

Перспективные интегральные матричные приемники теплового излучения с оптическим считыванием

*Д.Б. Рыгалин^{1,2}, Е.А. Фетисов¹, Р.З. Хафизов², В.И. Золотарев¹,
И.А. Решетников¹, Г.А. Рудаков³, Р.В. Лапшин⁴, Е.П. Кириленко¹*

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

²ОАО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (г. Москва)

³НПК «Технологический центр» (г. Москва)

⁴НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина (г. Москва)

Рассмотрены ИК-приемники нового типа, использующие биматериальный эффект для преобразования ИК-излучения в оптический отклик. Предложен ряд конструкций биматериальных ИК-приемников, на основе которых создано несколько матриц различной размерности. Моделирование работы биматериальных ИК-приемников выполнено в системе ANSYS. В ходе измерений определена термомеханическая чувствительность приемников, которая составила порядка 100 нм/К.

Ключевые слова: ИК-приемник, ИК-сенсор, микрооптомеханическая система, МОМС, ИК-излучение, ИК-камера, тепловизор, термомеханический эффект, биматериальный элемент, биморфный элемент, микроконсоль, мембрана, термокомпенсация.

Интегральные биматериальные матричные приемники теплового излучения, изготовленные по технологии микрооптомеханических систем (МОМС), относятся к перспективным приемникам излучения для ИК-диапазона [1, 2]. В основе функционирования данного типа устройств лежит термомеханический эффект, в соответствии с которым при изменении температуры приемной части (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, нитрида кремния) и из материала с большим КТР (например, алюминия). Величина отклонения микроконсоли при изменении температуры наблюдаемого ИК-объекта на 1 К составляет от нескольких единиц до нескольких сотен нанометров. Обоснованность решений, заложенных в конструкции разработанных приемников МОМС, проверялась путем измерения их термомеханической чувствительности.

Приемная мембрана 1 биматериального ИК-приемника (рис.1) изготовлена из Si_3N_4 толщиной около 400 нм, покрытая тонким слоем NiCr [3]. Мембрана подвешена над поверхностью подложки на расстоянии примерно 500 нм с помощью микроконсольей 2, которые также изготовлены из Si_3N_4 . Микроконсоли имеют биматериальные участки, образованные слоем алюминия толщиной около 500 нм. Для уменьшения деформаций, возникающих в процессе изготовления ИК-приемников, мембрана содержит армирующую сетку (ребра жесткости). Микроконсоли биматериальных приемников имеют два состоящих из Si_3N_4 и Al участка (плеча) – основной 3, дающий отклик на изменение температуры ИК-объекта, и компенсирующий 4, предназначенный для сведения на нет нагрева чувствительных элементов прибора от подложки в процессе работы приемника. Кроме того, ком-

пенсирующее плечо служит для противодействия термическим деформациям, которые возникают в ходе выполнения высокотемпературных технологических операций при изготовлении МОМС. Для снижения теплообмена между чувствительным элементом и подложкой микроконсоль имеет участок термоизоляции 5. Биматериальный ИК-приемник крепится к подложке в двух местах 6. С целью существенного снижения теплообмена между чувствительным элементом и подложкой прибор размещается в вакуумированном корпусе.

На рис.2 показана последовательность основных технологических операций изготовления биматериальных ИК-приемников МОМС.

Для измерения термомеханических деформаций ИК-приемников использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM-6490LV (Jeol, Япония) и оптический профилометр (интерферометрический микроскоп) Wyko NT9300 (Bruker, Германия) [4]. Температура подложки матрицы МОМС задавалась при помощи вакуумсовместимого столика МКЗ (Deben, Великобритания), обеспечивающего установку, поддержание и измерение температуры образца от -30 до $+160$ °С. Особенностью используемых методов исследования является возможность визуального наблюдения за функционированием биматериальных МОМС.

На рис.3 представлены микрофотографии приемника МОМС с удлиненными консолями, которые позволяют увеличить механическое смещение мембраны. Микрофотографии сняты при температурах -24 и $+150$ °С. При охлаждении микроконсоли выгибаются в направлении от подложки, при нагреве – к подложке, так как слой алюминия, образующий биматериальный участок, находится сверху.

По РЭМ-изображениям на рис.3 с учетом угла наклона образца 60° определены положения концов микроконсолей $z_1 = 39,4$ мкм, $z_2 = 22,4$ мкм при температурах $T_1 = -24$ °С и $T_2 = +150$ °С соответственно. Термомеханическая чувствительность $K = (z_1 - z_2)/(T_2 - T_1)$ составила около 98 нм/К.

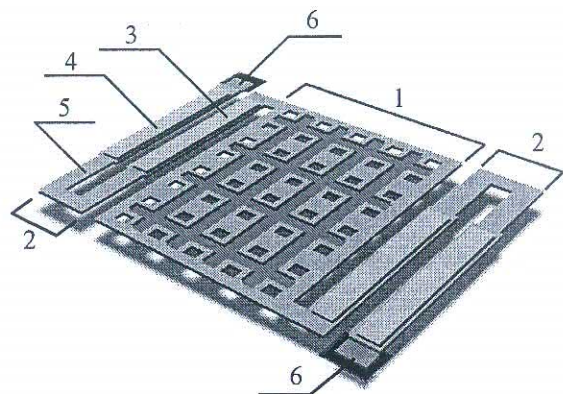


Рис.1. Конструкция чувствительного элемента неохлаждаемой ИК-матрицы МОМС: 1 – приемная мембрана; 2 – микроконсоли; 3, 4 – основной и компенсирующий биматериальный участок микроконсоли соответственно; 5 – участок термоизоляции; 6 – места крепления микроконсоли к подложке (анкер). Размеры чувствительного элемента 50×50 мкм

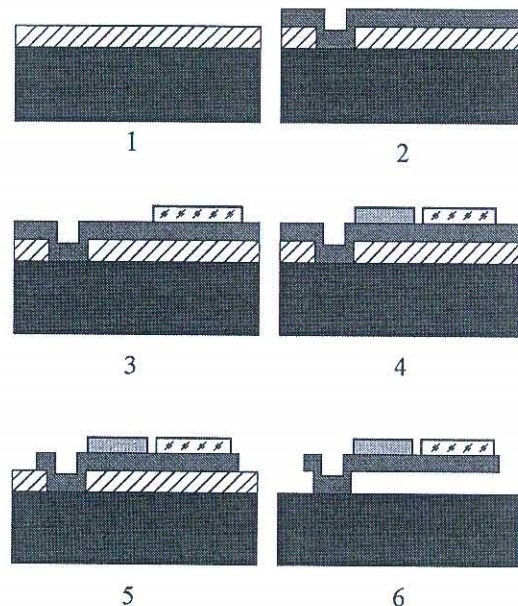


Рис.2. Основные технологические операции по изготовлению биматериальных неохлаждаемых ИК-приемников МОМС: 1 – осаждение жертвенного слоя SiO_2 ; 2 – травление окон в жертвенном слое для создания анкеров, осаждение слоя Si_3N_4 ; 3 – напыление слоя NiCr и его травление (формирование отражающего зеркала); 4 – напыление слоя Al и его травление (формирование биматериальной части консоли); 5 – травление слоя Si_3N_4 (формирование геометрии мембраны); 6 – удаление жертвенного слоя SiO_2

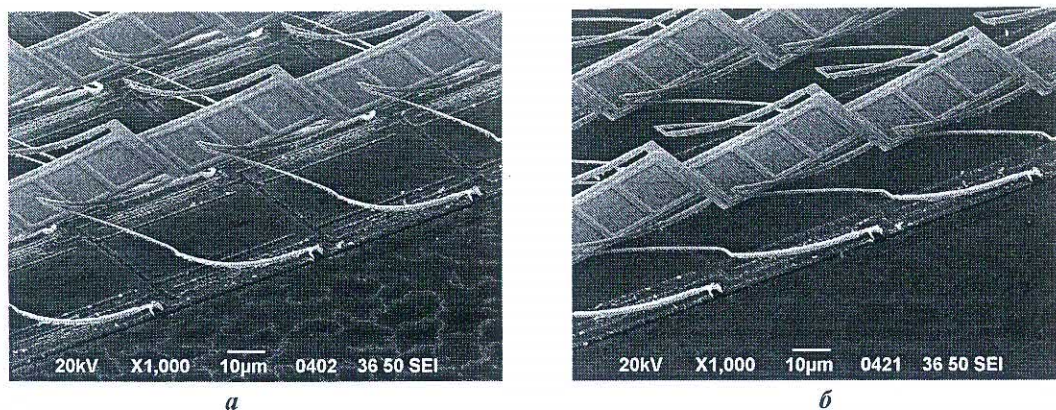


Рис.3. РЭМ-изображение биматериального ИК-приемника МОМС с удлиненными микроконсолями при температуре подложки -24°C (а) и $+150^{\circ}\text{C}$ (б)

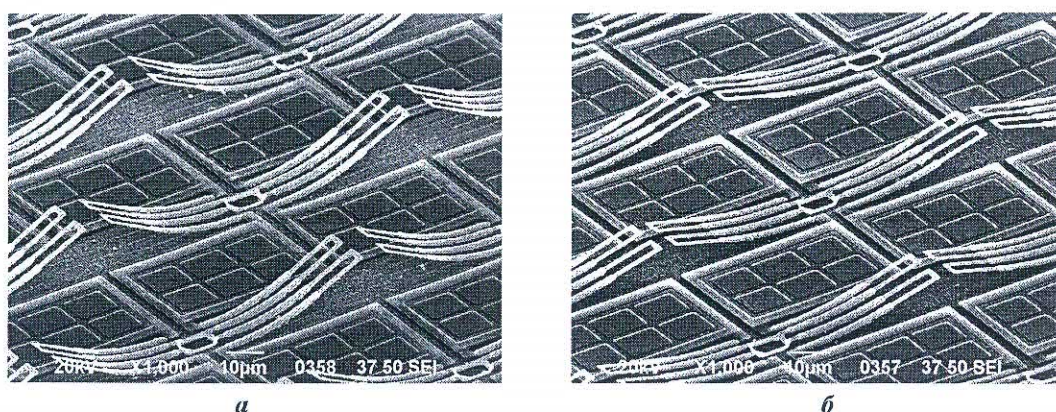


Рис.4. РЭМ-изображение биматериального ИК-приемника МОМС с термокомпенсацией при температуре подложки -24°C (а) и $+150^{\circ}\text{C}$ (б)

Конструкция приемника, представленного на рис.4, предусматривает компенсацию первоначального изгиба микроконсоль. Неизменное положение мембран-зеркал во всем диапазоне задаваемых температур подтверждает эффективность термокомпенсирующего механизма, заложенного в конструкцию этого приемника.

Сравнительные измерения различных вариантов биматериальных приемников МОМС позволяют определить наилучшие конструктивные решения для неохлаждаемых матричных ИК-приемников с оптическим считыванием.

Разработанные ИК-матрицы МОМС имеют следующие преимущества: более дешевое производство по сравнению с производством ИК-приемников на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) с электрическим считыванием; нет необходимости в охлаждении приемника до низких температур.

Предложенные ИК-матрицы могут найти широкое применение как в военной, так и в гражданской сферах. В качестве гражданского применения следует отметить такие области, как строительство, промышленность, энергетика и жилищно-коммунальное хозяйство, где требуется выявлять и ликвидировать тепловые потери, а также автотранспорт, где безопасность движения на дорогах в сумерках, в тумане и в ночное время можно значительно повысить, оснастив автомобили относительно дешевыми системами ночного видения. Системы ИК-видения на базе предлагаемых ИК-приемников также могут использоваться службами спасения при поиске пострадавших, пожарными для лучшего ориентирования в условиях сильного задымления, а также в медицине при обследовании органов и локализации мест их воспаления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК № 14.514.11.4074) с использованием оборудования ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база Национального исследовательского университета «МИЭТ» (ГК № 16.552.11.7061).

Литература

1. *Datskos P.G., Lavrik N.V., Rajic S.* Performance of uncooled microcantilever thermal detectors // Review of Scientific Instruments. – 2004. – Т. 75. – № 4. – Р. 1134–1148.
2. High-sensitivity 25 μm and 50 μm pitch microcantilever IR imaging arrays. Proceedings of SPIE / *S.R. Hunter, G.S. Maurer, G. Simelgor et al.* / «Infrared Technology and Applications XXXIII». Ed. by Andresen B.F., Fulop G.F., Norton P.R. – 2007. – Vol. 6542. – Р. 1–13.
3. Инфракрасные фоточувствительные элементы на основе МЭМС / *Е.А. Фетисов, Р.З. Хафизов, А.М. Белин и др.* // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2012: сб. трудов под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИПИМ РАН, 2012. – С. 658–661.
4. 3D MEMS metrology with optical profilers. / *F.M. Serry, T.A. Stout, M.J. Zecchino et al.* // Veeco Instruments Inc. Tucson, USA, 2006. P. 1–4.

Статья поступила
11 ноября 2012 г.

Рыгалин Дмитрий Борисович – доктор экономических наук, доцент, начальник Центра коммерциализации и трансфера технологий (ЦКТТ), директор Центра «Интеллектуальные электронные энергосберегающие системы» МИЭТ, заместитель генерального директора по науке и инновациям ОАО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* энергосберегающие технологии, приборная и компонентная база энергосберегающих систем, ИК-датчики, инновационная деятельность в научно-технической сфере.

Фетисов Евгений Александрович – кандидат физико-математических наук, начальник отдела фоточувствительных нано- и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* физика полупроводниковых приборов и микроэлектромеханических систем.

Хафизов Ренат Закирович – кандидат физико-математических наук, специалист ОАО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* физика полупроводниковых приборов.

Золотарев Виталий Иосифович – кандидат технических наук, начальник лаборатории НТЦ «Нано- и микросистемная техника» МИЭТ. *Область научных интересов:* технология ИС, МЭМС и МОЭМС на кремнии.

Решетников Иван Александрович – ведущий инженер-конструктор Центра коммерциализации и трансфера технологий МИЭТ. *Область научных интересов:* МЭМС, ИК-датчики, магниторезистивные датчики. **E-mail:** reshetnikov@zitc.ru

Рудаков Григорий Александрович – начальник участка НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* физика и технология полупроводниковых приборов.

Лапшин Ростислав Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник НИИ ФП им. Ф.В. Лукина (г. Москва). *Область научных интересов:* сканирующая зондовая микроскопия, нанотехнология, микромеханические биматериальные ИК-приемники.

Кириленко Елена Петровна – ведущий инженер НТЦ «Нано- и микросистемная техника» МИЭТ. *Область научных интересов:* аналитические исследования процессов и структур микроэлектроники, исследование поверхности методами электронной оже-спектроскопии, вторично-ионной масс-спектрометрии, растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа.