.

The mesh size in a matrix under the plan is 25-50 microns, with a total layer thickness of less than 1 micron. A bimaterial thermosensitive membrane in a sensor (see Pic. 1, Pos. 1) is made of silicon

nitride about 400 nm thick. The membrane is suspended above the substrate at a distance of approximately 500 nm using microcantilevers (Pos. 2), which are also made of silicon nitride.

To reduce deformations that may occur while manufacture, the membrane comprises a reinforcing net (stiffeners). Microcantilevers of bimaterial detectors have two shoulders. One shoulder is a working one (Pos. 3), which provides feedback on changes in temperature, whereas the other is a compensating shoulder (Pos. 4) designed to prevent heating of substrate sensitive elements. Moreover, a compensating shoulder serves to counteract thermal deformations arising while manufacture during high-temperature technological operations. To reduce thermal exchange between a sensor element and a substrate a microcantilever has an area of thermal insulation (Pos. 5). A biomaterial IR detector is attached to a substrate at two locations (Pos. 6). In order to reduce thermal exchange between a sensor element and a substrate an IR detector shall be placed into a vacuumized housing.

Picture 2 shows a sequence of technological operations aimed at forming a bimorph MEMS thermal sensor. A blank substrate for forming a bimorph MEMS thermal sensor is a single-crystal Si. The manufacturing process consists of 5-7 photolithographic cycles and includes the following basic processes of forming the elements: deposition of SiO₂ sacrificial layer; deposition of Si₃N₄; deposition and etching of NiCr and Al layers; Si₃N₄ layer etching, and finally, removing the sacrificial layer. Thus, technological operations applied in production of bimorph MEMS sensors are compatible with standard microelectronic processes.

As a result of joint efforts undertaken by our team experimental samples of MEMS bimorph thermal sensors with an integration degree of up to 160x120 elements were designed and manufactured.

Pic. 3 shows images of bimorph MEMS elements of various construction. Images were obtained through a scanning electron microscope (SEM).

Images clearly show thermosensitive membranes suspended over the substrate on bimaterial cantilevers. Membrane rising height (under no temperature impact) depends on the configuration of a bimaterial cantilever and the method of fixing a membrane and a cantilever (along one side of the membrane or cornerwise).

To measure thermomechanical deformations of thermal sensors, they used a scanning electron microscope JSM 6490LV (Jeol, Japan) together

with a vacuum-compatible table ensuring installation, maintenance and measurement of a sample temperature from -30°C to +160°C. Application of such equipment allowed to visually observe functioning of bimorph sensors under temperature impact.

Pic. 4 shows cells of a thermal sensor located under two different temperatures – 24°C (on the right) и +150°C (on the left). By established markers one can estimate the rate of a thermosensitive membrane deflection against a substrate in a temperature range; for the given sample, deflection was 10 microns.

Research conducted using such method into experimental samples obtained with different configurations of sensors allowed to calculate thermomechanical sensitivity of $K=(z_1-z_2)/(T_2-T_1)$, which approximated 100 nm/°C (for most successful configurations of sensitive elements).

The next step in studying MEMS-based thermal sensors implied projecting of an infrared image onto a matrix of sensors. Projected on the matrix of thermal sensors the image should lead to a change in position (height) of thermosensitive membranes, which then leads to changes in matrix relief.

In order to study topography of the matrix exposed to infrared radiation an optical profilometer (interferometric microscope) Wyko NT9300 (Bruker, Germany) has been used together with individual components comprising a vacuum housing with inlet windows transparent in the visible or infrared (7-14 m) area of the spectrum, as well as a number of components used to fix the components of the stand on the optical axis under the microscope lens.

Sources of infrared radiation included a blackbody Micron 316, as well as a number of standard optomechanical components used to project an image onto the matrix. Photo of a stand used to research matrix response is shown on Pic. 5 (to the right) together with a vacuum chamber containing a matrix of MEMS thermal sensors (to the left).

Currently studies into matrices of MEMS thermal sensors are not finished and are held on the above stand, and using a thermal imaging microscope FLIR SC5700 with temperature resolution of 25 mK.

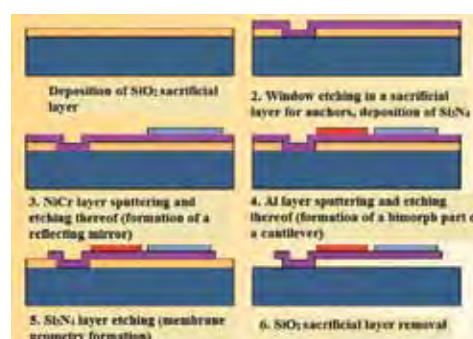
Conclusions

The designed MEMS thermal sensors have the following advantages: cheaper production compared to the production of microbolometer-based IR detectors; there is no need to cool a detector to cryogenic temperatures; this type of detector is going to be more resistant to the impact of special factors.

In order to build devices based on such MEMS thermal sensors one has to overcome a number of technical problems, but meeting these challenges will enable a thermal imager characterized by certain advantages over currently existing industrial technologies.

The proposed array of matrices of MEMS thermal sensors can be widely applied in equipment used in both military and civilian domains. Civil application shall include such areas as construction, industry, energy, housing and utilities, transport, medical emergency services.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state contract No. 14.514.11.4074).



Sequence of technological operations enabling the formation of a bimorph MEMS thermal sensor