

РЕЗИСТИВНЫЕ И ЕМКОСТНЫЕ СТРУКТУРЫ ТОЛСТЫХ ПЛЕНОК  
ДЛЯ МИКРОСБОРОК НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ  
НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2013 г. В. Я. Подвигалкин, Н. М. Ушаков

Саратовский филиал института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской АН

E-mail: ntu@bk.ru

Поступила в редакцию 04.10.2012 г.

Приведены результаты измерения электропроводности и емкости микросборок, разработанных на основе толстых пленок композитных наноматериалов. Показано, что для выбранной линейчатой структуры элементы резисторов и конденсаторов в виде толстых пленок можно использовать в схемотехнике двояко: толстопленочные резисторы могут работать одновременно и как электрические конденсаторы и наоборот. Установлено, что известные классические соотношения для схемотехнических расчетов комбинаций соединений  $R$ - и  $C$ -цепочек требуют поправок. Оценки значений сопротивлений переходного слоя в резистивно-емкостных микросборках составляют 25–30% от удельного сопротивления резистора.

DOI: 10.7868/S0544126913060082

## ВВЕДЕНИЕ

В решении основных задач комплексной миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры в ряду интегральных схем (ИС) важное место занимают микросборки (МСБ) и микроблоки (МБ), как базовые конструктивные элементы сложных радиоэлектронных комплексов [1–6]. Все элементы и (или) компоненты МСБ размещены на общей подложке и предназначены для выполнения определенной функции преобразования и обработки сигналов. Пленочные интегральные элементы МСБ гораздо чаще используются совместно с миниатюрными дискретными элементами – компонентами гибридных ИС. Гибридные ИС, уступая полупроводниковым ИС по надежности, плотности упаковки и себестоимости, имеют в ряде случаев особые схемотехнические преимущества за счет применения широкой номенклатуры навесных компонентов (транзисторов, индуктивностей, конденсаторов). Методы расчета и проектирования гибридных ИС практически не отличаются от методов расчета обычных электронных схем. Элементы пленочных и гибридных ИС и микросборок (резисторы, конденсаторы, индуктивности) выполняются на поверхности подложки в виде пленок резистивных, проводящих и диэлектрических материалов. Толстопленочные элементы МСБ обладают большей механической прочностью, имеют лучшую коррозионную и тепловую устойчивость, меньшие паразитные емкости межсоединений и слабое взаимовлияние элементов (наводки и паразитные

связи) [7]. Тонкопленочные элементы МСБ позволяют получать более узкие допуски на номиналы элементов (резисторов и конденсаторов). Все резистивные материалы, используемые в микроэлектронике, можно разделить условно на металлы и их соединения, металлические сплавы с высоким удельным сопротивлением, сильнолегированные полупроводники, металлодиэлектрические смеси керметы [8] и композитные наноматериалы [9–12]. Однако исследование возможности применения последних находится пока в начальной стадии. Это связано с рядом особенностей транспорта носителей заряда в наноструктурах. Так, в тонких пленках из наноматериалов электроны начинают проявлять волновые свойства и становятся существенно зависимыми от граничных условий. Проводимость тонкой (5–10 нм) металлической пленки с учетом рассеяния на шероховатой поверхности имеет сильную зависимость от толщины пленки  $d_0$ . Результаты расчетов с использованием метода волновода показывают, что в случае изотропного рассеяния в подзонах поперечного квантования проводимость пленки пропорциональна  $d_0^2$ , а в случае внутризонного рассеяния на малые углы пропорциональна  $d_0^5$  [13]. Что касается толстых нанокompозитных пленок, состоящих из наночастиц (2–30 нм) металлов и полупроводников в диэлектрической матрице (например, полимерной), то в них наблюдаются температурные гистерезисные зависимости диэлектрической проницаемости и явления температурных структур-

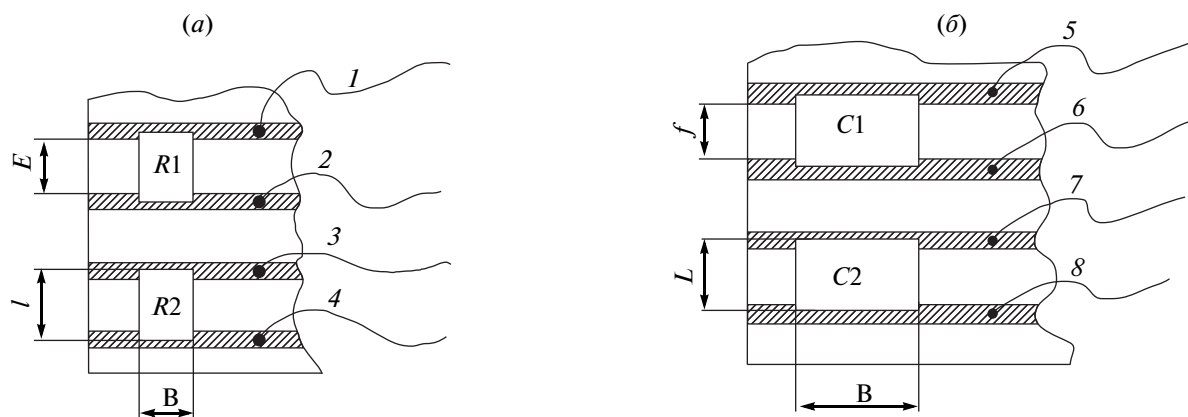


Рис. 1. Модели толстопленочных резистивных и емкостных тест-элементов (резистивные  $R1$  и  $R2$ , рис. 1а) и емкостные  $C1$  и  $C2$ , рис. 1б) на керамической плате.

ных фазовых переходов 1-го рода [14–16]. Наблюдаемые явления могут быть использованы для разработки и создания коммутаторов и элементов памяти на микросборках на основе управляемых резистивно-емкостных и емкостно-резистивных структур.

Поэтому целью настоящей работы является экспериментальное исследование резистивных и емкостных структур для микросборок на основе толстых пленок из полимерных нанокomпозиционных материалов.

#### МАТЕРИАЛЫ, ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микросборки на основе толстых пленок из полимерных нанокomпозиционных материалов представляли собой тест-платы, состоящие из тест-резисторов и тест-конденсаторов. Были синтезированы три основные нанокomпозиции в виде порошков, две из которых были изготовлены на основе наночастиц оксида цинка ( $ZnO$ , 10–25 мас. %) и диоксида церия ( $CeO_2$ , 10–20 мас. %), стабилизированных на поверхности микрогранул алмаза (ND) с размерами около 10 мкм; третья композиция была изготовлена на основе наночастиц сульфида кадмия ( $CdS$ , 10 мас. %), стабилизированных в объемной матрице полиэтилена низкой плотности (LDPE). Процессы синтеза и свойства полученных нанокomпозиций описаны в [14, 17, 18]. Все три композиции помещались дополнительно в жидкую фазу кремниевого аппликатора (EgichKrause EK 21024) путем размешивания до однородной массы. Затем пастообразную массу наносили на полированную поверхность алуминооксидной керамики марки ВК-100 или ВК-94-1 (22ХС) с готовой топологией (линейчатая структура) серебряных токопроводящих полосок в виде контактов. Из полученных тест-резисторов и тест-конденсаторов собирались

микросборки как объекты измерений. Разрабатываемые конструкции микросборок соответствовали ОСТ 92-4179.

На рис. 1 представлены модели толстопленочных резистивных (рис. 1а) и емкостных (рис. 1б) микросборок с тест-элементами как объектами измерений. На рис. 1а изображены резисторы  $R1$  и  $R2$ , контактирующие с токоведущими микрополосками, имеющими гибкие выводы 1–4 для комбинаций соединений элементов в последовательные и параллельные электрические цепочки. На рис. 1б изображены электрические конденсаторы  $C1$  и  $C2$ , контактирующие с токоведущими микрополосками, имеющими гибкие выводы 5–8 для выполнения комбинаций соединений этих пассивных элементов

На основе технологии толстых пленок микроэлектроники согласно ОСТ 4. ГО.054.240, были изготовлены керамические тест-платы.

На рис. 2 представлены фотографии тест-плат с тест-резисторами (тест-плата I, рис. 2а) и тест-конденсаторами (тест-плата II, рис. 2б). На рис. 2а изображена тест-плата I с предполагаемыми резисторами на основе композиции из ультрадисперсного алмаза в стеклофазе модифицированного наночастицами оксида цинка и диоксида церия. На рис. 2б показана тест-плата II с предполагаемыми электрическими емкостями на основе композиции из наночастиц сульфида кадмия в полиэтиленовой матрице.

Выполняя различные комбинации соединений толстопленочных резисторов и конденсаторов на тест-платах были получены измеренные значения сопротивления и емкости, которые в дальнейшем сравнивались с расчетными.

Все электрические измерения проводились на частоте 1 МГц с помощью измерителя LCR E7-12. Погрешность измерений составляла по  $R = \pm 0.02\%$ , по  $C = \pm 0.02\%$ .

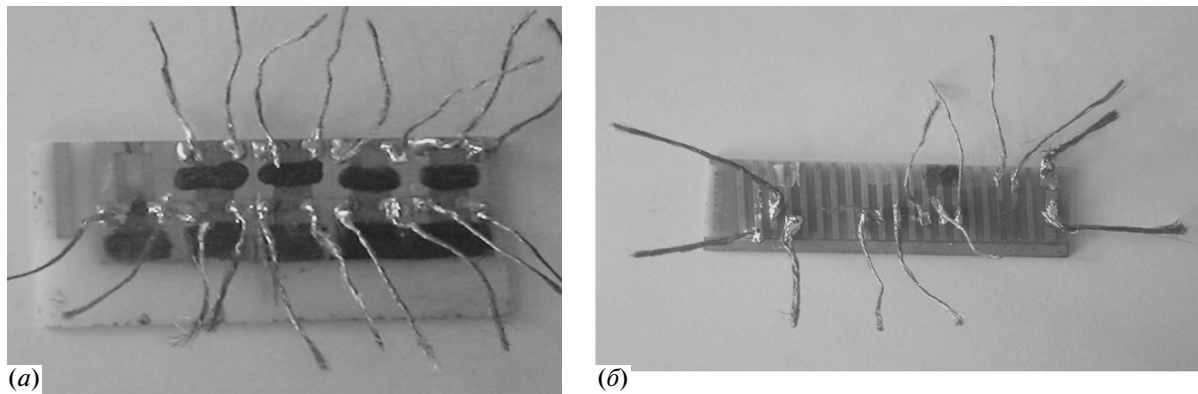


Рис. 2. Фотографии тест-плат с тест-резисторами (тест-плата I, рис. 2а) и тест-конденсаторами (тест-плата II, рис. 2б)

Измерительная аппаратура, перед измерениями, калибровалась стандартными резистором и конденсатором соответственно моделям, выбранным из того диапазона физических величин, что и тест-элементы моделей.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для изготовленных тест-резисторов и конденсаторов были проведены предварительные измерения сопротивления и емкости, а также проведены оценки коэффициента формы и удельного поверхностного сопротивления. Измеренные значения сопротивления резистивных микросборок находились в диапазоне от 150 Ом до 5 кОм, а значения емкости — в диапазоне от 1 до 3 пФ. Значения удельного поверхностного сопротивления  $\rho_s$  с учетом коэффициента формы (см. табл. 1) находились в диапазоне от 0.7 до 4.3 кОм/квадрат. Полученные значения удельного поверхностного сопротивления превосходят диапазон характеристик пленок кремниевых сплавов РС-3001 (0.5–2.0) и РС-3710 (0.3–3.0), получаемых ионно-плазменным распылением (по ЕТО.032.547 ТУ “Распыля-

емая мишень из кремниевого резистивного сплава”) [5].

Геометрические характеристики толсто пленочных тест-резисторов и тест-конденсаторов в исходном состоянии приведены в табл. 1.

На основании данных, приведенных в табл. 1 были проведены оценки резистивности и электрической емкости тест-плат при последовательном (ПС) и параллельном (ПРС) соединении, а также проведено сравнение экспериментальных результатов с расчетными. Экспериментальные схемотехнические показатели толсто пленочных тест-резисторов и тест-конденсаторов приведены в табл. 2.

Для выбранной линейчатой структуры элементы резисторов и конденсаторов в виде толстых пленок можно использовать в схемотехнике двойко. Толсто пленочные резисторы могут работать одновременно и как электрические конденсаторы. Аналогично электрические конденсаторы могут одновременно работать как резисторы.

При измерении резистивности и емкости серии тест-резисторов и тест-конденсаторов на ос-

Таблица 1. Геометрические и электрические характеристики толсто пленочных микросборок в исходном состоянии

| № элемента | Марка толсто пленочной среды композита тест-элементов | Размерные характеристики тест-элементов |            |              |                          | Удельное поверхностное сопротивление, кОм/квадрат |
|------------|---|---|------------|--------------|--------------------------|---|
|            |   | Длина, мм                               | Ширина, мм | Толщина, мкм | Коэффициент формы, $k_f$ |   |
| 1.         | ZnO(10–25 wt %)/ND                                    | 4.0                                     | 3.5        | 100          | 1.1                      | 3.9   |
| 2.         | ZnO(10–25 wt %)/ND                                    | 4.0                                     | 3.5        | 70           | 1.1                      | 4.3   |
| 1кр        | CeO <sub>2</sub> (10–20 wt %)/ND                      | 6.0                                     | 4.5        | 40           | 1.3                      | 0.7   |
| 2кр        | CdS (10 wt %)/LDPE                                    | 6.5                                     | 4.5        | 50           | 1.3                      |   |
| 3кр        | CdS (10 wt %)/LDPE(T)                                 | 6.5                                     | 4.5        | 40           | 1.3                      | 1.4   |
| 11.        | CdS (10 wt %)/LDPE                                    | 4.0                                     | 1.5        | 10           | 2.7                      | 2.1   |
| 22.        | CdS (10 wt %)/LDPE                                    | 4.0                                     | 1.5        | 20           | 2.7                      | 1.6   |
| 33.        | CdS (10 wt %)/LDPE                                    | 4.0                                     | 1.5        | 25           | 2.7                      | 1.5   |

**Таблица 2.** Экспериментальные схмотехнические показатели толсто пленочных тест-резисторов и тест-конденсаторов

| № элемента        | Резистивность, $R$   |                 |                   |                      |                  | Электрическая емкость, $C$ |                   |                  |                      |                   | Особенности   |
|-------------------|----------------------|-----------------|-------------------|----------------------|------------------|----------------------------|-------------------|------------------|----------------------|-------------------|---|
|                   | Показатели измерений |                 |                   | Расчетные показатели |                  | Показатели измерений       |                   |                  | Показатели расчетные |                   |   |
|                   | $R$ , кОм            | ПС, кОм         | ПРС, кОм          | ПС, кОм              | ПРС, кОм         | $C$ , пФ                   | ПС, пФ            | ПРС, пФ          | ПС, пФ               | ПРС, пФ           |   |
| 1.<br>2.          | 4.5<br>4.9           | 12<br>—         | 1.8<br>—          | 9.4<br>—             | 2.34<br>—        | 1.76<br>1.87               | 1.0<br>—          | 4.8<br>—         | 0.91<br>—            | 3.63<br>—         | <b>тест-плата I:</b><br>1 элемент соед. со 2-м                          |
| 1кр               | 0.9                  | 6.2             | 0.42              | 5.8                  | 0.76             | 2.6                        | 1.2               | 5.7              | 1.09                 | 4.47              |   |
| 3кр               | 1.84                 | 9.3             | 1.27              | 6.74                 | 1.34             | 2.16                       | 1.35              | 5.14             | 1.00                 | 4.03              | <b>тест-плата I:</b><br>3 кр элемент соед. со 2-м                       |
| 11.<br>22.<br>33. | 0.15<br>3.0<br>4.0   | 2.1<br>—<br>5.4 | 0.17<br>—<br>1.25 | 3.15<br>—<br>7.0     | 0.14<br>—<br>1.7 | 2.8<br>1.25<br>1.36        | 2.76<br>—<br>1.17 | 5.2<br>—<br>1.87 | 0.86<br>—<br>0.65    | 4.05<br>—<br>2.61 | <b>тест-плата II:</b> 11 элемент соед. со 22-м, 22-элемент соед. с 33-м |

**Таблица 3.** Поправочные коэффициенты соединений для  $R$  и  $C$ 

| № тест-платы | № элементов в соединении | Поправочные коэффициенты к резисторным цепочкам |                                | Поправочные коэффициенты к конденсаторным цепочкам |                                    |
|--------------|--------------------------|---|--------------------------------|--|------------------------------------|
|              |                          | Последовательное соединение, $K_1$              | Параллельное соединение, $K_2$ | Последовательное соединение, $\zeta_1$             | Параллельное соединение, $\zeta_2$ |
| I            | 1-й со 2-м               | 1.28  | 0.77                           | 1.1  | 1.32                               |
|              | 2-й с 1кр                | 1.07  | 0.55                           | 1.1  | 1.28                               |
|              | 3-й со 2кр               | 1.38  | 0.95                           | 1.35   | 1.28                               |
| II           | 1-й со 2-м               | 0.67  | 1.19                           | 3.19   | 1.28                               |
|              | 3-й со 2-м               | 0.77  | 0.74                           | 1.80   | 0.72                               |

нове толсто пленочных наноконпозиционных сред было установлено, что известные классические соотношения для схмотехнических расчетов требуют поправок. Так, при соединении электрических резисторов последовательно общее электрическое сопротивление  $R$  можно записать, как

$$R = K_1 \cdot (R1 + R2). \quad (1)$$

При параллельном соединении электрических резисторов –

$$R = K_2 \cdot \frac{R1R2}{R1 + R2}. \quad (2)$$

При получении серии толсто пленочных электрических конденсаторов на основе наноконпозиционных сред было установлено, что соотно-

шения для схмотехнических расчетов (3) и (4) требуют поправок, а именно:

а) – при соединении электрических конденсаторов последовательно общая электрическая емкость

$$C = \zeta_1 \cdot \frac{C1C2}{C1 + C2}; \quad (3)$$

б) – при параллельном соединении электрических конденсаторов

$$C = \zeta_2(C1 + C2). \quad (4)$$

Поправочные коэффициенты комбинаций соединений сведены в табл. 3. Отличие значений поправочных коэффициентов от единицы означает, на наш взгляд, что вклад в резистивность и емкость полученных структур вносит переходной слой между пленкой и металлическим контактом,

который ранее (традиционно) не учитывался в схемотехнических расчетах. Сопротивление пе-

реходного слоя  $R_p$  можно оценить с помощью следующего выражения [1]

$$R_p = \frac{2l\rho_s}{wz} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{sl}}{\rho_s} \right) \right]^{-1} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{\rho_{sl}}{\rho_s} \right)^2 \right] \operatorname{cth}(z) + \left[ \frac{2\rho_{sl}}{(\rho_s \operatorname{sh}(z))} \right] \right\},$$

где  $z = l \left\{ \rho_s G \left[ 1 + \left( \frac{\rho_{sl}}{\rho_s} \right) \right] \right\}^{1/2}$ ,  $G$  – удельная проводимость переходного слоя;  $\rho_s$  – удельное сопротивление резистивного слоя;  $\rho_{sl}$  – удельное сопротивление материала контакта;  $l$  – длина контакта (длина области перекрытия резистивного элемента контактом);  $w$  – ширина резистивного элемента. В известных резистивных микросборках величина сопротивления контактного материала на 2–3 порядка меньше сопротивления резистора. Что касается сопротивления переходного слоя  $R_p$ , то на начальных стадиях деградации ( $z \gg 1$ ) резистивного элемента его величину можно оценить, как

$$R_p = \frac{2}{w} \left( \frac{\rho_s}{G} \right)^{1/2}.$$

Оценки сопротивления переходного слоя в резистивно-емкостных микросборках показали, что его значения составляют 25–30% от удельного сопротивления резистора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предпринята попытка обратить внимание разработчиков современной элементной базы микроэлектроники на основе толсто пленочных микросборок на новые рабочие среды из композитных наноматериалов. Исследование таких наноматериалов находится еще в начальной стадии. Однако исследования физико-химических свойств наноматериалов, изложенных во многих работах авторов вселяют уверенность, что эти материалы перспективны для радиотехники [10–12].

Преимущества двоякого использования  $R$ - и  $C$ -цепочек показывают необходимость дальнейших работ по их созданию и использованию в микроэлектронике.

Авторы выражают свою благодарность за разработку наноматериалов профессору, д.х.н. Кособудскому И.Д., профессору, д.т.н. Юркову Г.Ю. и их ученикам. Работа выполнена на основе финансовой поддержки Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 11-08-00351/12).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы развития гибридных интегральных схем в 80-х годах (Обзор) / Информационный, бюллетень “Радиоэлектроника за рубежом”. М.: НИИ экономики и информации по радиоэлектронике, вып. 18 (912), 1980. С. 1–14.
2. *Сергеев В.С.* Интегральные гибридные микросхемы / В.С. Сергеев, И.Н. Воженин // М.: Сов. радио, 1973. 64 с.
3. *Бондаренко О.Е., Федотов Л.М.* Конструктивно-технологические основы проектирования микросборок / М.: Радио и связь, 1988. 136 с.
4. *Яшин А.А.* Конструирование микроблоков с обшей герметизацией. (Б-ка конструктора радиоэлектронной аппаратуры) / А.А. Яшин // М.: Радио и связь, 1985. 100 с.
5. *Седаков А.Ю., Смолин В.К.* Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления // Под ред. А.Ю. Седакова. М.: Радиотехника, 2011. 168 с.
6. *Подвигалкин В.Я.* Оптоэлектронные объемные интегральные схемы как базовые элементы для быстродействующих электронных систем управления / В.Я. Подвигалкин, Н.М. Ушаков // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. № 3(26). Вып. 1. С. 100–105.
7. *Исаев Ю.В.* Состояние и тенденции развития толсто пленочной технологии и оборудования. Обзорная информация / Ю.В. Исаев, Е.И. Хопяк // ТС-9 “Экономика и технология приборостроения” / М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1978. 56 с.
8. *Бочкарёв Б.А.* Керметные пленки / Б.А. Бочкарёв, В.А. Бочкарёва. Л.: Энергия, 1975. 152 с.
9. *Харитонов Е.В.* Диэлектрические материалы с неоднородной структурой. М.: Радио и связь, 1983. 123 с.
10. *Запис К.В.* Нанокompозитные материалы для современной электроники / К.В. Запис и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2003. № 1. С. 108–113.
11. *Ушаков Н.М.* Новые композиционные наноматериалы с управляемыми свойствами для радиотехники и электроники / Н.М. Ушаков, И.Д. Кособудский, Г.Ю. Юрков, С.П. Губин и др. М.: Радиотехника, 2005. № 10. С. 105–108.
12. Патент RU 2404915C1 МПК В82В 3/00 Способ получения полимерных нанокompозитных толстых пленок и устройство для его осуществления / Подвигалкин В.Я., Ушаков Н.М., Кособудский И.Д. 2010. Бюл. 33. С. 234.
13. *Ананьев С.Д.* К вопросу о влиянии шероховатости поверхности на проводимость тонких пленок /

- С.Д. Ананьев, В.В. Вьюрков, А.А. Орликовский // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 3. С. 198–203.
14. *Ushakov N.M.* Ceric oxide-containing nanocomposites based on polyethylene matrix: synthesis and properties / N.M. Ushakov, D.A. Baranov, L.V. Gorobinskii, [and others] // J. Acta materialia. 2008. V. 56/10. P. 2336–2343. DOI information: 10.1.016/j.actamat 2008.01.019
15. *Ушаков Н.М.* Термодиелектрические свойства полимерных композитных наноматериалов на основе меди–оксид меди в матрице полиэтилена высокого давления / Н.М. Ушаков, А.Н. Ульзутуев, И.Д. Кособудский // Журнал технической физики. 2008. Т. 78. Вып. 12. С. 65–69.
16. *Гафнер С.Л.* Структурные фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы / С.Л. Гафнер, Ю.Я. Гафнер // Ж. Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. 2010. С. 1–4.
17. *Ульзутуев А.Н.* Синтез и исследование полупроводниковых нанокompозитных материалов на основе сульфида кадмия / А.Н. Ульзутуев и др. // Известия высших учебных заведений, химическая технология неорганических и органических веществ, теоретические основы. 2008. Т. 51. № 6. С. 90–93.
18. *Ульзутуев А.Н.* Исследование температурных зависимостей диэлектрических свойств металлополимерных композитных материалов на основе цинка, стабилизированных в матрице полиэтилена высокого давления / А.Н. Ульзутуев, Н.М. Ушаков // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 19. С. 73–78.