

УДК: 681.586.62; 536.516.2; 629.5.052.5; 629.3.052.5; 681.586.36; 531.728

Термомеханическая чувствительность неохлаждаемого биматериального приёмника ИК-диапазона, построенного по технологии микрооптомеханических систем

Р.З. Хафизов, Е.А. Фетисов, Р.В. Лапшин,
Е.П. Кириленко, В.Н. Анастасьевская, И.В. Колпаков

Дана методика определения термомеханической чувствительности неохлаждаемого ИК-приёмника, использующего биматериальный эффект для преобразования энергии падающего ИК-излучения в механический отклик. Механический отклик в виде плоско-параллельного смещения мембраны, закреплённой на биматериальных микроконсолях, преобразуется далее в оптический отклик. Для измерения термомеханической чувствительности собран исследовательский оптико-электронный стенд, основой которого является оптический профилометр (интерференционный микроскоп) с субнанометровым вертикальным разрешением. Биматериальный ИК-приёмник изготовлен по технологии микрооптомеханических систем (МОМС) для работы в диапазоне 8–14 мкм. Термомеханическая чувствительность приёмника при измерениях на воздухе составила 7,5 нм/К.

PACS: 07.57.Kp; 42.79.Pw; 85.60.Gz; 65.40.De; 44.40.+a; 85.85.+j

Ключевые слова: неохлаждаемый ИК-приёмник, термомеханическая чувствительность, биматериальный эффект, биматериальный элемент, биморфный элемент, микроконсоль, мембрана.

Введение

Неохлаждаемые биматериальные тепловые приёмники с оптическим считыванием, создаваемые по технологии микрооптомеханических систем (МОМС), относятся к перспективным приёмникам излучения ИК-диапазона [1–8]. В основе функционирования данного типа устройств лежит термомеханический эффект, в соответствии с которым при изменении температуры приёмной площадки происходит изгиб биматериальной микроконсоли. Изгиб возникает из-за разности коэффициентов теплового расширения (КТР) а пары материалов, из которых изготовлена биматериальная микроконсоль. При изменении температуры на 1 К отклонение крайней точки микроконсоли при изгибе может достигать нескольких сотен нанометров [2–5].

Целью настоящей работы является определение термомеханической чувствительности разработанного микромеханического неохлаждаемого биматериального ИК-приёмника МОМС с оптическим считыванием. В качестве устройства, обеспечивающего оптическое считывание, используется оптический профилометр (интерференционный микроскоп) с субнанометровым вертикальным разрешением. Полученные экспериментальные результаты позволяют провести анализ работы приёмника и на основе этого анализа внести в конструкцию и технологию соответствующие изменения, улучшающие чувствительность устройства. Оценка теоретического предела разрешения по температуре для рассматриваемого типа ИК-приёмников составляет 5–15 мК [1–5].

Устройство биматериального ИК-приёмника

На рис. 1 показано устройство неохлаждаемого биматериального ИК-приёмника МОМС. Приёмник состоит из поглощающей падающее ИК-излучение мембраны и двух узких биматериальных микроконсолей, удерживающих мембрану над подложкой. Микроконсоли имеют биматериальный участок (расположен ближе к мембране) и участок термоизоляции (расположен ближе к подложке). Микроконсоли решают две задачи — производят механическое перемещение мембраны пропорционально интенсивности падающего теплового излучения и обеспечивают термоизоляцию мембраны, удерживая последнюю на некотором расстоянии от подложки.

Хафизов Ренат Закирович, научный сотрудник¹.
Фетисов Евгений Александрович, начальник отдела¹.
Лапшин Ростислав Владимирович, научный сотрудник^{1,2}.
Кириленко Елена Петровна, ведущий инженер¹.
Анастасьевская Виктория Николаевна, студент¹.
Колпаков Игорь Владимирович, студент¹.

¹Московский институт электронной техники.
Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, 5.
Тел.: 8 (499) 720–69–59. E-mail: fetisov@dtd.miee.ru

²НИИ Физических проблем им. Ф. В. Лукина.
Россия, 124460, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, 6.

Статья поступила в редакцию 15 января 2013 г.

© Хафизов Р.З., Фетисов Е.А., Лапшин Р.В., Кириленко Е.П., Анастасьевская В.Н., Колпаков И.В., 2013

Разработанная конструкция биматериального приёмника обладает высоким термосопротивлением, препятствующим оттоку на подложку теплового излучения, поглощённого мембраной. Хорошая термоизоляция обеспечивается вакуумным зазором между мембраной и подложкой (в окончательном виде устройство монтируется в вакуумированный корпус), а также конструкцией и подбором материалов микроконсоли.

Чувствительная к ИК-излучению мембрана изготовлена из нитрида кремния путём вытравливания расположенного под ней жертвенного слоя из оксида кремния. Толщина мембраны составляет около 400 нм. Для улучшения доступа травителя к жертвенному слою в мембране предусмотрены отверстия, равномерно распределённые по её поверхности [2, 3]. Мембрана подвешена над поверхностью подложки на расстоянии примерно 500 нм с помощью узких микроконсоль шириной 8 мкм. Биматериальные участки консолей образованы слоем алюминия ($\alpha_{\text{Al}}=25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и основой из нитрида кремния ($\alpha_{\text{Si}_3\text{N}_4}=0,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Рабочий диапазон ИК-приёмника составляет 8–14 мкм.

Для снижения влияния термомеханических деформаций, возникающих в мембране в процессе изготовления, в мембрану введена армирующая сетка [2, 3]. На первом этапе технология армирования мембраны заключается в формировании на поверхности жертвенного слоя канавок. После осаждения слоя, образующего тело мембраны, из этих канавок формируются рёбра жёсткости создаваемой мембраны.

Среди конструкций биматериальных приёмников прорабатывались варианты с двухплечевыми встречно-включёнными консолями, которые позволяют скомпенсировать термические деформации, возникающие в биматериальных элементах после высокотемпературных технологических операций [2, 3]. Кроме того, приёмник с двухплечевыми консолями имеет лучшую термоизоляцию и позволяет компенсировать смещение мембраны

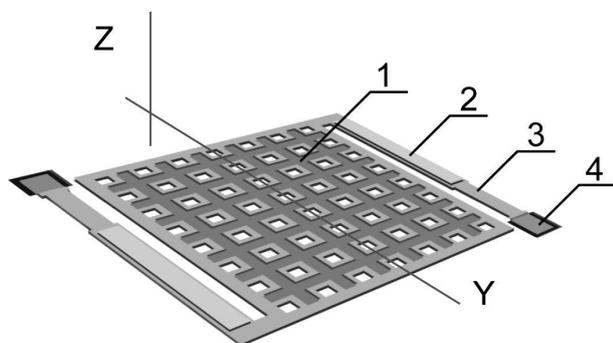


Рис. 1. Устройство неохлаждаемого биматериального ИК-приёмника МОМС. 1 — приёмная мембрана, 2 — биматериальная микроконсоль, 3 — участок термоизоляции микроконсоли, 4 — место крепления микроконсоли к подложке (якорь).

при её нагреве от подложки в процессе работы устройства.

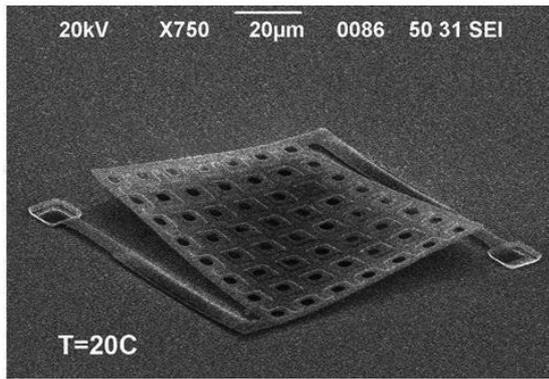
Методика и результаты измерений

Оптико-электронный стенд для определения термомеханической чувствительности биматериального ИК-приёмника МОМС включает: измеряемый ИК-приёмник, установленный на нагреватель, и оптический профилометр Wyko NT9300 (Bruker, Германия) [9–11]. Нагреватель представляет собой элемент Пельтье, оборудованный откалиброванным датчиком температуры (термосопротивлением), и способен разогревать образцы до температуры +100 °С. Измерения на профилометре проводились при атмосферном давлении, что заметно ухудшает чувствительность биматериальных ИК-приёмников.

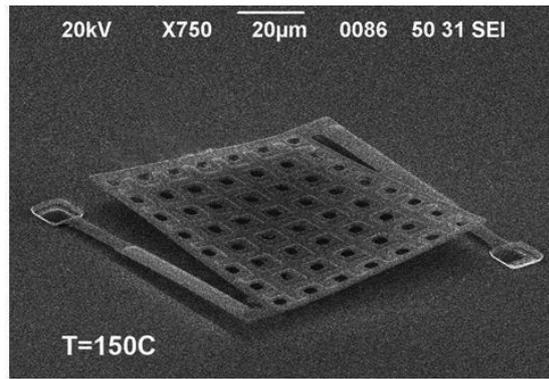
Оптический профилометр обеспечивает бесконтактный способ измерения топографии поверхности с перепадами высоты до 10 мм и вертикальным разрешением 0,1 нм. Латеральное разрешение профилометра невысокое, около 0,5 мкм. Поля зрения в зависимости от задаваемого увеличения (от 1,4× до 230× ступенчато) лежат в диапазоне от 4,6×3,5 мм² до 30×30 мкм². Измерения биматериального ИК-приёмника МОМС выполнялись с использованием режимов вертикальной сканирующей интерферометрии (ВСИ) и вертикальной сканирующей интерферометрии высокого разрешения. Последний режим сочетает субнанометровое вертикальное разрешение и большой вертикальный диапазон.

Для измерения термомеханических деформаций также использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM-6490LV (Jeol, Япония). Нагрев образцов в РЭМ осуществлялся при помощи специального вакуумсовместимого столика МКЗ Coolstage (Deben, Великобритания), имеющего встроенный элемент Пельтье. Указанный столик обеспечивает установку и поддержание температуры в диапазоне от –25 °С до +150 °С. РЭМ имеет большие поля зрения, способен изобразить отдельные элементы ИК-приёмника МОМС с большим увеличением, а также обладает возможностью наблюдения исследуемого объекта под разными углами. С помощью РЭМ определялось качество удаления жертвенного слоя (освобождение мембраны), а также контролировался фазовый состав поверхности. Анализ фазового состава осуществлялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на приборе INCA Energy (Oxford Instruments, Англия), встроенном в РЭМ.

Применение методов оптической профилометрии и растровой электронной микроскопии по-



а



б

Рис. 2. Неохлаждаемый биматериальный ИК-приёмник МОМС при температуре (а) 20 °С, (б) 150 °С. Изображения получены на РЭМ.

зволяет визуализировать работу биматериальных приёмников МОМС. Более того, соединяя последовательность изображений, полученных при изменении температуры, можно наблюдать изменение механических реакций элементов приёмника на тепловые воздействия. На рис. 2 представлены РЭМ-изображения приёмника МОМС при двух различных температурах $T=20$ °С и $T=150$ °С. На рисунке хорошо видно, что при комнатной температуре наблюдается диагональная деформация мембраны, которая снимается при нагреве.

Нагрев приёмника вызывает изгиб микроконсолей, что ведёт к перемещению мембраны. Количественно перемещение мембраны оценивалось с помощью оптического профилометра путём измерения профиля мембраны при различных температурах (см. рис. 3). Путём определения вертикального смещения профиля мембраны δz при изменении температуры на δT , находится коэффициент термомеханической чувствительности $K = \delta z / \delta T$.

Результаты измерений на воздухе представлены на рис. 4. Полученный коэффициент термомеханической чувствительности K равен 7,5 нм/К.

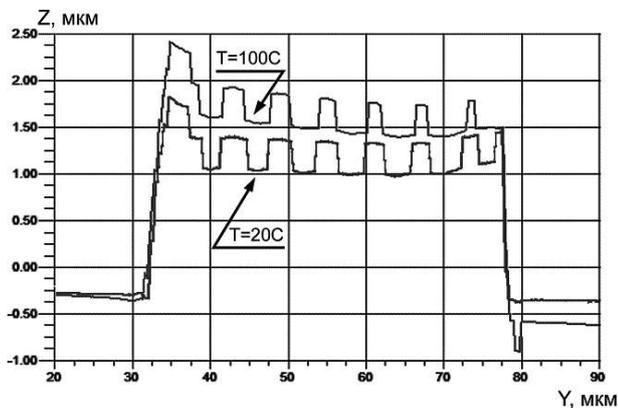


Рис. 3. Положения мембраны биматериального ИК-приёмника МОМС при различных температурах. Измерение профиля мембраны выполнено на оптическом профилометре.

Заключение

С помощью метода оптической профилометрии определён коэффициент термомеханической чувствительности неохлаждаемого биматериального ИК-приёмника МОМС с оптическим считыванием. Найденный коэффициент получен на воздухе, где теплообмен приёмной мембраны и подложки достаточно велик. Для устранения теплообмена запланированы эксперименты в условиях низкого и среднего вакуума, для чего разработана специальная вакуумная камера (предельное остаточное давление в камере 10^{-5} Торр).

На основе полученных результатов выработаны рекомендации технологам и конструкторам прибора по дальнейшему повышению чувствительности неохлаждаемого биматериального ИК-приёмника.

Авторы выражают благодарность А. М. Белину за обсуждение и помощь, оказанную при проведении измерений, В. И. Золотарёву и Г. А. Рудакову за изготовление экспериментальных образцов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.426.11.0045).

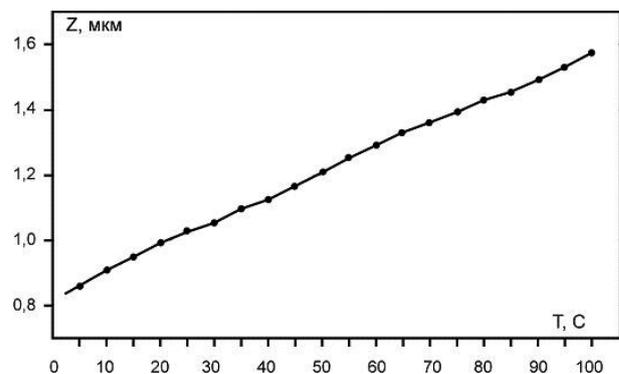


Рис. 4. Зависимость смещения мембраны биматериального ИК-приёмника МОМС от температуры. Коэффициент термомеханической чувствительности $K = 7,5$ нм/К.

Литература

1. Datskos P. G., Lavrik N. V., Rajic S. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. No. 4. P. 1134
2. Hunter S. R., Maurer G. S., Simelgor G., Radhakrishnan S., Gray J. // Proc. of SPIE. 2007. V. 6542. P. 1
3. Hunter S. R., Maurer G. S., Simelgor G., et al. // Proc. of SPIE. 2008. V. 6940. P. 1
4. Toy M. F., Ferhanoglu O., Torun H., Urey H. // Sens. Actuat. A. 2009. V. 156. P. 88
5. Rogalski A. Infrared detectors. — Boca Raton: CRC Press, 2nd ed., USA, 2011.
6. Budzier H., Gerlach G. Thermal infrared sensors: theory, optimisation and practice — John Wiley & Sons, UK, 2011.
7. Zhao Y., Choi J., Horowitz R., et al. // Proc. of SPIE. 2003. V. 4820. P. 164.
8. Li C., Jiao B., Shi S., Chen D., et al. // Meas. Sci. Technol. 2006. V. 17. P. 1981
9. Serry F. M., Stout T. A., Zecchino M. J., et al.. 3D MEMS metrology with optical profilers. — Tucson: Veeco Instruments Inc., USA, 2006.
10. Zecchino M., Forest C. R. Quantifying laser-induced thermal deformation of a MEMS device static and dynamic optical profiling characterize heating-cooling cycle. — Tucson: Veeco Instruments Inc., USA, 2004.
11. Novak E. Low-noise interferometry enables characterization of steep and rough surfaces. — Tucson: Veeco Instruments Inc., USA, 2008.

Thermomechanical sensitivity of uncooled bimaterial detector of IR-range fabricated by technology of microoptomechanical systems

*R.Z. Khafizov¹, E.A. Fetisov¹, R.V. Lapshin^{1, 2},
E.P. Kirilenko¹, V.N. Anastasyevskaya¹, and I.V. Kolpakov¹*

¹National Research University of Electronic Technology
bldg. 5, passage 4806, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
E-mail: fetisov@dsd.miee.ru

²F.V. Lukin Institute of Physical Problems
bldg. 6, passage 4806, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

A method is presented intended for determination of thermomechanical sensitivity of the uncooled IR-detector which uses bimaterial effect for energy transformation of incident IR-radiation into a mechanical response. The mechanical response in the form of plane-parallel movement of a membrane resting on bimaterial beams is further transformed into an optical signal. To measure the thermomechanical sensitivity, an optoelectronic exploratory bench based on the optical profiler (interference microscope) having subnanometer resolution is assembled. The bimaterial IR-detector is fabricated by technology of microoptomechanical systems (MOMS) and operates in 8–14 μm range. The measured in air thermomechanical sensitivity of the detector makes 7.5 nm/K.

PACS: 07.57.Kp; 42.79.Pw; 85.60.Gz; 65.40.De; 44.40.+a; 85.85.+j

Keywords: uncooled IR-detector, thermomechanical sensitivity, bimaterial effect, bimaterial element, bimorph element, microbeam, membrane.

Bibliography — 11 references

Received January 15, 2013