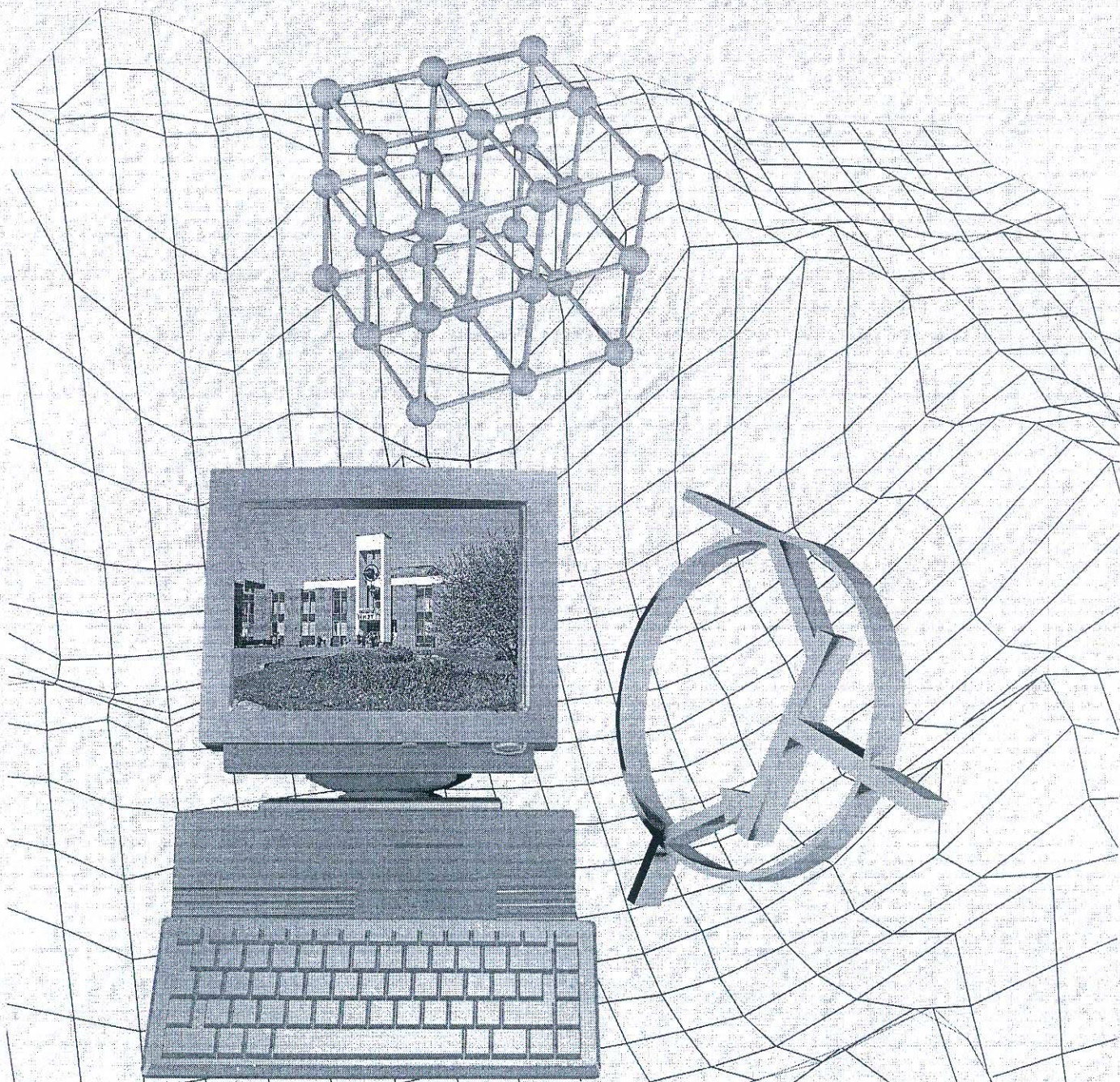


ISSN - 1561-5405

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# Электроника

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ЭЛЕКТРОНИКА. 2013. № 3 (101)



**3(101)**

**2013**



# Известия высших учебных заведений

## ЭЛЕКТРОНИКА 3(101)'2013

### Учредители:

Министерство  
образования и науки  
Российской Федерации

Национальный  
исследовательский  
университет «МИЭТ»

Главный редактор  
В.Д. Вернер

### Редакционная коллегия:

Амербаев В.М.  
Бархоткин В.А.  
Быков Д.В.  
Гаврилов С.А.  
Грибов Б.Г.  
Казённов Г.Г.  
Коноплёв Б.Г.  
Коркишко Ю.Н.  
Королёв М.А.  
Кубарев Ю.В.  
Неволин В.К.  
Неволин В.Н.  
Петросяня К.О.  
Руденко А.А.  
Таиров Ю.М.  
Телец В.А.  
Тихонов А.Н.  
Усанов Д.А.  
Чаплыгин Ю.А. (зам. главного редактора)

Адрес редакции: 124498,  
Москва, Зеленоград,  
проезд 4806, д. 5, МИЭТ  
Тел./факс: 8-499-734-6205  
E-mail: magazine@miee.ru  
http://www.miet.ru

© "Известия вузов.  
Электроника", 2013  
© МИЭТ, 2013

### Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Материалы электронной техники

*Вигдорovich Е.Н.* Метастабильное состояние системы CdTe–HgTe ..... 3

*Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Лавров И.В., Яковлева Е.Н.* Моделирование частотной дисперсии эффективных диэлектрических характеристик композиционных материалов ..... 7

#### Технология микро- и нанoeлектроники

*Короткий О.В.* Особенности объемного планирования в задаче автоматизированного управления мелкосерийным производством микросхем ..... 16

#### Микроэлектронные приборы и системы

*Вернер В.Д., Луканов Н.М., Сауров А.Н.* СВЧ-самосовмещенные структуры с прямыми и обращенными ультратонкими эмиттерными областями ..... 21

*Тарасов С.А., Александрова О.А., Максимов А.И., Мареева Е.В., Матюшкин Л.Б., Менькович Е.А., Мошников В.А., Мусихин С.Ф.* Исследование процессов самоорганизации квантовых точек сульфида свинца .. 28

#### Нанотехнология

*Бобринецкий И.И., Комаров И.А., Лаврентьев К.К., Левин Д.Д., Симунин М.М., Неволин В.К., Квачева Л.Д., Червонобродов С.П., Буриан А., Хавелек Л., Возница Н.* Особенности интеграции графенов в технологические процессы микроэлектроники ..... 33

*Громов Д.Г., Шулятьев А.С., Егоркин В.И., Зайцев А.А., Скорик С.Н., Галперин В.А., Павлов А.А., Шаманаев А.А.* Формирование массива упорядоченных нанокатодов на основе углеродных нанотрубок методом наномпринт литографии и процессов ПСХПО ..... 43

Заведующая редакцией  
С.Г. Зверева

Редактор  
А.В. Тихонова

Научный редактор  
С.Г. Зверева

Корректор  
Л.Ф. Летунова

Компьютерный дизайн, верстка  
А.Ю. Рыжков  
С.Ю. Рыжкова

Подписано в печать 4.06.2013.  
Формат бумаги 60x84 1/8.  
Цифровая печать.  
Объем 11,63 усл.печ.л.,  
11,4 уч.-изд.л.  
Заказ № 30.

Отпечатано  
в типографии ИПК МИЭТ  
124498, Москва, Зеленоград,  
проезд 4806, д. 5, МИЭТ

Свидетельство о регистрации  
№ 014134  
выдано Комитетом РФ по печати  
12.10.95.

Включен в Перечень российских  
рецензируемых научных журналов,  
в которых должны быть опубликова-  
ны основные научные результаты  
диссертаций на соискание ученых  
степеней доктора и кандидата наук  
редакции 2012 г.

Включен в Российский индекс  
научного цитирования.

<b>Схемотехника и проектирование</b>	
<i>Ильин С.А.</i> Тестирование библиотек цифровых ячеек ..	48
<b>Микро- и наносистемная техника</b>	
<i>Кузнецов Е.В., Чуйко О.В.</i> Исследование чувствительности рН-сенсоров на основе кремниевых МДП-нано-транзисторов .....	53
<i>Рыгалин Д.Б., Фетисов Е.А., Хафизов Р.З., Золотарев В.И., Решетников И.А., Рудаков Г.А., Лапшин Р.В., Кириленко Е.П.</i> Перспективные интегральные матричные приемники теплового излучения с оптическим считыванием .....	60
<i>Беспалов В.А., Ильичев Э.А., Кулешиев А.Е., Набиев Р.М., Петрухин Г.Н., Рычков Г.С.</i> МЭМС-переключатели в радиочастотной электронике. I. Актуальность, проблемы реализации, предварительные оценки. Обзор .....	64
<b>Интегральные радиоэлектронные устройства</b>	
<i>Гурарий М.М., Жаров М.М., Русаков С.Г., Ульянов С.Л.</i> Метод анализа режимов синхронизации и биений автогенератора при паразитном возбуждении сигналом произвольной формы и частоты .....	73
<i>Щагин А.В., Чжоу Ту, Йе Тун Тэйи.</i> Коррекция коэффициента мощности на IGBT-транзисторах в системе управления трехфазным выпрямителем .....	82
<b>Краткие сообщения</b>	
<i>Куксов П.А.</i> Оценка отношения сигнал/шум при разбросе параметров приемопередающих трактов радиосистем .....	88
<i>Фёдоров Р.А., Росляков А.С.</i> Контрольно-диагностический стенд для проверки функционирования имитаторов БИС на БМК .....	90
<b>Юбилеи</b>	
Соколову Евгению Борисовичу – 80 лет .....	92
<b>Конференции</b>	
Об итогах 20-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2013» .....	93
Contents .....	94
Abstracts .....	95
К сведению авторов .....	99

## Перспективные интегральные матричные приемники теплового излучения с оптическим считыванием

Д.Б. Рыгалин<sup>1,2</sup>, Е.А. Фетисов<sup>1</sup>, Р.З. Хафизов<sup>2</sup>, В.И. Золотарев<sup>1</sup>,  
И.А. Решетников<sup>1</sup>, Г.А. Рудаков<sup>3</sup>, Р.В. Лапшин<sup>4</sup>, Е.П. Кириленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

<sup>2</sup>ОАО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (г. Москва)

<sup>3</sup>НПК «Технологический центр» (г. Москва)

<sup>4</sup>НИИ 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  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной около 400 нм, покрытая тонким слоем NiCr [3]. Мембрана подвешена над поверхностью подложки на расстоянии примерно 500 нм с помощью микроконсолей 2, которые также изготовлены из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . 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  $\text{Si}_3\text{N}_4$  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  $60^\circ$  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.

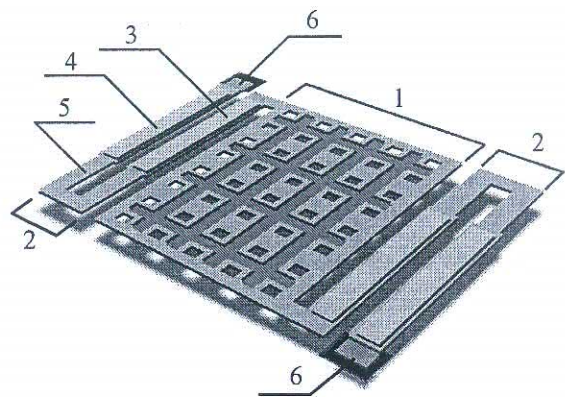


Рис.1. Конструкция чувствительного элемента неохлаждаемой ИК-матрицы МОМС: 1 – приемная мембрана; 2 – микроконсоли; 3, 4 – основной и компенсирующий биматериальный участок микроконсоли соответственно; 5 – участок термоизоляции; 6 – места крепления микроконсоли к подложке (анкер). Размеры чувствительного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

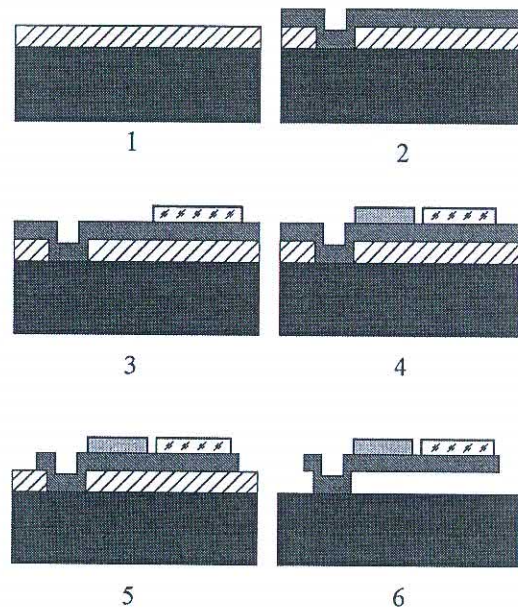


Рис.2. Основные технологические операции по изготовлению биматериальных неохлаждаемых ИК-приемников МОМС: 1 – осаждение жертвенного слоя  $\text{SiO}_2$ ; 2 – травление окон в жертвенном слое для создания анкеров, осаждение слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 3 – напыление слоя NiCr и его травление (формирование отражающего зеркала); 4 – напыление слоя Al и его травление (формирование биматериальной части консоли); 5 – травление слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (формирование геометрии мембраны); 6 – удаление жертвенного слоя  $\text{SiO}_2$

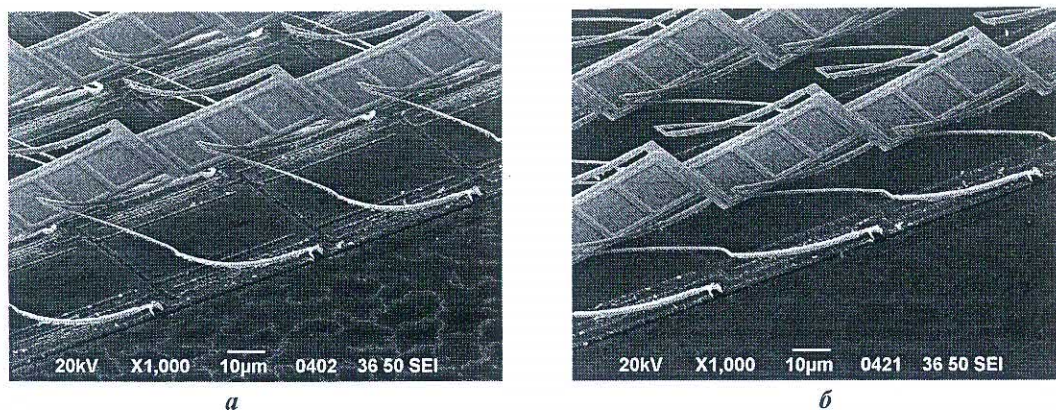


Рис.3. РЭМ-изображение биматериального ИК-приемника МОМС с удлиненными микроконсолями при температуре подложки  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

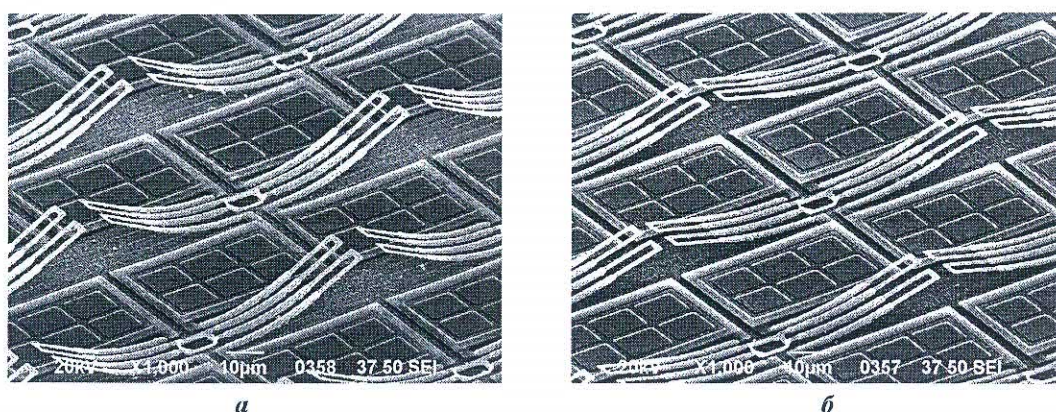


Рис.4. РЭМ-изображение биматериального ИК-приемника МОМС с термокомпенсацией при температуре подложки  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

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. – P. 1134–1148.
2. High-sensitivity 25  $\mu\text{m}$  and 50  $\mu\text{m}$  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 Andersen B.F., Fulop G.F., Norton P.R. – 2007. – Vol. 6542. – P. 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.: ИППМ 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@zitic.ru](mailto:reshetnikov@zitic.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.