

## Нанoeлектромеханические термочувствительные элементы

Е.А. Фетисов<sup>1,2</sup>, В.А. Федирко<sup>1,3</sup>, Р.З. Хафизов<sup>2</sup>, В.И. Золотарёв<sup>1,2</sup>, Д.А. Зенюк<sup>2,3</sup>, Г.А. Рудаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный институт электронной техники, fetisov@unicm.ru

<sup>2</sup>ООО «ЭЛЕМ ИНФО»

<sup>3</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

**Аннотация** — В работе представлены результаты разработки, моделирования и экспериментальных исследований ИК фоточувствительных наномеханических и нанoeлектромеханических элементов. По предельным характеристикам они сопоставимы с фотоприемниками с глубоким охлаждением. Отсутствие необходимости охлаждения и относительная дешевизна делает их весьма привлекательными для применения в медицине, промышленной термографии и в ряде других отраслей.

**Ключевые слова** — ИК-фотодетекторы, МЭМС, НЭМС, НОЭМС, микрокантилевер.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Неохлаждаемые приемники излучения [1] по причине их относительной дешевизны весьма привлекательны для применения в медицине, промышленной термографии, в системах ночного видения для транспорта и других устройствах гражданского назначения. Кроме того, они могут использоваться и в системах специального назначения.

В последнее время, наряду с традиционными приемниками болометрического типа, активно разрабатываются и исследуются неохлаждаемые ИК-фотоприемники на основе микро- и нано-опто-электромеханических элементов и систем (МОЭМС/НОЭМС), в частности, детекторы на биматериальных слоях [2], [3]. Оценки предельной чувствительности таких приемников показали, что она сопоставима с предельными характеристиками фотоприемников с глубоким охлаждением. Устройства с параметрами, близкими к предельным, могут быть реализованы в настоящее время на базе высокоразвитой технологии МЭМС. Аналитический обзор современного состояния разработок МЭМС ИК-фото-приемников представлен в [4].

### II. НОЭМС ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Функционирование НОЭМС приемников ИК изображения основано на регистрации изгиба тонких, толщиной менее 1 мкм, биморфных многослойных

микрокантилеверов под воздействием нагрева ИК излучением вследствие различия коэффициентов термического расширения материалов слоев. На рисунке 1 схематически показан принцип действия биморфного МОЭМС фотодетектора.

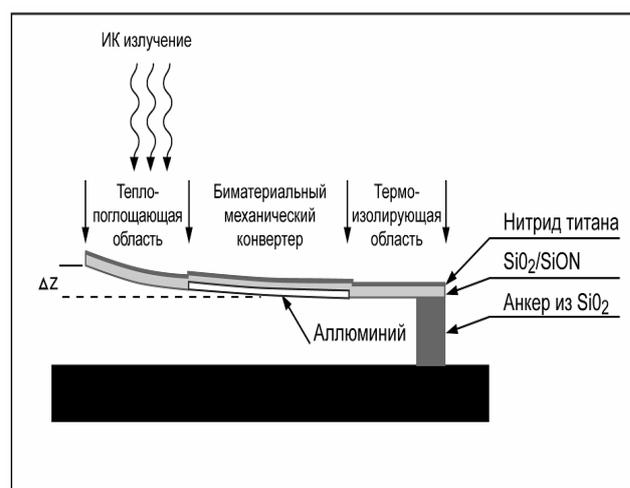


Рис. 1. Схема НОЭМС фоточувствительного элемента

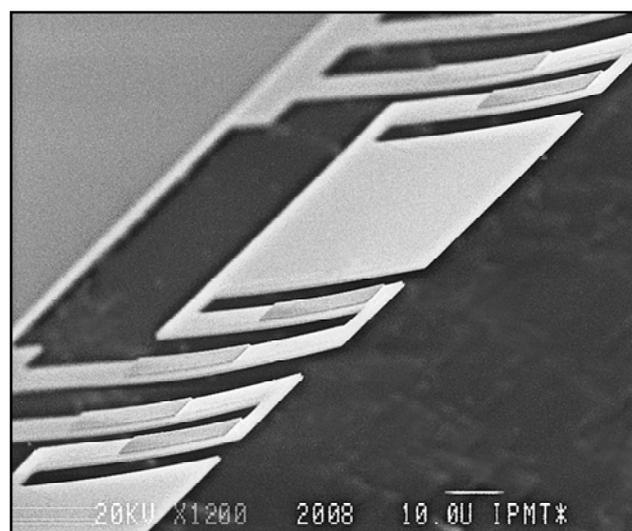
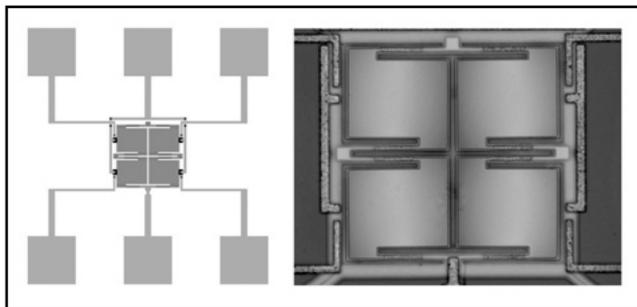


Рис. 2. Фотография фоточувствительного элемента с мембраной на основе окиси кремния

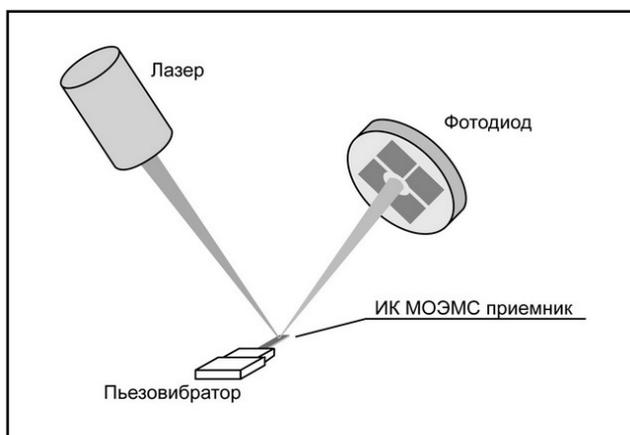
На рисунках 2 и 3 показаны фотографии некоторых лабораторных образцов изготовленных нами фоточувствительных элементов на основе различных материалов.



**Рис. 3. Топология и фотография экспериментального образца с мембраной на основе нитрида кремния**

НОЭМС элемент представляет собой фактически трёхмерную структуру. Ключевым этапом в технологии его изготовления является создание подвешенной наномембраны. Мембрана формировалась на основе окиси кремния или нитрида кремния с использованием жертвенного слоя.

Регистрация перемещения мембраны вследствие разогрева биморфной части ИК излучением может быть осуществлена оптическим или ёмкостным методом. Схема оптической регистрации представлена на рисунке 4.



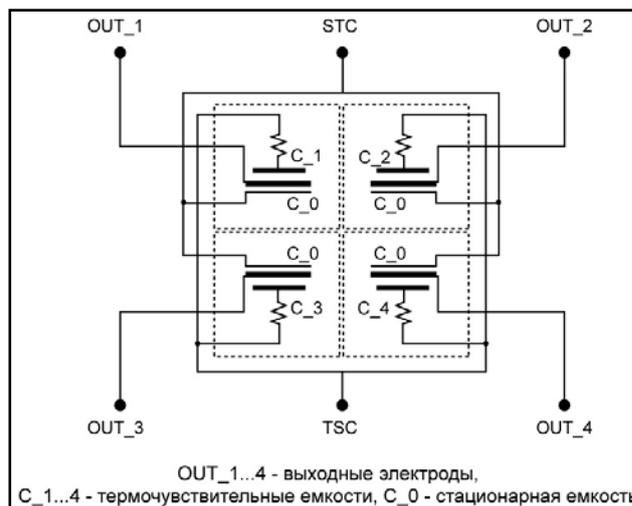
**Рис. 4. Схема оптической регистрации пространственного смещения наномембраны**

Эта схема была реализована на базе сканирующего зондового микроскопа. (СЗМ) Solver™ P4 (НТ-МДТ, Россия). Схема предоставляет принципиальную возможность регистрировать смещения края консоли ~ 0,1нм. Регистрация на массиве чувствительных

элементов осуществлялась в этом случае поэлементным сканированием лазерным пучком.

Электрическая схема образца и схема электрической регистрации сигнала показаны на рисунках 5 и 6.

Основным элементом измерительной схемы является плата генератора с программируемой логической микросхемой (ПЛИС) EPF10K10AT100.



**Рис. 5. Принципиальная электрическая схема экспериментального образца**

Для преобразования емкости в цифровой электрический сигнал используется плата EVAL-7747. Плата имеет стандартное программное обеспечение, позволяющее отображать результаты измерений на мониторе компьютера. Основные характеристики платы: точность измерения емкости ( $\pm 4$  fF), диапазон изменения  $\pm 8$  pF, 18 битное эффективное разрешение при скорости измерений 16,6 Гц.



**Рис. 6. Блок-схема стенда для измерения электрических характеристик**

На рисунке 7 представлены результаты оптических измерений зависимости смещения отражающей поверхности от температуры для двух образцов с топологией рисунка 3. Термомеханическая чувствительность,  $S_{TM}$ , исследованных сенсорных элементов НОЭМС по результатам оптических измерений составляет  $\sim 2$  нм/К.

На рисунке 8 показаны результаты ёмкостной регистрации перемещения контактного элемента мембраны для двух образцов той же топологии.

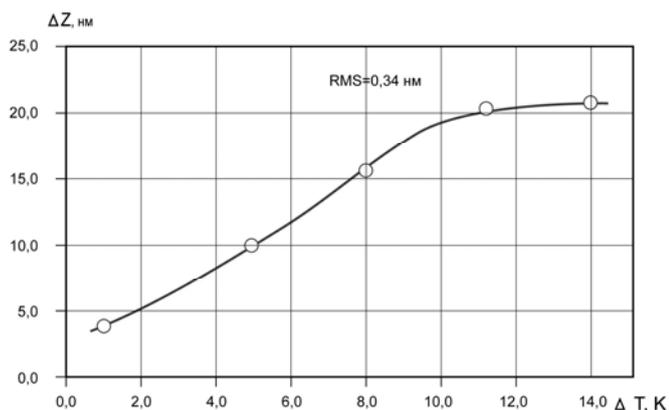


Рис. 7. Зависимость смещения наномембраны от температуры

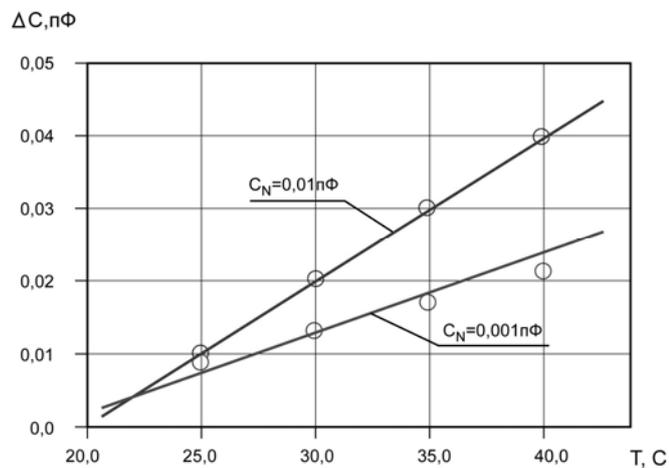


Рис. 8. Изменение ёмкости с температурой

Ёмкостная чувствительность,  $S_{TC}$ , по результатам электрических измерений составила для двух образцов, соответственно,  $\sim 0,001$  пФ/К и  $\sim 0,002$  пФ/К.

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НОЭМС ЭЛЕМЕНТОВ

Основной характеристикой фоточувствительного НОЭМС элемента служит его термомеханическая чувствительность, определяющая изменение

отклонения балки микрокантилевера  $\Delta Z$  под действием напряжений, которые возникают при изменении ее температуры  $\Delta T$  вследствие различия коэффициентов линейного теплового расширения материалов кантилевера.

На основе развитой физико-математической модели [5], [6] было получено аналитическое выражение для термомеханической чувствительности многослойной микроконсоли из условий её равновесия при изменении температуры. С помощью полученного выражения численно проанализированы возможности оптимизации конструкции микрокантилевера для получения максимальной чувствительности. Последняя определяется, в частности, выбором материалов слоёв биморфного кантилевера и имеет максимум при определённом соотношении толщин слоёв.

На рис. 9 показана зависимость нормированного термоотклика,  $f(t, b)$ , от отношения толщин слоёв  $t$  для пары Al/SiO<sub>2</sub> (отношение модифицированных модулей Юнга [4]  $b = 1,24$ ).

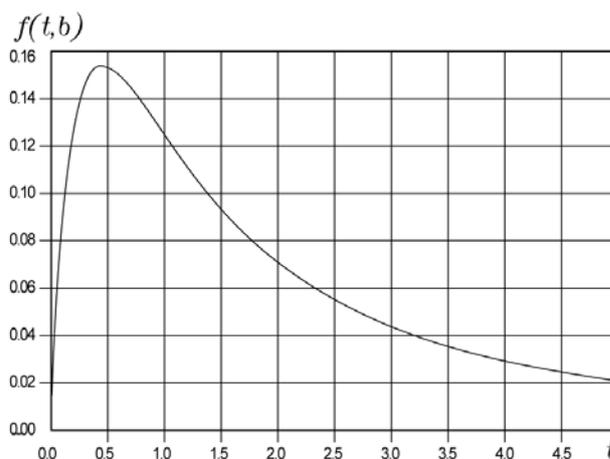
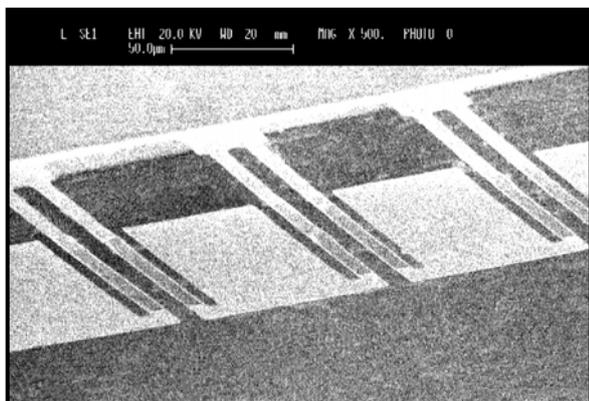


Рис. 9. Нормированный термоотклик в зависимости от отношения толщин слоёв  $t$  для пары Al/SiO<sub>2</sub>

Максимальное значение термоотклика для этой пары материалов составляет 3.734. Большие значения были получены лишь для сочетаний оксида кремния с европием или цинком, но их использование сопряжено с технологическими трудностями на существующем технологическом оборудовании. Также более технологичным является, во всяком случае, на нынешнем этапе, использование нитрида кремния, хотя по термомеханическим свойствам он существенно уступает окиси кремния. Таким образом, определённые возможности достижения более высоких характеристик НОЭМС ИК-фотодетекторов лежат и на пути создания технологий, позволяющих использовать оптимальный выбор материалов биморфных слоёв.

Результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными исследования опытных образцов МОЭМС фоточувствительных элементов, показанных на рисунке 10.



**Рис. 10. РЭМ –изображение экспериментальной линейки термочувствительных элементов**

Биморфная часть микрокантилевера представляла 5-слойную структуру на основе оксида кремния. Термомеханическая чувствительность, полученная в эксперименте, составляла  $\sim 4$  нм/К, что хорошо согласуется с расчётным значением  $S_{TM} = 4,288$  нм/К. Это значение меньше максимально достижимого для такой структуры  $S_{TM} = 5,686$  нм/К, поскольку соотношение толщин слоев в ней не оптимально.

Построена модель и развита теория изгиба биморфного микрокантилевера с контактной площадкой в качестве обкладки конденсатора под действием термоупругих, пондеромоторных и массовых сил при разогреве или охлаждении термочувствительной консоли. В этом случае равновесие достигается под действием термоупругих и пондеромоторных и массовых сил.

Анализ показывает, что при некотором «критическом» напряжении на конденсаторе система теряет устойчивость: происходит коллапс подвешенной обкладки. Таким же образом система может потерять устойчивость с изменением температуры. Найдены значения «критического» напряжения и «критической» дифференциальной температуры, проведено численное моделирование зависимости термоотклика от приложенного напряжения. Разработанный подход создаёт основу для моделирования и проектирования НОЭМС ИК-детекторов с емкостной электрической схемой считывания изображения.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены первые результаты разработки, моделирования и экспериментальных исследований отечественных ИК фоточувствительных наномеханических и наноэлектромеханических элементов. Впервые разработан и реализован технологический маршрут изготовления таких элементов, включающий элементы 3D технологии. Развита принципы их проектирования,ходы и методы их численного моделирования.

Численным моделированием продемонстрирована возможность оптимизации конструкции микрокантилевера для достижения максимального термоотклика элемента. Разработана и реализована физико-математическая модель ёмкостной регистрации термоотклика наноэлектромеханического элемента, которая предоставляет принципиальную основу для моделирования и проектирования НОЭМС ИК-детекторов с емкостной электрической схемой считывания изображения в интегральном исполнении.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] И.А. Хребтов, В.Г. Маляров. Неохлаждаемые тепловые матричные приёмники излучения // Оптический журнал. – 1997. - Т. 64, № 6. - С. 3–16.
- [2] I-Kuan Lin, Xin Zhang, Yanhang Zhang // J. Micromech. Microeng. – 2009. - V. 19, N 8. - P. 10.
- [3] S.R. Hunter, G.S. Maurer, G. Simelgor, S. Radhakrishnam, J. Gray // in Infrared Technology and Applications XXXIII (B. F. Andresen, G. F. Fulop, P. R. Norton, Editors). – 2007. - P. 65421F.
- [4] В.А. Федирко, Е.А. Фетисов и В.А. Беспалов, Приемники ИК изображения на основе термомеханических наноразмерных мембран // Прикладная физика. - 2010, № 1. - С. 66–72.
- [5] Федирко В.А., Зенюк Д.А. Моделирование термоотклика мультиморфных микрокантилеверов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2009, № 4(8). - С. 75–81.
- [6] Федирко В.А., Фетисов Е.А. Вакуумные опто-механические 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.