

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 7(168) ✧ 2014

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий
и информационных технологий Российской академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России,
в систему Российского индекса научного цитирования и международную базу данных Scopus

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н, проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н, проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

Аристов В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Гапонов С. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Каляев И. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Климов Д. М., д.т.н., проф., акад. РАН

Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Никитов С. А., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН

(Япония)

Сауров А. Н., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь)

Андреев А., к.ф.-м.н., (Великобритания)

Андриевский Р. А., д.х.н., проф.

Антонов Б. И.

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Быков В. А., д.т.н., проф.

Волчихин В. И., д.т.н., проф.

Горнев Е. С., д.т.н., проф.

Градецкий В. Г., д.т.н., проф.

Кальнов В. А., к.т.н.

Карякин А. А., д.х.н., проф.

Колобов Ю. Р., д.т.н., проф.

Кузин А. Ю., д.т.н., проф.

Мокров Е. А., д.т.н.

Панич А. Е., д.т.н., проф.

Панфилов Ю. В., д.т.н., проф.

Петросянц К. О., д.т.н., проф.

Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф.

Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)

Путилов А. В., д.т.н., проф.

Пятышев Е. Н., к.ф.-м.н.

Стриханов М. Н., д.ф.-м.н., проф.

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенков С. П., д.т.н., проф.

Тодуа П. А., д.т.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Самойлович М. И., Бовтун В., Белянин А. Ф., Кемпа М., Нужный Д., Клещева С. М., Савинов М. Диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей оксидом цинка 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Тимошенков С. П., Анчутин С. А., Рубчиц В. Г., Зарянкин Н. М., Виноградов А. И., Дернов И. С., Кочурина Е. С. Особенности проектирования и изготовления чувствительного элемента микромеханического акселерометра на КНИ-структурах 10

Вишнеков А. В., Ерохин В. В., Иванова Е. М. Автоматизация процедуры выбора микроконтроллера 14

Молодцова Г. В., Милованов Р. А., Зубов Д. Н., Кельм Е. А. Подходы к разделению кристаллов стековых сборок при анализе отказов многокристалльных интегральных схем 22

Спирин В. Г. Конструкция и технология многоуровневой платы с полимерной изоляцией 24

Глухова О. Е., Колесникова А. С., Слепченко М. М., Шмыгин Д. С. Управление движением фосфолипида во внешнем электрическом поле 30

Артемова А. И., Михайлов Ю. А., Панков В. В., Суханов В. С. Оптимизация конструкции чувствительного элемента давления с распределенным жестким центром с помощью компьютерного трехмерного моделирования 34

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Гринькин Е. А., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Тютюгин А. В., Турков В. Е. Кинетика травления неорганического "жертвенного" слоя при изготовлении чувствительных элементов инерциальных датчиков по технологии кремний-на-изоляторе 38

Фирсова Н. Ю., Елшин А. С., Марченкова М. А., Болотов А. К., Иванов М. С., Пронин И. П., Сенкевич С. В., Киселев Д. А., Мишина Е. Д. Переключаемость перовскитных микрообластей пленок ЦТС, локально отожженных фемтосекундным лазером инфракрасного диапазона 43

Аверин И. А., Пронин И. А., Мошников В. А., Димитров Д. Ц., Якушова Н. Д., Карманов А. А., Кузнецова М. В. Анализ каталитических и адсорбционных свойств *d*-металлов-модификаторов диоксида олова 47

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Беринцев А. В., Родионов В. А., Штанько А. А., Федоров И. С. Полупроводниковые приборы с S-образной передаточной вольт-амперной характеристикой 52

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (<http://microsystems.ru>; <http://novtex.ru/nmst/>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2012 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

по каталогу Роспечати (индекс 79493);
по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:
107076 Москва,
Стромьинский пер., д. 4
e-mail: nmst@novtex.ru

Journal of NANO- and MICROSYSTEM TECHNIQUE

NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEHNIKA

ISSN 1813-8586

№ 7

(168)

2014

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. — **EDITOR IN CHIEF**
Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
DEPUTY OF EDITOR IN CHIEF
Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA) —
DEPUTY OF EDITOR IN CHIEF

Editorial council:

Aristov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Gaponov S. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kaljaev I. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Klimov D. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Nikitov S. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Ryzhii V. I. (Japan), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
Cor.-Mem. RAS
Surov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS
Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Andrievskii R. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Antonov B. I.
Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Bykov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gradetskiy V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Mokrov E. A., Dr. Sci. (Tech.)
Panfilov Ju. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrunin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Piatishv E. N., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Strikhanov M. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Todua P. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Volchihin V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Executive secretary:

Lysenko A. V.

Editorial staff:

Chugunova A. V.
Grigorin-Ryabova E. V.

Address:

4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia.
Tel/Fax: +7(499)269-55-10. Web: www.microsystems.ru/eng;
e-mail: nmst@novtex.ru

The Journal is included in the list
of the Higher Attestation Commission
of the Russian Federation,
in the Russian system of science citation index
and international data base Scopus

Published since November 1999

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

Samoylovich M. I., Bovtun V., Belyanin A. F., Nuzhnyy D., Kempa M., Klescheva S. M., Savinov M. Dielectric Properties of the Opal Matrix with Filled Interspherical Nanospacing Zinc Oxide 3

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Rubchic V. G., Zaryankin N. M., Vinogradov A. I., Dernov I. S., Kochurina E. S. Features of the Design and Manufacturing of Micromechanical Accelerometer Sensor for SOI Structures 10

Vishnekov A. V., Erokhin V. V., Ivanova E. M. Automation of Micro-controller Choice Procedure 14

Molodtsova G. V., Milovanov R. A., Zubov D. N., Kelm E. A. Approaches to a Die Decoupling during Failure Analysys of the 3D Package Integrated Circuits 22

Spirin V. G. Design and Technology of the Layered Charge with Polymeric Insulation 24

Glukhova O. E., Kolesnikova A. S., Slepchenkov M. M., Shmygin D. S. Motion Control Phospholipids in the Electric Field 30

Artemova A. I., Mikhailov Y. A., Pankov V. V., Sukhanov V. S. Optimization of Pressure Sensing Element Construction with Distributed Rigid Center Using 3D Computer Modeling 34

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Grinkin E. A., Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Tyutyugin A. V., Turkov V. E. Kinetics of Inorganic Sacrificial Layer Etching in the Manufacture of Inertial Sensors Sensing Elements Using Silicon-on-Insulator Technology 38

Firsova N. I., Elshin A. S., Marchenkova M. A., Bolotov A. K., Ivanov M. S., Pronin I. P., Senkevich S. V., Kiselev D. A., Mishina E. D. Switching of Perovskite Micro Regions in Amorphous PZT Thin Films, Annealed with Femtosecond IR Laser. 43

Averin I. A., Pronin I. A., Moshnikov V. A., Dimitrov D. Tz., Yakushova N. D., Karmanov A. A., Kuznetsova M. V. Analysis Catalytic and Adsorption Properties of D-Modifier Metal Tin Dioxide 47

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Novikov S. G., Gurin N. T., Berintsev A. V., Rodionov V. A., Shtan'ko A. A., Fedorov I. S. Semiconductor Devices with an S-Shaped Transfer Current-Voltage Characteristics. 52

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 539.2

М. И. Самойлович¹, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. отд., e-mail: samoylovich@technomash.ru,
В. Бовтун², Dr. Sc., вед. науч. сотр., **А. Ф. Белянин**¹, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,
М. Кемпа², Dr. Sc., зав. лаб., **Д. Нужный**², Dr. Sc., ст. науч. сотр.,
С. М. Клещева¹, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотр., **М. Савинов**², Dr. Sc., ст. науч. сотр.
¹ Центральный научно-исследовательский технологический институт "Техномаш", г. Москва
² Институт физики АН ЧР, г. Прага, Чешская республика

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ С ЗАПОЛНЕНИЕМ МЕЖСФЕРИЧЕСКИХ НАНОПОЛОСТЕЙ ОКСИДОМ ЦИНКА

Поступила в редакцию 26.12.2013

Рассмотрены условия формирования нанокompозитов на основе решетчатых упаковок наносфер SiO_2 (опаловых матриц), содержащих в межсферических нанополостях кластеры кристаллического пьезоэлектрического ZnO . Изучено строение таких нанокompозитов методами электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния и рентгеновской дифрактометрии. Приведены результаты измерений диэлектрических характеристик в широком частотном диапазоне для полученных материалов.

Ключевые слова: нанокompозиты, метаматериалы, опаловые матрицы, оксид цинка, рентгенофазовый анализ, спектроскопия КР, СВЧ свойства

Введение

Структуры на основе опаловых матриц (решетчатых упаковок наносфер рентгеноаморфного SiO_2), межсферические нанополости которых заполнены различными веществами, являются одним из новых типов метаматериалов. Ведутся разработки с использованием подобных материалов, позволяющих создавать приборы электронной техники с улучшенными эксплуатационными характеристиками (например, циркуляторы), устройства волоконно-оптических систем передач, предполагается появление приборов управления фазовыми скоростями в оптическом, СВЧ и терагерцовом диапазонах [1–3].

Ранее были получены и исследованы свойства опаловых матриц, в межсферических нанополостях которых синтезированы кластеры: металлы, оксиды (титанаты, манганиты, шпинели) и другие материалы [4–8]. Перспективным веществом для создания трехмерной решетки таких нанокластеров является оксид цинка. Используемые в предыдущих работах условия получения [7, 8] не позволили создать в межсферических полостях

опаловых матриц однофазную систему (без дополнительных фаз) из частиц кристаллического ZnO — так называемого сильного пьезоэлектрического материала (коэффициент электромеханической связи $>3\%$).

Цель настоящей работы — получение и изучение диэлектрических свойств нанокompозитов на основе опаловых матриц, нанополости которых заполнены кристаллитами ZnO .

Формирование наноструктур

Синтез опаловых матриц, диаметры наносфер SiO_2 которых в зависимости от условий формирования (температуры, концентрации исходных компонентов и др.) могут варьироваться в пределах $d = 200...400$ нм, был описан в ряде работ [7, 9]. Процесс получения основан на реакции гидролиза тетраэфира ортокремниевой кислоты ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) с раствором этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) в присутствии гидроксида аммония (NH_4OH). Были изготовлены решетчатые 3D-упаковки наносфер SiO_2 объемом $>10 \text{ см}^3$ с однородностью по диаметрам наносфер не хуже 5%. Высокая твердость и монолитность

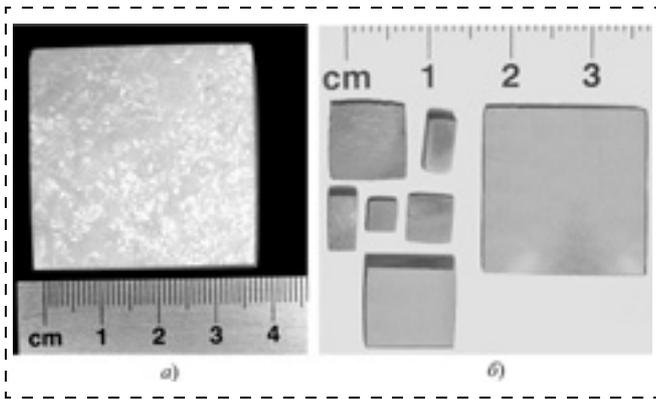


Рис. 1. Фотографии образцов, вырезанных из объемных заготовок: *a* — опаловая матрица размером $40 \times 40 \times 5$ мм; *б* — опаловые матрицы различных размеров, нанополости которых заполнены оксидом цинка

синтезированных опаловых матриц позволяет механической обработкой получать образцы заданной формы и размера (рис. 1), необходимых для измерений функциональных свойств метаматериалов на их основе.

В плотнейшей упаковке наносферы SiO_2 образуют межсферические тетраэдрические (по числу формирующих полость сфер) и октаэдрические нанополости размером $\sim 0,22$ и $0,39d$ соответственно (по диаметру вписываемой в полость сферы). Плотнейшую упаковку сфер можно разбить на тетраэдры и октаэдры, занимающие весь объем (рис. 2). Наноккомпозиты на основе опаловых матриц, чьи межсферические нанополости заполнялись кристаллической фазой ZnO , были получены методом пропитки, основанном на заполнении нанополостей водным раствором нитрата ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$) или хлорида цинка (ZnCl_2). Трудность создания трех-

мерной решетки для вводимого в межсферические полости вещества связана с узостью (максимальный размер $\sim 0,37d$) каналов, связывающих межсферические полости. На рис. 2 показаны сечения соединяющих нанополости каналов в области контактов сфер.

Проводилась 10–20-кратная пропитка опаловых матриц водным раствором $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ или ZnCl_2 с последующим отжигом при $350\text{--}450^\circ\text{C}$, в результате которого происходит частичное термическое разложение вводимых соединений и формирование рентгеноаморфных и кристаллических фаз, заполняющих межсферические нанополости на 40...50 %. Полученные образцы подвергались термообработке при $600\text{--}900^\circ\text{C}$, преимущественно в области устойчивости кристаллической фазы ZnO .

Фазовый состав наноккомпозитов

Строение поверхности опаловых матриц исследовали с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) CARL ZEISS LEO 1430 VP, а также атомно-силового микроскопа (АСМ) NOVA-873 (NT NDT) (рис. 3). Фазовый состав и строение фаз синтезированных материалов зависел от состава, концентрации пропитывающего раствора и условий отжига. Сформированные в межсферических нанополостях вещества состоят из кристаллических и рентгеноаморфных фаз.

Для идентификации кристаллических фаз синтезированных соединений применяли рентгеновский дифрактометр ARL X'tra (Thermo Fisher Scientific) ($\text{Cu } \alpha$ -излучение, $\lambda = 0,154178$ нм, энергодисперсионный твердотельный детектор с охладителем Пельтье, графитовый монохроматор, шаг $0,02^\circ$ при скорости $1^\circ/\text{мин}$). Анализ рентгено-

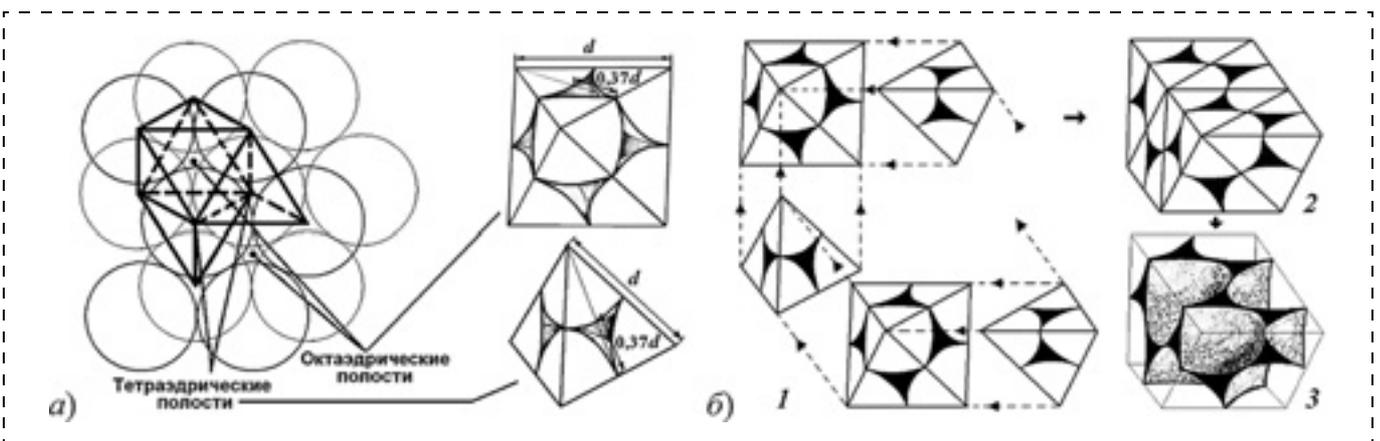


Рис. 2. Строение наноккомпозитов на основе опаловых матриц (центры наносфер SiO_2 образуют гранецентрированную кубическую решетку):

a — октаэдрические и тетраэдрические полости, образованные наносферами SiO_2 (в установке с вертикальной тройной осью); *б* — 1, 2 — модель построения наноккомпозитов на основе опаловых матриц (октаэдрические и тетраэдрические межсферические полости опаловой матрицы заполнены); 3 — объемная модель вещества, заполнившего нанополости и соединяющие их каналы (наносферы SiO_2 не показаны)

грамм проведен с использованием автоматизированной базы данных ICDD PDF-2. В результате рентгенофазового анализа полученных образцов установлено заполнение межсферических нанополостей кластерами кристаллического ZnO (цинкит) (гексагональная сингония, пространственная группа $P6_3mc$) (рис. 4, кривая 1). Отклонение в условиях высокотемпературного отжига приводит к образованию дополнительных кристаллических фаз оксида кремния: SiO_2 (кristобалит) (тетрагональная сингония, $P4_12_12$) и SiO_2^* (кварц) (гексагональная сингония, $P6_222$) (рис. 4, кривые 2, 3).

Исследованы температурные области превращения рентгеноаморфного кремнезема с образованием кристаллических фаз (преимущественно кристобалита). Полиморфные превращения модификаций SiO_2 (кварц и кристобалит) сопровождаются изменением объема, однако при концентрациях образовавшихся кристаллических фаз SiO_2 , не превышающих 1...2 об. % (оценивается по соотношению интенсивностей отражений на рентгенограммах), указанные изменения не влияют на размер и форму межсферических нанополостей. В ряде случаев (при определенных режимах термообработки на воздухе) происходит взаимодействие синтезированного в нанополостях ZnO с кремнеземом с образованием кристаллической фазы Zn_2SiO_4 (вилемит — тригональная сингония, $R3$) [7, 8]. Таким образом, варьирование параметров синтеза (концентрации пропитывающих растворов, условий термообработки — температуры, выдержки, скорости нагрева и охлаждения) позволяет получать смесь рентгеноаморфных и кристаллических фаз. В зависимости от условий синтеза в межсферических полостях могут формироваться кристаллические фазы: 1) только ZnO; 2) только SiO_2 ; 3) ZnO и SiO_2 ; 4) SiO_2 и продуктов взаимодействия ZnO и SiO_2 .

Степень кристалличности фазы ZnO (содержание кристаллической фазы в объеме синтезированного вещества) зависит от условий термообработки и в ряде случаев превышает 90 об. %. Полученный в межсферических полостях ZnO имел размер кри-

сталлитов (областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения — ОКР) в пределах 22...28 нм. Было установлено, что размер ОКР ZnO, который определяли по уширению дифракционных максимумов на рентгеновских дифрактограммах, не зависит от степени кристалличности синтезированного вещества. Для изучения строения фазы ZnO, синтезированной в межсферических полостях наносфер SiO_2 , применяли просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM 200С. При температурах выше 800 °С, по результатам ПЭМ и рентгенофазового анализа, ZnO взаимодействовал с наносферами SiO_2 (рис. 5).

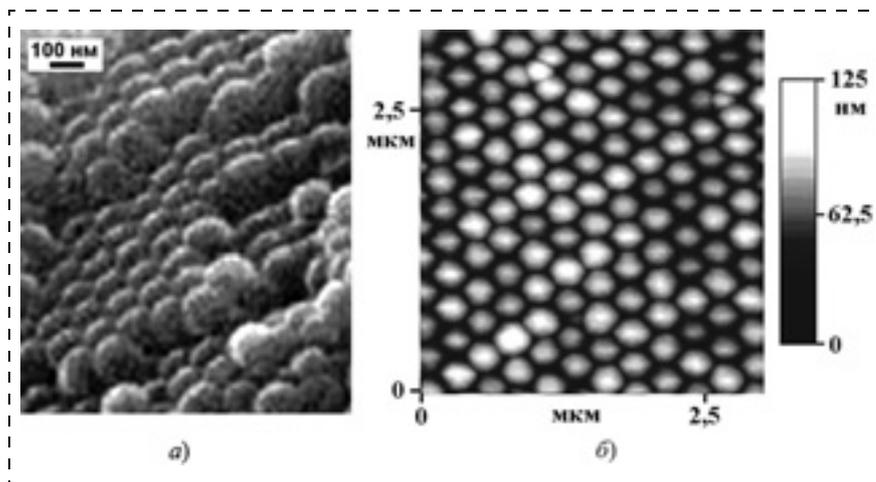


Рис. 3. Строение поверхности опаловой матрицы: а — РЭМ, снимок сделан под углом; б — АСМ, вид сверху

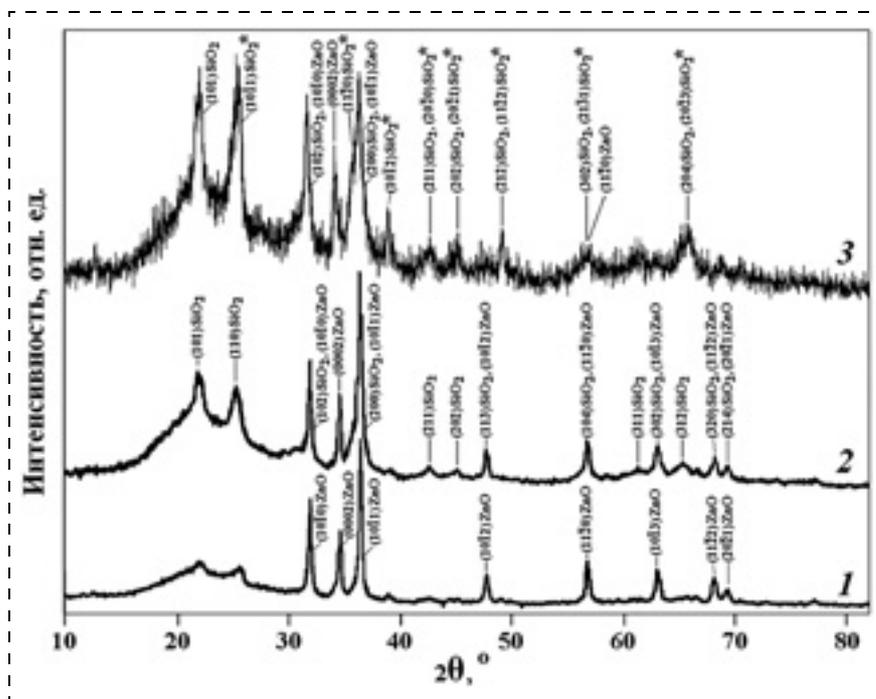


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы ($Cu\ K\alpha$ -излучение) образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых заполнены кластерами ZnO

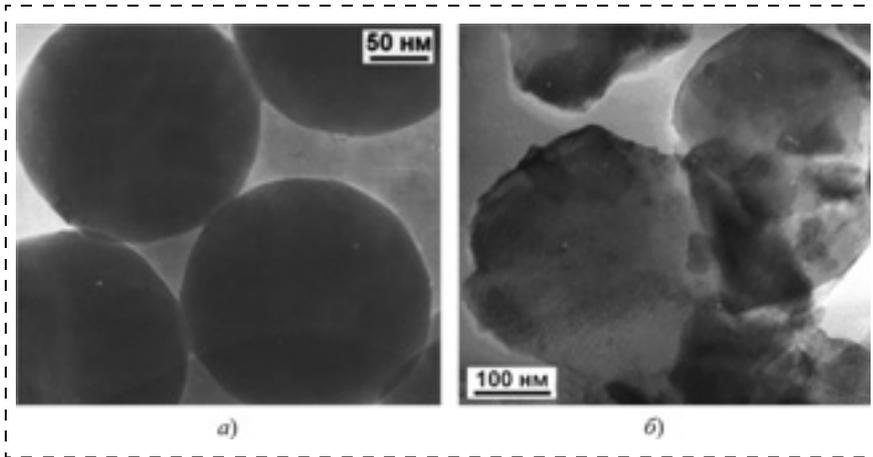


Рис. 5. Строение (ПЭМ) участка контакта наносфер SiO_2 опаловых матриц (а) и опаловых матриц с синтезированными в межсферических нанополостях кластерами ZnO (б) с одновременным образованием $\text{Zn}_2\text{Si}_3\text{O}_5$

Состав нанокompозитов контролировали также с использованием спектров комбинационного рассеяния (КР) света. Рентгеноаморфные и кристаллические фазы синтезированных веществ исследовали с использованием лазерного (линия 632,8 нм — He-Ne-лазера) микрорамановского спектрометра LabRAM HR800 (HORIBA Jobin-Yvon). Спектр КР для серии нанокompозитов, содержащих ZnO , представлен на рис. 6. На приведенном спектре присутствуют полосы, характерные для заполняющих межсферические полости кристаллических фаз, а также рентгеноаморфной фазы SiO_2 . Полученные спектры согласуются с данными для наноструктурированных образцов ZnO по основным наиболее ярким полосам. Спектры КР исследованных в работе нанокompозитов на основе опаловой матрицы, межсферические нанополости которой содержат кластеры ZnO , представлены полосами 387, 447 и 570 cm^{-1} (уширение полос $\Delta\nu_{1/2} \approx 17$; 9 и 62 cm^{-1} соответственно). Уширение спектральных полос ZnO связано с малыми размерами (22...28 нм) областей когерентного рассеяния кри-

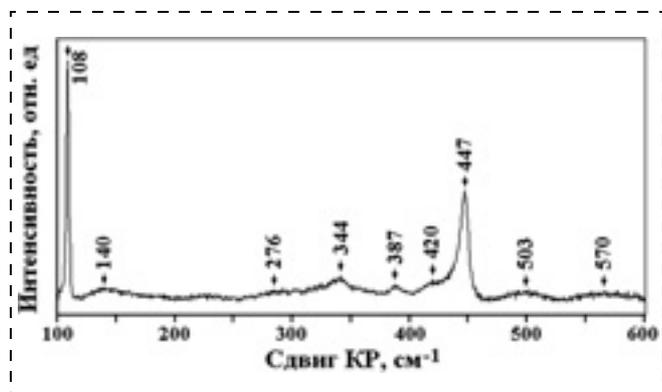


Рис. 6. Спектр КР образца опаловой матрицы, межсферические нанополости которой содержат кластеры ZnO

сталлической фазы синтезированного в межсферических нанополостях ZnO и его дефектностью (точечные дефекты, границы кристаллитов).

Спектроскопия КР также применима для идентификации рентгеноаморфных и полиморфных модификаций кристаллических фаз SiO_2 [10, 11]. Для рентгеноаморфного кремнезема характерны слабые полосы на спектрах КР вблизи частоты 1060 cm^{-1} , полосы средней интенсивности на частотах вблизи 800 cm^{-1} и полоса на частоте 420 cm^{-1} (рис. 6). При температурах > 800 °C начинается частичная перекристаллизация рентгеноаморфного кремне-

зема в кристобалит, присутствие которого подтверждается интенсивной полосой на частоте 108 cm^{-1} ($\Delta\nu_{1/2} \approx 2,7$ cm^{-1}), а также размытыми полосами 140 и 276 cm^{-1} (рис. 6). С повышением температуры отжига интенсивность полос кристобалита увеличивается. Образование кристаллических фаз SiO_2 происходит с поверхности наносфер, при этом строение и концентрация кристаллических фаз SiO_2 зависели в основном от температуры и длительности термообработки.

Диэлектрические свойства полученных композитов

Действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') компоненты диэлектрической проницаемости в диапазоне высоких частот ($1 \cdot 10^6 \dots 1,8 \cdot 10^9$ Гц) были измерены с использованием диэлектрического спектрометра с коаксиальной измерительной ячейкой Novocontrol BDS 2100 и импедансным анализатором Agilent 4291B. Измерительное оборудование фирмы Agilent позволяло измерять компоненту диэлектрической проницаемости, включая потери, в диапазоне 1 МГц...110 ГГц. В микроволновой области ($2 \cdot 10^8 \dots 2 \cdot 10^{10}$ Гц) измерения проводили методом коаксиального зонда с открытым концом (Agilent 8507E), для чего использовали сетевой анализатор Agilent E8364B; в области ТГц — методом трансмиссионной ТГц спектроскопии с применением фемтосекундной Ti-сапфировой лазерной системы. Коаксиальные измерения ($1 \cdot 10^6 \dots 1,8 \cdot 10^9$ Гц) проводили на образцах в форме цилиндров (диаметр 3 мм, высота 4...5 мм), все остальные измерения выполнены на образцах в форме пластин размерами 10 × 10 мм и толщиной 1...3 мм.

Все измерения проведены на образцах, без нанесения электродов. Были исследованы действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') компоненты диэлектри-

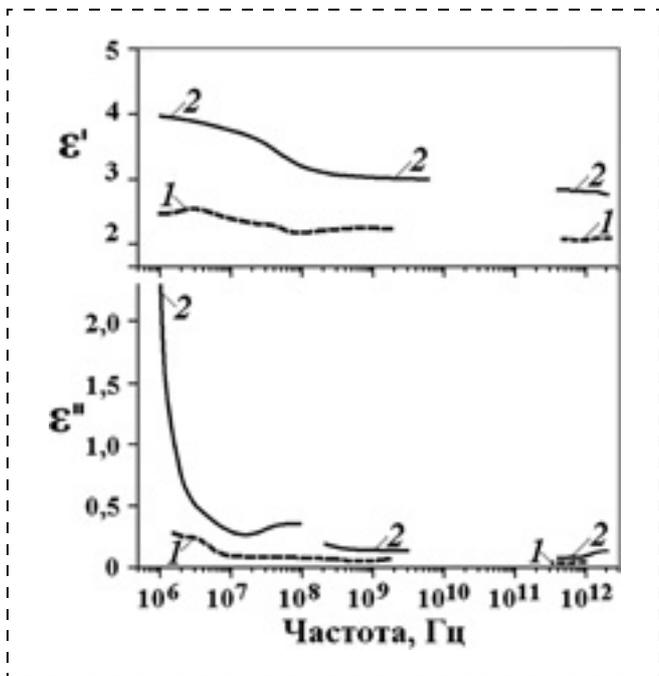


Рис. 7. Частотные зависимости действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') компонент диэлектрической проницаемости образцов незаполненной опаловой матрицы (1) и опаловой матрицы, межсферические нанополости которой заполнены кластерами ZnO (2)

ческой проницаемости опаловых матриц с синтезированными в межсферических нанополостях кластерами ZnO с размерами 22...28 нм, для которых диэлектрические спектры были изучены в широком диапазоне частот от 1 МГц до 1 ТГц (рис. 7, 8).

Введение кластеров ZnO приводит к повышению ϵ' опаловых матриц на 40...200 %, но не влияет на диэлектрические потери, остающиеся низкими ($\epsilon'' < 0,1$) практически во всем использованном диапазоне частот. Отметим только небольшое по-

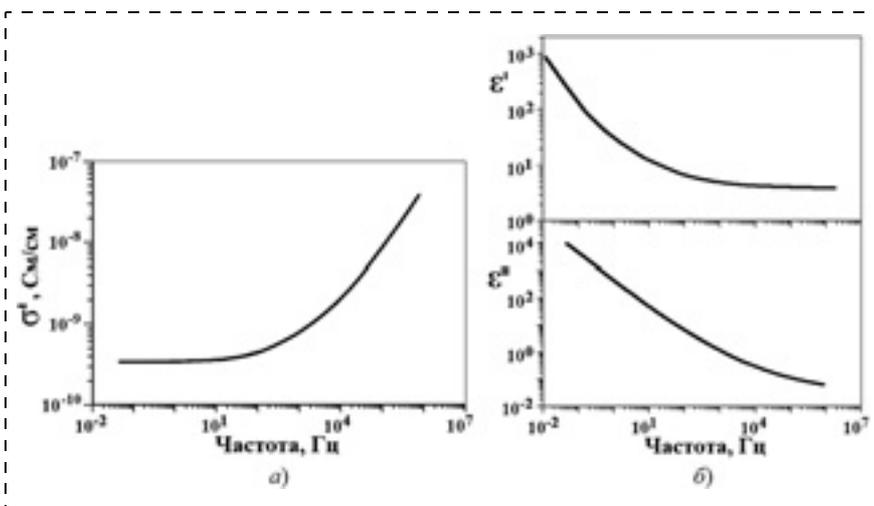


Рис. 8. Частотные зависимости (без поля) проводимости (а), а также действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') компонент диэлектрической проницаемости (б) опаловых матриц, межсферические нанополости которых заполнены кластерами ZnO

вышение диэлектрических потерь в области низких частот (10 Гц) и их рост в диапазоне высоких ($10^{10} \dots 10^{12}$ Гц) частот. В первом случае указанное повышение можно объяснить присутствием некоторого количества воды в нанополостях матрицы, тогда как рост потерь в ТГц области имеет более фундаментальный характер и, очевидно, обусловлен низкочастотным крылом фоннного спектра вводимых соединений. Сквозной проводимости нет (а следовательно, проперколированные проводящие кластеры отсутствуют). Все исследованные образцы, судя по микроволновым свойствам, несколько отличаются значением ϵ , а также подобны композитам диэлектрик-диэлектрик с релаксационной поляризацией из-за неоднородности системы.

Изменение диэлектрических характеристик в электрических полях

Измерялось влияние напряжения смещения постоянного электрического поля (1...150 В или 0,01...1,2 кВ/см) на проводимость и диэлектрические характеристики на частотах 1 Гц...100 кГц полученных образцов. Если воздействие электрических полей на микроволновую проводимость на малых частотах очевидно, на частоте 100 кГц такую зависимость замерить достоверно не удалось. Возрастание значений ϵ' , ϵ'' и проводимости σ' в области 1 Гц...1 кГц с увеличением приложенного поля (рис. 9), а не снижение, как было установлено для других образцов [7, 8, 11], скорее всего, связано с тем, что кристаллиты наполнителя полностью сформированы.

Слабая нелинейность свидетельствует, что большие низкочастотные снижения ϵ' , ϵ'' и σ не связаны с приэлектродными процессами, а вызваны релаксационной поляризацией (или прыжковой проводимостью на переменном токе) для такого композита (матрица-наполнитель), при этом основной вклад вносит кластер ZnO. Нелинейность невелика, потому что в неоднородном по ϵ материалу большая часть электрического поля прилагается к участкам с меньшим ϵ (модель серийного соединения конденсаторов или диэлектрических слоев). В рассматриваемом случае приложенное поле в основном попадает на поверхность опаловой матрицы (SiO_2), которая не обладает ни проводимостью, ни диэлектрической нелинейностью.

Отметим, что измерения одинаковых образцов различными ме-

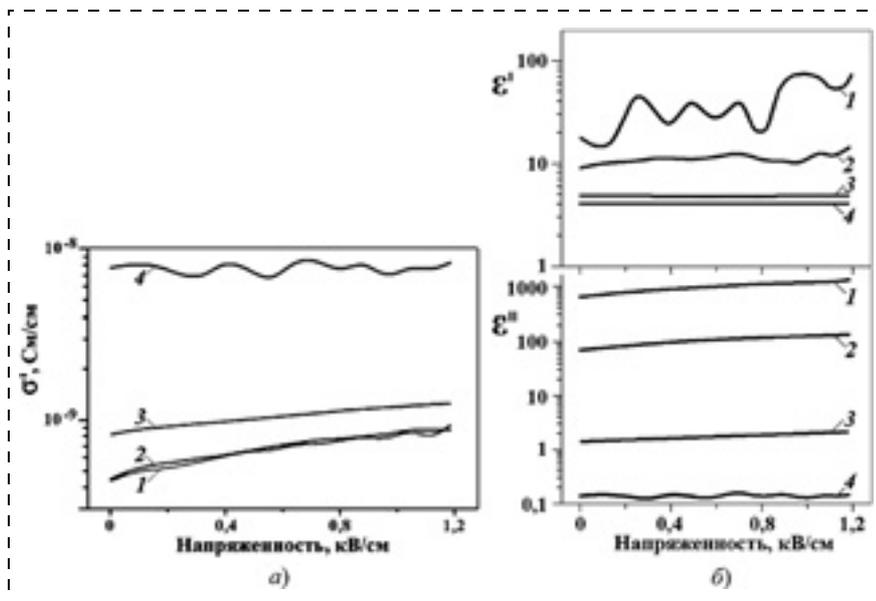


Рис. 9. Зависимость от приложенного поля проводимости (а), а также действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') компонент диэлектрической проницаемости (б) образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых заполнены кластерами ZnO от напряженности постоянного электрического поля. Частоты: 1 Гц (1), 10 Гц (2), 10 кГц (3) и 100 кГц (4)

тодами и на различном оборудовании дают довольно близкие (по величинам, описывающим эффекты прохождения, поглощения и отражения электромагнитных волн для соответствующих диапазонов частот) значения. Возникающие кристаллические фазы SiO₂ не оказывают влияния на электрофизические свойства образцов из-за малой их концентрации. Полученные данные могут служить не только подтверждением воспроизводимости условий и результатов при получении образцов, но и подтверждают целесообразность выбранных направлений экспериментальной части работы.

Заключение

Повышенные значения диэлектрической проницаемости опаловых матриц, чьи межсферические нанополости заполнены кристаллитами ZnO, при сохранении низких потерь в микроволновом диапазоне и определяют повышенный интерес к исследованным композитам как этап поиска для последующего создания новых метаматериалов. Действительно, для получения метаматериала необходимо обеспечить не только высокие значения ϵ' , но и малое значение ϵ'' (поглощение) в заданном диапазоне частот. Соответственно, такие необычные свойства метаматериалов, как наличие (в определенных диапазонах частот) отрицательной групповой скорости, эффективно проявляются в области резонансов. Указанные свойства метаматериалов при малом поглощении и делают их перспективными для применения в СВЧ электронике и оптоэлектронике.

Понимание особенностей фазовых превращений и кристаллизации в нанополостях опаловых матриц при синтезе заданных материалов позволяет создавать метаматериалы с управляемыми значениями функциональных свойств и эксплуатационных характеристик. Проведенные работы обеспечили получение образцов (размерами до $40 \times 40 \times 5$ мм с монодисперсностью по размерам наносфер не хуже 5 %) нанокомпозитов на основе опаловых матриц, межсферические нанополости которых заполнены кристаллическим (кластеры размером до 28 нм) ZnO, с образованием 3D-нанорешетки пьезоэлектрика с большим коэффициентом электромеханической связи.

Изучение структурных особенностей, состава и диэлектрических свойств разрабатываемых метаматериалов на основе опаловых мат-

риц с введением в межсферические нанополости пьезоэлектрика ZnO позволило получить данные, необходимые для разработки физико-технических основ создания и применения некристаллических пространственно неоднородных материалов с модуляцией (дисперсией) электрических и диэлектрических параметров в нанодиапазоне. Предполагается, что подход, связанный с применением подобных метаматериалов и нанокомпозитов, будет наиболее эффективен при разработке различных твердотельных СВЧ устройств: фильтров, линий задержки, фазовращателей и других управляющих элементов, небольших по размерам и с малым потреблением энергии, а также для изменения групповой скорости распространения сигнала за счет различных эффектов в метаматериалах, обладающих свойством хиральности (оптические линии задержки, многоканальные мультиплексоры/демультимплексоры и др.).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант офи-м-12-07-12030).

Список литературы

1. Sarychev A. K., Shalaev V. M. *Electrodynamics of metamaterials*. Amsterdam: World Scientific and Imperial College Press, 2007. 200 p.
2. Kong J. A. *Electromagnetic wave interaction with stratified negative isotropic media* // *Progress in Electromagnetics Research, PIER*. 2002. V. 35. P. 1–52.
3. Голованов О. А., Ефимов А. А., Тюмин А. А., Грачев А. И. Дифракция электромагнитных волн на магнитном нанокомпозите в прямоугольном волноводе // *Радиопромышленность*. 2012. № 4. С. 129–137.

4. **Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Белянин А. Ф., Нужный Д., Кемпа М., Клещева С. М.** СВЧ-характеристики, микроволновая проводимость и диэлектрические свойства нанокомпозитов на основе опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей металлами // *Наноинженерия*. 2012. № 3. С. 22–30.

5. **Ринкевич А. Б., Устинов В. В., Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Кузнецов Е. А.** Нанокомпозиты на основе опаловых матриц с 3D-структурой, образованной магнитными наночастицами // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2008. № 4. С. 55–63.

6. **Ustinov V. V., Rinkevich A. B., Perov D. V., Samoilovich M. I., Klescheva S. M.** Anomalous magnetic antiresonance and resonance in ferrite nanoparticles embedded in opal matrix // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2012. V. 324. P. 78–82.

7. **Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Белянин А. Ф., Кемпа М., Нужный Д., Цветков М. Ю., Клещева С. М.** Оптические, магнитные и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей кристаллическими мультиферроиками, пьезо-

электрическими и сегнетоэлектрическими материалами // *Российский химический журнал*. 2012. Т. LVI. № 1–2. С. 11–25.

8. **Самойлович М. И., Бовтун В., Ринкевич А. Б., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Кемпа М., Нужный Д.** Пространственно-неоднородные материалы на основе решетчатых упаковок наносфер SiO₂ // *Инженерная физика*. 2010. № 6. С. 29–38.

9. **Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Цветков М. Ю.** Особенности фазовых превращений и кристаллизации в нанополостях решетчатых упаковок наносфер SiO₂ // *Наука и технологии в промышленности*. 2010. № 4. С. 73–84.

10. **Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М.** Фазовые превращения кремнезема в межсферических нанополостях опаловых матриц // *Российский химический журнал*. 2012. Т. LVI. № 3–4. С. 155–162.

11. **Самойлович М. И., Бовтун В., Белянин А. Ф., Цветков М. Ю., Клещева С. М., Кемпа М., Нужный Д.** Фазовые превращения и кристаллизация в нанополостях решетчатых упаковок наносфер кремнезема // *Наноинженерия*. 2011. № 2. С. 32–38.

M. I. Samoylovich¹, Head of Department, **V. Bovtun**², Leading Researcher, **A. F. Belyanin**¹, Chief Researcher, **D. Nuzhnyy**², Senior Research, **M. Kempa**², Head of Laboratory, **S. M. Klescheva**¹, Leading Researcher, **M. Savinov**², Senior Researcher

¹ Central Research Technological Institute "TECHNOMASH", Moscow,

e-mail: samoylovich@technomash.ru

² Institute of Physics of the ASCR, Prague, CZECH REPUBLIC

Dielectric Properties of the Opal Matrix with Filled Interspherical Nanospacing Zinc Oxide

The conditions of formation of nanocomposites on the basis of lattice packing SiO₂ nanospheres (opal matrices) with included clusters of crystalline of piezoelectric ZnO in interspherical nanospacing are considered. The structure of these nanocomposites studied with electron microscopy, Raman spectroscopy and X-ray diffraction methods. Results of measuring of the dielectric characteristics in a wide frequency range of the submissions received, are viewed.

Keywords: nanocomposites, meta-materials, opal matrix, zinc oxide, X-ray diffractometry, Raman spectroscopy, microwave properties

References

1. **Sarychev A. K., Shalaev V. M.** Electrodynamics of meta-materials. World Scientific and Imperial College Press, 2007. 200 p.

2. **Kong J. A.** Electromagnetic wave interaction with stratified negative isotropic media. *Progress in Electromagnetics Research, PIER*. 2002. V. 35. P. 1–52.

3. **Golovanov O. A., Efimov A. A., Tyumin A. A., Grachev A. I.** Difraktsiya elektromagnitnykh voln na magnetnom nanokompozite v pryamougol'nom volnovode. *Radiopromyshlennost'*. 2012. N 4. P. 129–137.

4. **Samoylovich M. I., Rinkevich A. B., Bovtun V., Belyanin A. F., Nuzhnyy D., Kempa M., Klescheva S. M.** СВЧ-характеристики, микроволновая проводимость и диэлектрические свойства нанокомпозитов на основе опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей металлами. *Наноинженерия*. 2012. N 3. P. 22–30.

5. **Ринкевич А. Б., Устинов В. В., Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Кузнецов Е. А.** Нанокомпозиты на основе опаловых матриц с 3D-структурой, образованной магнитными наночастицами. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2008. N 4. P. 55–63.

6. **Ustinov V. V., Rinkevich A. B., Perov D. V., Samoilovich M. I., Klescheva S. M.** Anomalous magnetic antiresonance and resonance in ferrite nanoparticles embedded in

opal matrix. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2012. V. 324. P. 78–82.

7. **Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Белянин А. Ф., Кемпа М., Нужный Д., Тsvetkov М. Ю., Клещева С. М.** Оптические, магнитные и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей кристаллическими мультиферроиками, пьезоэлектрическими и сегнетоэлектрическими материалами. *Российский химический журнал*. 2012. Т. LVI. N 1–2. P. 11–25.

8. **Самойлович М. И., Бовтун В., Ринкевич А. Б., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Кемпа М., Нужный Д.** Пространственно-неоднородные материалы на основе решетчатых упаковок наносфер SiO₂. *Инженерная физика*. 2010. N 6. P. 29–38.

9. **Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Тsvetkov М. Ю.** Особенности фазовых превращений и кристаллизации в нанополостях решетчатых упаковок наносфер SiO₂. *Наука и технологии в промышленности*. 2010. N 4. P. 73–84.

10. **Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М.** Фазовые превращения кремнезема в межсферических нанополостях опаловых матриц. *Российский химический журнал*. 2012. Т. LVI. N 3–4. P. 155–162.

11. **Самойлович М. И., Бовтун В., Белянин А. Ф., Тsvetkov М. Ю., Клещева С. М., Кемпа М., Нужный Д.** Фазовые превращения и кристаллизация в нанополостях решетчатых упаковок наносфер кремнезема. *Наноинженерия*. 2011. N 2. P. 32–38.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.382-027.31

С. П. Тимошенко, д-р техн. наук, проф., зав. каф., **С. А. Анчутин**, вед. инженер,
В. Г. Рубчиц, вед. технолог, **Н. М. Зарянкин**, вед. инженер, **А. И. Виноградов**, инж.-технолог,
e-mail: plavec@list.ru, **И. С. Дернов**, инж.-технолог, **Е. С. Кочурина**, аспирант,
e-mail: kochurinaes@gmail.com
Московский институт электронной техники (технический университет)

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА НА КНИ-СТРУКТУРАХ

Поступила в редакцию 30.12.2013

Рассмотрены особенности конструкции чувствительного элемента (ЧЭ) микромеханического акселерометра на КНИ-структурах, представлены результаты расчета конструкции: проведен модельный, статический анализ, а также расчет номинальных значений емкостей ЧЭ. Изложены особенности технологии изготовления ЧЭ. Приведены результаты исследования опытных образцов чувствительного элемента микромеханического акселерометра.

Ключевые слова: чувствительный элемент, микромеханический акселерометр, КНИ-структуры, модальный анализ, статический анализ, технология изготовления, номинальные емкости, результаты исследования

Использование структур кремний на изоляторе (КНИ) позволяет добиться существенного повышения быстродействия микроэлектронных схем при одновременном снижении потребляемой мощности и габаритных размеров. Подложка, выполненная по технологии кремний на изоляторе, представляет собой трехслойный пакет, который состоит из монокристаллической кремниевой пластины, диэлектрика и размещенного на нем тонкого поверхностного слоя кремния. В качестве диэлектрика в нашем случае выступает диоксид кремния SiO_2 .

Преимуществом КНИ-структур является наличие тонкого поверхностного слоя изоляции от кремниевого основания, который обеспечивает полную электрическую изоляцию отдельных приборов на чипе. Это обуславливает целый набор достоинств: увеличение быстродействия; снижение энергопотребления; возможность создания радиационно-стойких схем и схем, работающих при высоких температурах (до 350°C) [1].

Особенности конструкции ЧЭ

Конструкция чувствительного элемента (ЧЭ) микромеханического акселерометра (рис. 1) пред-

ставляет собой массу 1, подвешенную на торсионах 2.

В конструкции (рис. 1) предусмотрена емкостная система съема сигнала, представляющая собой 30 дифференциальных пар электродов 3. При появлении воздействующего ускорения вдоль оси чувствительности 4 масса 1 перемещается, что при-

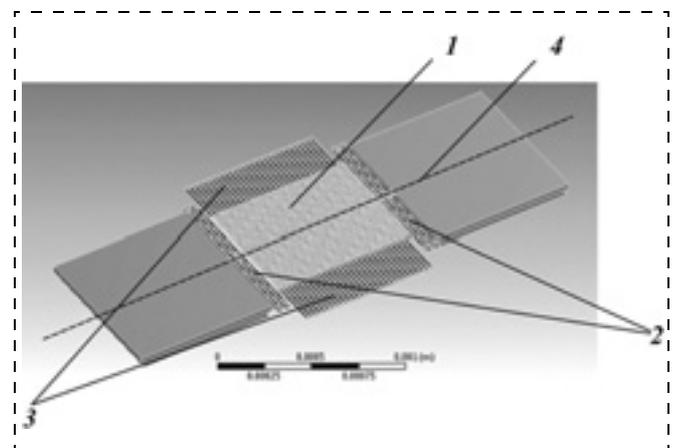


Рис. 1. Геометрическая модель ЧЭ микромеханического акселерометра

водит к изменению значений емкостей электродов 3. По изменению значений емкостей судят о значении воздействующего ускорения.

Расчет конструкции ЧЭ

Результаты модального анализа ЧЭ микромеханического акселерометра, проведенного в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS [2, 3], приведены на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки). При моделировании учитывали анизотропию свойств монокристаллического кремния. Анизотропные свойства кремния были промоделированы как свойства ортотропного материала со следующими параметрами:

модуль Юнга $E_X = E_Y = 169,1$ ГПа, $E_Z = 130,13$ ГПа;

коэффициент Пуассона $\nu_{XY} = 0,0622$, $\nu_{YZ} = \nu_{XZ} = 0,3617$;

модуль сдвига $G_{XY} = 50,9$ ГПа, $G_{YZ} = G_{XZ} = 79,6$ ГПа;

плотность материала $\rho = 2328$ кг/м.

Модальный анализ показал, что рабочая форма колебаний ЧЭ (а значит и соответствующая степень свободы) является самой мягкой (собственная частота около 3,54 кГц). Паразитные формы колебаний имеют более высокие собственные частоты (более 7,9 кГц) и поэтому практически не влияют на суммарную деформацию подвеса ЧЭ, их вклад в движение ЧЭ минимален. Высокие значения собственных частот являются гарантией отсутствия резонансных эффектов при типовых внешних воздействиях (с частотами до 2 кГц).

Статический анализ проводили для модели ЧЭ в предположении линейности деформаций подвеса ЧЭ. Расчет показал, что относительное смещение ЧЭ при действии силы тяжести вдоль оси чувствительности составляет 0,06 мкм/г.

Расчет номинальных значений емкостей ЧЭ

Эквивалентная схема ЧЭ микромеханического акселерометра показана на рис. 3.

Емкости C_1 и C_2 образуются как сумма индивидуальных емкостей соответствующей гребенчатой структуры. Каждая структура содержит 30 отдельных емкостей. Отдельная емкость гребенки ЧЭ показана на рис. 4.

Для каждой гребенки ЧЭ микромеханического акселерометра можно записать

$$C_1 = \varepsilon_0 \frac{bL}{h_0 + dx} + \varepsilon_0 \frac{bL}{h_1 - dx};$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \frac{bL}{h_0 - dx} + \varepsilon_0 \frac{bL}{h_1 + dx},$$

где $\varepsilon_0 = 8,85$ пФ/м; $b = 30$ мкм — высота профиля ЧЭ микромеханического акселерометра;

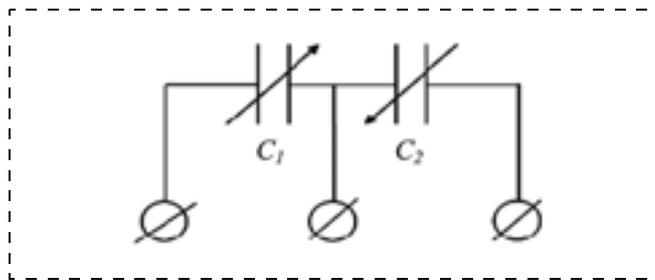


Рис. 3. Эквивалентная схема ЧЭ микромеханического акселерометра

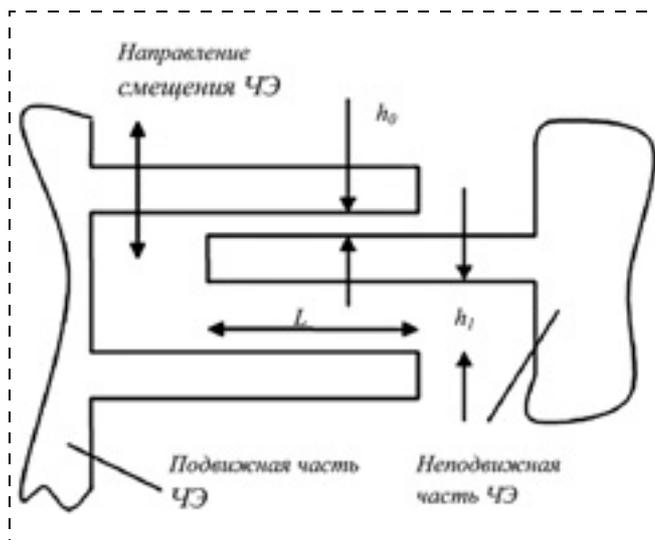


Рис. 4. Схематичное изображение одиночной емкости гребенки ЧЭ микромеханического акселерометра

$L = 252$ мкм — длина рабочей части электродов (зона перекрытия электродов подвижной и неподвижной частей ЧЭ); $h_0 = 3$ мкм — номинальный зазор (при отсутствии ускорения, в положении покоя); $dx = K_M g_Y$ — смещение ЧЭ под действием ускорения, сообщаемого ему силой тяжести, т. е. ускорения свободного падения g ; $K_M = 0,08$ мкм/г — крутизна статической характеристики ЧЭ, $g_Y = g \sin(\alpha) \approx g \cdot \alpha$ — значение проекции ускорения g на ось чувствительности ЧЭ микромеханического акселерометра; α — малый угол отклонения оси чувствительности ЧЭ микромеханического акселерометра от горизонтальной плоскости.

Тогда можно записать для измерителя дифференциальной емкости:

$$C_1 = \varepsilon_0 bL \left(\frac{1}{h_0 + K_M \cdot 1g \cdot \alpha} + \frac{1}{h_1 - K_M \cdot 1g \cdot \alpha} \right);$$

$$C_2 = \varepsilon_0 bL \left(\frac{1}{h_0 - K_M \cdot 1g \cdot \alpha} + \frac{1}{h_1 + K_M \cdot 1g \cdot \alpha} \right);$$

$$dC = C_1 - C_2 = \frac{2b \cdot \varepsilon_0 \cdot 1g \cdot K_M \cdot L(h_0^2 - h_1^2)}{(h_0^2 - \alpha^2 \cdot (1g \cdot K_M)^2)(h_1^2 - \alpha^2 \cdot (1g \cdot K_M)^2)} \alpha;$$

$$dC \approx \frac{2b \cdot \varepsilon_0 \cdot 1g \cdot K_M \cdot L(h_0^2 - h_1^2)}{h_0^2 h_1^2} \alpha + \frac{2b \cdot \varepsilon_0 (1g \cdot K_M)^3 \cdot L(h_0^4 - h_1^4)}{h_0^4 h_1^4} \alpha^3.$$

Обозначим масштабный коэффициент ЧЭ микромеханического акселерометра (для 30 гребенок):

$$K_\alpha = \frac{2 \cdot 30b \cdot \varepsilon_0 \cdot 1g \cdot K_M \cdot L(h_0^2 - h_1^2)}{h_0^2 h_1^2}.$$

Тогда нелинейность преобразования примет вид:

$$N_3 = \frac{K_\alpha (1g \cdot K_M)^2 (h_0^2 + h_1^2)}{h_0^2 h_1^2};$$

$$\delta N = \frac{N_3 \alpha_{\max}^2}{K_\alpha} 100 \%.$$

Численно можно оценить параметры статической характеристики преобразования ЧЭ микромеханического акселерометра:

$$K_\alpha = 0,00023 \text{ пФ/}^\circ = 0,013 \text{ пФ/рад};$$

$$\delta N \approx 0,0014 \%.$$

Аналогично можно показать, что при использовании измерителя емкости с функцией

$dC/C_\Sigma = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_{\text{оп}} K_y$, где $U_{\text{оп}} = 2,5 \text{ В}$ — опорное напряжение; $K_y = 100$ — коэффициент усиления,

$$K_\alpha = 21,8 \text{ мВ/}^\circ = 1,25 \text{ В/рад}.$$

Особенности изготовления ЧЭ

Чувствительный элемент микромеханического акселерометра был изготовлен из монокристаллического кремния <100>.

При изготовлении ЧЭ микромеханического акселерометра для проведения процессов травления канавок в кремнии на глубину до 100 мкм и более с вертикальными стенками был предложен так называемый *Bosch*-процесс. Его суть состоит в многократном повторении двухстадийного цикла травления. В первой стадии 1-го цикла проводится травление кремния через маску на сравнительно небольшую глубину в среде эле-газа (SF₆) (рис. 5, а). Во второй стадии 1-го цикла выполняется пассивация стенок протравленного профиля с помощью, например, разряда на основе хладона-318 (С4F₈) (рис. 5, б). Во 2-м цикле травления ионная компонента разряда удаляет пассивирующий слой полимера со дна канавки и углубляет ее, в то время как боковые стенки канавки остаются защищенными маскирующим слоем полимера (рис. 5, в). Далее снова проводится пассивирующая стадия, и т. д. В результате травление идет только в вертикальном направлении с небольшими периодическими подтравками в боковых направлениях.

В настоящее время существует ряд плазменных источников, которые могут быть использованы для травления кремния. Наиболее оптимальным плазменным источником для глубокого анизотропного травления кремния с высоким аспектным отношением является ИСР. Одним из

ключевых параметров в данном процессе является давление, от которого в значительной мере зависят физические свойства плазмы, химические процессы, происходящие в объеме плазмы. Существует тенденция к понижению давления с сохранением качества и воспроизводимости травления, особенно для травления узких профилей и/или профилей с высоким аспектным соотношением. Уменьшение давления приводит к уменьшению числа столкновений иона с нейтральными атомами и молекулами, что увеличивает поступление ионов в зону реакции. Кроме того, появляются такие

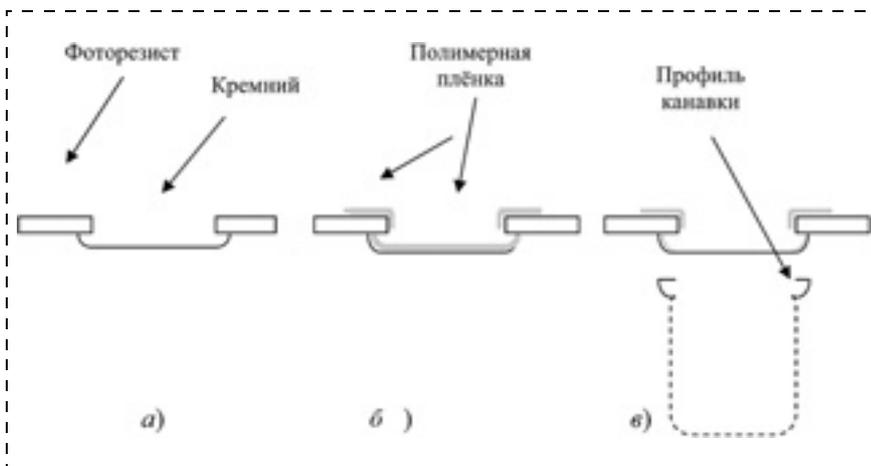


Рис. 5. Иллюстрация Bosch-процесса:

а — 1-й цикл (стадия травления); б — 1-й цикл (стадия пассивации); в — 2-й цикл (стадия травления)

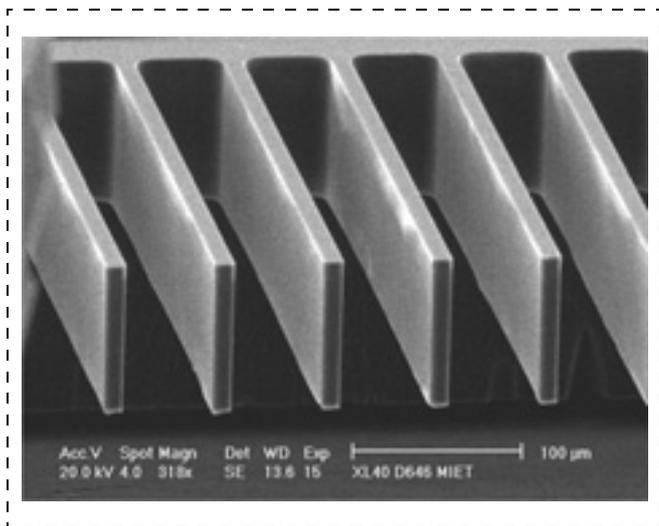


Рис. 6. Профиль сквозного травления структуры типа гребенки в типовом режиме травления

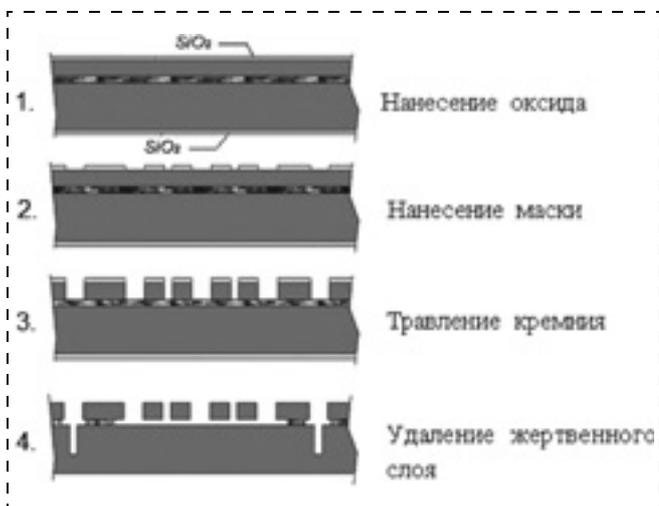


Рис. 7. Схема изготовления ЧЭ микромеханического акселерометра

преимущества, как, например, повышение энергезависимости побочных продуктов реакции и уменьшение концентрации газовой фазы, а также отсутствие поверхностной полимеризации. Дополнительные преимущества — это уменьшение остатков продуктов реакции, уменьшение вероятности повторного осаждения продуктов реакции.

Один из типовых режимов травления глубоких канавок в кремнии с использованием Bosch-процесса включает следующие параметры:

- расход газа SF₆ — 300 см³/мин;
- расход газа C₄F₈ — 150 см³/мин;
- скважность подачи газов — 7/2,5 с;
- давление газа — 3 Па;
- мощность ИСР-разряда — 2000 Вт;
- мощность смещения — 100 Вт;
- температура подложкодержателя 10 °С.

С использованием данного режима травления получен профиль гребенки, показанный на рис. 6.

Ширина выступов составляет 10 мкм, высота — 100 мкм. Вертикальность профиля — $90 \pm 0,5$ мкм.

Далее на рис. 7 представлена схема изготовления ЧЭ микромеханического акселерометра.

Были изготовлены образцы ЧЭ микромеханического акселерометра, геометрия которых соответствует модели, представленной выше на рис. 1.

Результаты исследования

Работоспособность изготовленных образцов ЧЭ микромеханического акселерометра оценивалась с помощью микросхемы K1322ПП1Н4 [4], которая осуществляет преобразование емкостей в выходное напряжение. Результаты исследования представлены на рис. 8 (см. четвертую сторону обложки). Параметры изготовленных образцов ЧЭ микромеханического акселерометра:

масштабный коэффициент — 700...1100 мВ/г

нулевой сигнал — 20...150 мВ

нелинейность статической характеристики — 0,5...1,5 %

СКО шума (в полосе 1 Гц) — 2...10 мВ

* * *

Используемая при проектировании программная система конечно-элементного анализа ANSYS позволила провести модальный анализ и статический анализ конструкции ЧЭ с учетом анизотропии свойств монокристаллического кремния. Расчет номинальных емкостей позволил оценить предварительные параметры ЧЭ микромеханического акселерометра. Результаты исследования изготовленных образцов ЧЭ микромеханического акселерометра показали состоятельность разработанного технологического процесса.

Список литературы

1. Попов В. П., Антонова И. В., Французов А. А., Наумова О. В., Сапожникова Н. В. Кремний-на-изоляторе: материалы и приборные структуры // Микросистемная техника. 2001. № 10. С. 35—40.
2. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферова М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
3. Анчутин С. А., Плеханов В. Е., Тимошенко С. П. Введение в конечно-элементный анализ. Использование ANSYS в задачах математической физики: уч. пособие. М.: Изд-во МИЭТ, 2007. 280 с.
4. Материалы сайта: URL: <http://www.msyst.ru>
5. Xinxin Liang, Minhang Bao. Micromachining of multi thickness sensor array structures with dual stage etching technology // J. of Micromechanics and Microengineering. 2001. V. 11. № 3. P. 239—244.
6. Robert Bosch. GmbH, Patent US 5501893, 1996.
7. Introduction to Deep Silicon Etching using the Bosch Process. URL: <http://www.micronanosystems.info> (July 2007).

S. P. Timoshenkov, Prof., Head of The Chair, S. A. Anchutin, Leading Engineer, V. G. Rubchic, Leading Technologist, N. M. Zaryankin, Leading Engineer, A. I. Vinogradov, Engineer-Technologist, I. S. Dernov, Engineer-Technologist, E. S. Kochurina, Graduate Student
National Research University of Electronic Technology, Moscow

Features of the Design and Manufacturing of Micromechanical Accelerometer Sensor for Soi Structures

The article describes the design features of the sensing element (SE) micromechanical accelerometer on SOI structures. Use of structures with a thin surface layer of insulation from the silicon base provide complete electrical isolation of individual devices on a chip. Using SOI structures allowed to develop a micromechanical accelerometer that has a number of advantages: increased performance, reduced power consumption, the ability to create radiation-resistant circuits and circuits operating at high temperatures.

The results of modal and static analysis of SE micromechanical accelerometer conducted in a software system of finite-element analysis ANSYS. In the simulation took into account the anisotropy of the properties of single-crystal silicon. Results of calculation of the nominal capacitance value SE. And also given a numerical estimate parameters of the static characteristic conversion Jae micromechanical accelerometer.

Outlined the features of production technology SE micromechanical accelerometer using "Bosch" process. Shows one of the typical modes of deep grooves etched in silicon using "Bosch"-process. A scheme of making Jae micromechanical accelerometer.

The results of research prototypes micromechanical accelerometer sensor. Shows typical results of research samples (static characteristic, long-term drift), as well as the basic model parameters produced samples micromechanical accelerometer.

Keywords: sensitive element, micromechanical accelerometer, SOI structures, modal analysis, static analysis, manufacturing technology, the nominal capacity, the results of the research

References

1. Popov V. P., Antonova I. V., French A. A., Naumova O. V., Sapozhnikova N. V. Silicon-on-insulator: materials and device structures. *Microsystem technology*. 2001. N 10. P. 35–40.
2. Kaplun A. B., Morozov E. M., Alferova M. A. ANSYS in the hands of the engineer: a Practical guide. M.: Editorial URSS, 2003. 272 p.
3. Antchoutine S. A., Plekhanov V. E., Timoshenkov S. P. Introduction to finite element analysis. The use of ANSYS in

problems of mathematical physics: Tutorial. M.: MIET, 2007. 280 p.

4. **Materials** of the site: URL: <http://www.msyst.ru>

5. **Xinxin Liand, Minhang Bao.** Micromachining of multi thickness sensor array structures with dual stage etching technology. *J. of Micromechanics and Microengineering*. 2001. V. 11, N 3. P. 239–244.

6. **Bosch R.** Pat. US 5501893, 1996. GmbH.

7. **Introduction** to Deep Silicon Etching using the Bosch Process. URL: <http://www.micronanosystems.info> (July 2007).

УДК 51-74

А. В. Вишнеков, д-р техн. наук, проф., **В. В. Ерохин**, канд. техн. наук, доц.,
Е. М. Иванова, канд. техн. наук, доц.

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ), Москва,
avishnekov@hse.ru, vladimir.v.erokhin@gmail.com, emivanova@hse.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ВЫБОРА МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Поступила в редакцию 19.02.2014

Наличие большого числа микроконтроллеров на мировом рынке ставит перед разработчиками аппаратуры сложную задачу выбора конкретной модели микроконтроллера. Данная задача имеет как чисто технические, так и экономические аспекты. Предлагается комплексный подход к ее решению, основанный на использовании методов теории принятия решений. Предлагаемый подход обеспечивает возможность автоматизации процедуры выбора микроконтроллера в соответствии с предпочтениями разработчика и требованиями решаемой задачи.

Ключевые слова: проектное решение, лицо, принимающее решение (ЛПР), микроконтроллер, семейство микроконтроллеров, производительность, эксперт, критерии оценки качества проектного решения

Введение

В процессе выбора микроконтроллера (МК) для реализации системы управления некоторым объектом разработчику приходится руководствоваться

множеством критериев, причем выбрать микроконтроллер, удовлетворяющий одновременно всем поставленным критериям практически невозможно. На практике инженер осуществляет выбор на

основе своего предыдущего опыта и интуиции. Часто выбор на такой основе дает вполне удовлетворительные результаты, однако он не может быть предложен как базовый, поскольку опыт у всех разный, на рынке все время появляются новые изделия с ранее не существовавшими возможностями и т. д. Поэтому имеется потребность формализовать, а лучше автоматизировать выбор микроконтроллера для системы управления. Неформализованные попытки решить задачу выбора предпринимались и ранее [1–3].

В работе [2] предлагается интуитивная методика выбора микроконтроллера, основанная на выборе наиболее надежного поставщика, из изделий которого затем выбирается нужный микроконтроллер. Слабости данного подхода очевидны: отсекается целая группа производителей — новичков на рынке, возможно предлагающих инновационные решения, не говоря о других недостатках такой методики.

Тем не менее рациональное зерно в этом подходе имеется: выбрать нужное изделие сразу чрезвычайно затруднительно при современном большом предложении на рынке, поскольку в процессе отбора выставлены критерии из совершенно разных областей. Здесь и экономические факторы, и технические, и технологические, и даже политические, если считать таковыми надежность поставщиков. Описанный выше подход позволяет существенно сократить выбор, на последнем этапе можно отбирать микроконтроллер из уже вполне обозримого множества, однако такая методика чересчур субъективна.

Постановка задачи

В связи со сказанным выше предлагается решить задачу выбора микроконтроллера на несколько последовательных этапов, постепенно сужающих пространство выбора, и на каждом этапе решать частную многокритериальную задачу, к которой применять методы поддержки принятия решений. Каждый из методов имеет строгий алгоритм применения, что в конечном счете позволит автоматизировать весь процесс выбора МК согласно условиям проекта.

Предлагается рассмотреть следующие подзадачи или этапы:

- **этап 1** — выбор/назначение группы экспертов для участия в процессе принятия решения по выбору МК;
- **этап 2** — выбор экспертами из всего списка эксплуатационных, системных, экономических и производственных требований к предполагаемому изделию нескольких наиболее значимых в качестве критериев отбора семейства МК (группа 1);

- **этап 3** — определение экспертами весов критериев группы 1;
- **этап 4** — выбор наиболее подходящего семейства и ранжирование остальных альтернативных семейств МК согласно взвешенной группе критериев 1;
- **этап 5** — выбор критериев отбора МК внутри семейства (группа 2);
- **этап 6** — выбор наиболее подходящего МК и ранжирование остальных альтернативных изделий согласно взвешенной группе критериев 2.

Задачи этапа 1 "выбора группы экспертов"

На этапе 1 лицо, принимающее решение (ЛПР) назначает группу экспертов для участия в проекте и задает веса каждому из экспертов, определяя значимость каждого голоса (или коэффициента компетентности эксперта) при принятии проектного решения. При этом руководствоваться можно как опытом и стажем работы каждого эксперта, так и важностью области их профессиональных интересов для рассматриваемого проекта.

Допустим, что ЛПР назначил группу из четырех экспертов ($k_{\mathcal{E}} = 4$). Для расчета коэффициентов компетентности экспертов можно использовать метод ранга [4].

Согласно этому методу ЛПР задает числовые оценки компетентности экспертов по десятибалльной шкале, на основании которых можно вычислить их коэффициенты компетентности [5]. Например, ЛПР определил следующие ценности голосов экспертов: $C_{\mathcal{E}1} = 10$; $C_{\mathcal{E}2} = 8$; $C_{\mathcal{E}3} = 9$; $C_{\mathcal{E}4} = 10$. Сумма цен голосов экспертов равна $S_{\mathcal{E}} = 37$. Коэффициенты компетентности экспертов "рассчитываются по формуле: $W_{\mathcal{E}i} = C_{\mathcal{E}i}/S_{\mathcal{E}}$ и составят $W_{\mathcal{E}1} = 0,27$; $W_{\mathcal{E}2} = 0,22$; $W_{\mathcal{E}3} = 0,24$; $W_{\mathcal{E}4} = 0,27$.

Задачи этапа 2

"выбора критериев отбора семейства МК"

На этапе 2 группа экспертов рассматривает все возможные критерии отбора (требования к предполагаемому изделию). Предлагаемый ниже перечень требований (критериев) [1, 3] может быть как расширен за счет специфических требований заказчика, так и сокращен по желанию экспертной группы. Эти требования условно можно разбить на следующие подгруппы: эксплуатационные требования (общая стоимость разработки, диапазон рабочих температур, гарантийный срок эксплуатации МК/изделия, тип корпуса МК, требования к электрической совместимости, режимам работы, энергопотребления, источникам питания, надежности и др.); производственные требования (уникальность или типичность объекта управления или

решаемой задачи управления, пожелания заказчика или личные предпочтения и опыт разработчиков, наличие альтернативных поставщиков контроллера, наличие текущего сопровождения контроллеров, требование секретности и защищенности кода, доступность полной документации на изделие, доступность средств разработки и отладки, удовлетворительная история ("брендовость") компании-производителя/поставщика, техническое сопровождение и др.); системные требования (вычислительная мощность ядра CPU, тактовая частота, пиковая производительность, удельная производительность, разрядность регистров и шин, архитектура блока CPU (Motorola, Intel, PowerPC, MIPS, ARM и др.), характеристика системы команд, требуемый объем адресуемой памяти RAM, ROM, требуемые характеристики системы прерываний, наличие прямого доступа к памяти, наличие требуемой номенклатуры периферийных устройств — таймеров, ЦАП/АЦП, ШИМ, ЖКИ, число параллельных/последовательных портов, и др.).

Каждый i -й эксперт исходя из собственного видения особенностей проекта и задачи, голосует за включение того или иного j -го критерия в группу 1, проставляя оценки (C_{ij}) "0" или "1" в соответствующей графе табл. 1. Заметим, что для нашего примера список критериев в таблице сокращен по сравнению с исходным перечнем, но аналогичным образом можно оценить любое требуемое число критериев. По каждому критерию высчитывается взвешенная сумма S_j голосов экспертов с учетом коэффициентов компетентности каждого эксперта

$$\text{по формуле } S_j = \sum_{i=1}^{k_{\text{Э}}} C_{ij} W_{\text{Э}i}$$

При составлении таблицы считается, что определенные функции проектируемых на основе микроконтроллеров систем могут быть реализованы с использованием внешних компонентов. Например, если в системе необходим АЦП, то он может быть как компонентом контроллера, так и внешним компонентом, что существенно расширяет пространство выбора микроконтроллера и затрудняет решаемую задачу. Также необходимо понимание экспертами, что определенные критерии часто не являются независимыми, и из одного свойства в некоторой степени вытекает другое. Например, критерий известности ("брендовости") архитектуры неявно подразумевает наличие большого выбора доступного и часто (условно) бесплатного программного обеспечения (ПО). В таких случаях целесообразно вынести на рассмотрение комплексный/составной критерий, включающий в себя последовательную проверку нескольких условий (т. е. несколько вложенных критериев). Именно по указанным причинам необходим выбор **значимых** критериев отбора (группа 1).

Цель данного этапа — создать минимальный набор значимых критериев, по которому в дальнейшем будет проводиться отбор семейства микроконтроллеров. Условием отбора критериев в группу 1 может быть либо большинство отданных голосов экспертов, либо условие $S_j \geq 0,5$, либо комбинация обоих условий. Если число отобранных критериев слишком велико для применения методов поддержки принятия решений, то этап 2 можно повторить для сокращения этого перечня или для определения меньшего числа составных критериев с большим числом вложенных критериев отбора. В нашем примере в группу 1 были выбраны шесть критериев по условию $S_j \geq 0,5$

Таблица 1

Оценки C_{ij} критериев K_j экспертами $\text{Э}i$ для включения в группу 1

Критерий K_j	Оценка i -го эксперта с весом голоса $W_{\text{Э}i}$				S_j
	$W_{\text{Э}1} = 0,27$	$W_{\text{Э}2} = 0,22$	$W_{\text{Э}3} = 0,24$	$W_{\text{Э}4} = 0,27$	
K1. Предпочтения экспертов	1	1	1	1	1
K2. Невысокая стоимость МК	1	1	1	1	1
K3. Большой гарантийный срок эксплуатации	0	0	0	1	0,27
K4. Требуемые электрические параметры	0	0	0	0	0
K5. Требуемые механические параметры	0	1	0	0	0,22
K6. Доступность отладочных средств	1	0	0	0	0,27
K7. "Брендовость" архитектуры CPU	0	1	1	1	0,73
K8. Допустимая потребляемая мощность	0	1	1	0	0,46
K9. Наличие альтернативных поставщиков	1	1	0	1	0,76
K10. Требуемая вычислительная мощность ядра	1	1	1	1	1
K11. Требуемый объем RAM (ОЗУ)	1	1	1	1	1
K12. Требуемый объем ROM (ПЗУ)	1	1	1	0	0,46
K13. Требуемый тип корпуса	0	0	0	1	0,27

(см. табл. 1, выделенные серым строки). Следует отметить, что некоторые из выбранных критериев могут быть комплексными/составными, т. е. включают в себя несколько *вложенных критериев*. Для составных критериев эксперты (или ЛПР) определяют перечень и важность вложенных критериев, согласно которым следует сравнивать выбираемые альтернативные семейства МК. В нашем примере в итоговый список группы 1 попадут шесть критериев ($k_K = 6$), два из которых (K2 и K4) являются составными.

K1. Предпочтения экспертов.

K2. Вычислительная мощность ядра.

K2.1. Удельная производительность, MIPS¹/МГц.

K2.2. Разрядность.

K2.3. Тактовая частота.

K3. "Брендовость" архитектуры CPU.

K4. Стоимость разработки.

K4.1. Стоимость контроллера с дополнительными компонентами.

K4.2. Стоимость ПО.

K5. Объем ОЗУ, Мбайт.

K6. Наличие альтернативных поставщиков.

Задачи этапа 3

"определение весов критериев группы 1"

На этапе 3 выполняется ранжирование критериев группы 1 по важности с вычислением веса каждого критерия. Вес критерия может быть рассчитан с использованием методов аналитических иерархий, метода предпочтений и метода ранга [4]. В дальнейшем для определенности будем использовать метод ранга. Для нашего примера с привлечением четырех экспертов считаем, что они сформировали следующие десятибалльные оценки (R_{ij}) критериев (см. табл. 1). Далее рассчитаем взвешенную сумму оценок C_{Kj} критерия Kj с учетом коэффициента $W_{\Delta i}$ компетентности каждого эксперта

$$\text{по формуле } C_{Kj} = \sum_{i=1}^{k_{\Delta}} R_{ij} \cdot W_{\Delta i}.$$

Исходя из взвешенных оценок C_{Kj} (табл. 2), рассчитаем веса критериев. Сумма цен критериев равна

$$S_K = \sum_{j=1}^{k_K} C_{Kj} = 40,11. \text{ Далее рассчитываются веса каждого } j\text{-го критерия по формуле } W_{Ki} = C_{Ki}/S_K.$$

Веса критериев $W_{K1} = 0,20$; $W_{K2} = 0,20$; $W_{K3} = 0,23$; $W_{K4} = 0,13$; $W_{K5} = 0,13$; $W_{K6} = 0,11$.

В результате расчетов получим следующее ранжирование критериев выбора семейства МК по важности $K3 > K2 = K1 > K4 = K5 > K6$. Таким

¹ MIPS — (англ.) Million Instructions Per Second или "миллион команд в секунду".

Таблица 2

Экспертные оценки R_{ij} важности критериев Kj ($j=1, \dots, 6$)

i	$W_{\Delta i}$	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	0,27	8	6	10	3	3	4
2	0,22	6	7	9	5	4	3
3	0,24	8	10	10	7	7	5
4	0,27	10	9	8	6	7	5
Взвешенная сумма оценок C_{Kj} критерия Kj		8,10	7,99	9,24	5,21	5,26	4,31

образом, в конце этапа 3 удалось сократить число критериев выбора до разумного значения и определить их веса.

Задачи этапа 4 "выбора семейства МК и ранжирования альтернатив"

Существует аналогичная проблема выбора со стороны собственно МК — в настоящее время их количество очень велико. Поэтому имеется необходимость отсеять явно неподходящие семейства МК и оставить для последующего выбора наиболее перспективные. При оценке учитываются как потребительские свойства МК, так и надежность ("брендовость") поставщика, набор средств разработки, предлагаемый с МК, а также и другие сведения. Здесь надо иметь в виду, что ряд МК, особенно популярных архитектур, дублируется несколькими производителями, в этом случае критерий альтернативного поставщика легко удовлетворяется.

Задача определения и сокращения перечня семейств МК решается группой экспертов на этапе 4 по аналогии с задачей отбора критериев на этапе 1. Для этого составляется табл. 3 (по аналогии с табл. 1), в которой каждый эксперт Δi голосует за (оценка "1") или против (оценка "0") включения семейств МК в перечень отобранных к дальнейшему рассмотрению. Затем определяется суммарное число голосов для каждой альтернативы и по большинству (≥ 3) голосов проводится выбор семейств. Необходимо отметить, что семейство следует оценивать по его "топовому" представителю, поскольку остальные микроконтроллеры семейства, как правило, уступают ему по ряду параметров.

Цель данного этапа — создать набор альтернатив, из которых в дальнейшем будет проводиться отбор одного семейства МК для рассматриваемого проекта. Пусть согласно табл. 3 экспертами были выбраны три альтернативы: A1-AT32AP7000, A2-PIC32MX360F512L, A3-LPC2138, по большинству голосов экспертов (число голосов ≥ 3 , выделенные строки).

Сравнительная оценка семейств МК

Критерии	Числовое значение характеристики (приоритет альтернативы по критерию)		
	A1	A2	A3
К1. Предпочтения экспертов, число голосов "за"	4(2)	3(3)	4(1)
К2. Вычислительная мощность ядра			
К2.1. Удельная производительность, MIPS/МГц	1,48(2)	1,56(1)	— (3)
К2.2. Разрядность	32(2)	32/16(1)	32/16(1)
К2.3. Тактовая частота	200(1)	80(2)	60(3)
К3. "Брендовая" архитектура ЦПУ МК	Avr(3)	MIPS(2)	ARM(1)
К4. Стоимость разработки			
К4.1. Стоимость контроллера с дополнительными компонентами	(2)	(3)	(1)
К4.2. Стоимость ПО	(1)	(2)	(3)
К5. Объем ОЗУ (Мбайт)	32 (1)	32(1)	32(1)
К6. Наличие альтернативных поставщиков	Несколько (2)	Несколько (2)	Много (1)

Теперь требуется сравнить эти альтернативы по выбранным критериям. Поскольку все оценки базируются на реальных числовых или лингвистических показателях (кроме К1, для которого приоритеты можно получить, например, с использованием числа голосов, табл. 3), то применение групповых методов принятия решений на данном этапе не требуется, поэтому работа группы экспертов на этом завершается. ЛПР заполняет таблицу сравнительной оценки альтернатив (табл. 4), расставляя приоритеты на основании данных компаний-производителей или поставщиков. Заметим, что метод расстановки приоритетов одинаково эффективен и для числовых характеристик (К2.1, К2.2, К5), и для лингвистических (К3, К6).

На данном этапе проекта мы видим множество различных критериев выбора, как числовых, так и лингвистических. Причем некоторые критерии

Таблица 3

Таблица оценок семейств МК (альтернатив А) экспертами Э_і

Наименование альтернативы	Оценка <i>i</i> -го эксперта с весом $W_{Э_i}$				Число голосов экспертов
	$W_{Э_1} = 0,27$	$W_{Э_2} = 0,22$	$W_{Э_3} = 0,24$	$W_{Э_4} = 0,27$	
8-разрядные					
A1. PIC16 (Microchip)	1	1	0	0	2
A2. PIC18F (Microchip)	0	0	0	1	1
A3. tinyAVR (Atmel)	0	0	1	0	1
A4. megaAVR (Atmel)	1	0	0	0	1
A5. XMEGA AVR (Atmel)	1	0	0	1	2
A6. P80C51SBAA (NXP)	0	1	0	1	2
16-разрядные					
A7. PIC24F (Microchip)	0	1	0	1	2
A8. PIC24H (Microchip)	0	0	0	0	0
A9. MSP430 (TI)	0	0	0	0	0
32-разрядные					
A10. PIC32MX360F512L (Microchip)	1	1	1	0	3
A11. AT32AP7000 (Atmel)	1	1	1	1	4
A12. AVR32 UC3 (Atmel)	1	1	0	0	2
A13. TM4C123x, Cortex M4 (TI)	0	0	1	0	1
A14. TM4C129x, Cortex M4 (TI)	1	0	0	1	2
A15. LPC2138 (NXP)	1	1	1	1	4
DSP					
A16. dsPIC30F (Microchip)	1	0	0	1	2
A17. dsPIC33F (Microchip)	0	1	0	1	2
A18. C5000™ (TI)	1	0	1	0	2
A18. C6000™ (TI)	0	0	0	0	0
...					

могут быть составными, т. е. для принятия решения о степени удовлетворенности по данному критерию необходимо проанализировать ряд вложенных критериев. Целесообразно в данном случае использовать метод аналитических иерархий [4], который позволяет сравнивать альтернативы по критериям различного типа (числовым и лингвистическим), сравнивать альтернативы по иерархически вложенным критериям, является прозрачным (дает возможность легко проследить последовательность вычислений). В основе этого метода лежит определение степени предпочтительности альтернативы на основании важности критериев и значений функций ценности альтернатив по каждому критерию. В нашем примере два критерия (К2, К4) являются составными и состоят из трех (К2.1, К2.2, К2.3) и двух (К4.1, К4.2) вложенных критериев соответственно.

Будем применять те же обозначения, что и на этапе 1: число критериев отбора $k_K = 6$ (критерии первого уровня — без учета вложенности), число альтернатив $k_A = 3$, k_{K_i} — число вложенных критериев для составного критерия K_i ($k_{K_2} = 3$, $k_{K_4} = 2$).

Шаг 1. Для каждого *i*-го составного критерия опустимся на уровень ниже в иерархии критериев ($K_{i,1}, K_{i,2}, \dots, K_{i,k_{K_i}}$). Для каждого такого подмножества определим свою внутреннюю взаимную важность вложенных критериев ($W_{i,1}, W_{i,2}, \dots$) для выбора альтернативы. Методика определения важ-

ности базируется на использовании метода аналитических иерархий, и в частности, использовании матрицы парных сравнений критериев. Можно выделить три случая.

- Все критерии равно важны ($W_{i,1} = W_{i,2} = \dots = 1/k_{Ki}$).
- Строгая приоритетность критериев (например, $K2.1 > K2.2 > K2.3$). Можно четко проранжировать все критерии по приоритетности и задать каждому свой уровень приоритета от 1 (низший) до k_{Ki} (высший), тогда общее число приоритетных единиц составит $n = 1 + 2 + \dots + k_{Ki} = 0,5(1 + k_{Ki})$, а вес, приходящийся на одну приоритетную единицу, будет равен $1/n = 2/(1 + k_{Ki})$. Значит вес критерия с приоритетом i составит $W = i \cdot 2/(1 + k_{Ki})$.
- Затруднение в расстановке приоритетов. Тогда можно воспользоваться процедурой попарного сравнения важности критериев из подмножества (по аналогии с процедурой попарного сравнения альтернатив из метода аналитических иерархий [3]).

Пусть для нашего примера ЛПР выбрал случай 2 как для критерия К2 ($K2.1 > K2.2 > K2.3$), так и для критерия К4 ($K4.1 > K4.2$). Тогда $W_{2,1} = 0,50$; $W_{2,2} = 0,33$; $W_{2,3} = 0,17$; $W_{4,1} = 0,67$; $W_{4,2} = 0,33$.

Шаг 2. Рассчитаем согласно методу аналитических иерархий степень предпочтения (и приоритеты) каждой альтернативы по каждому l -му составному критерию. Для этого согласно методу аналитических иерархий построим матрицы Y^{Kl} (l взаимного предпочтения альтернатив по каждому вложенному критерию. Элементом y_{ij}^{Kl} каждой матрицы является относительная важность альтернативы A_i по сравнению с альтернативой A_j по критерию Kl ($i = 1 \dots 3$; $j = 1 \dots 3$; $l \sim 2.1, 2.2, 2.3, 4.1, 4.2$).

При составлении матриц взаимного предпочтения альтернатив для нашего примера воспользуемся приоритетом каждой альтернативы из табл. 4. Используем следующую шкалу относительной важности альтернатив: равная важность — 1, умеренное превосходство — 3, большое превосходство — 5.

$$\begin{aligned}
 Y^{K2.1} &= \begin{vmatrix} 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{vmatrix}; & Y^{K2.2} &= \begin{vmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \\
 Y^{K2.3} &= \begin{vmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{vmatrix}; & Y^{K4.1} &= \begin{vmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{vmatrix}; \\
 Y^{K4.2} &= \begin{vmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{vmatrix}. & & (1)
 \end{aligned}$$

Далее с использованием значений y_{ij}^{Kl} каждой матрицы из (1) по каждому l -му критерию рассчитываем: цену альтернатив $C_{Kl, Aj}$, сумму цен альтернатив S_{Kl} и ценность каждой альтернативы $V_{Kl, Aj}$ по формулам [5]

$$\begin{aligned}
 C_{Kl, Aj} &= k_{Kl} \sqrt[k_{Kl}]{\prod_j y_{ij}^{Kl}}; & S_{Kl} &= \sum_{j=1}^{k_{Kl}} C_{Kl, Aj}; \\
 V_{Kl, Aj} &= \frac{C_{Kl, Aj}}{S_{Kl}}.
 \end{aligned}$$

Итоговая ценность альтернатив по критерию К2 (по его вложенным критериям К2.1, К2.2, К2.3) рас-

считывается по формуле $U_{K2, Aj} = \sum_{l=1}^3 V_{Kl, Aj} \cdot W_{K2.l}$

и составит $U_{K2, A1} = 0,28$; $U_{K2, A2} = 0,51$; $U_{K2, A3} = 0,21$.

Очевидно, что ранжирование альтернатив по степени предпочтительности (или по приоритетам) по критерию К2 дает следующий результат (в порядке убывания): А2 (ценность = 0,51, приоритет = 1), А1 (ценность = 0,28, приоритет = 2), А3 (ценность = 0,21, приоритет = 3). Итоговая ценность трех альтернатив по критерию К4 (по его вложенным критериям К4.1, К4.2) рассчитывается по

формуле $U_{K4, Aj} = \sum_{l=1}^2 V_{Kl, Aj} \cdot W_{K4.l}$ и составит

$U_{K4, A1} = 0,28$; $U_{K4, A2} = 0,51$; $U_{K4, A3} = 0,21$.

Ранжирование альтернатив по степени предпочтительности (или по приоритетам) по критерию К4 дает следующий результат (в порядке убывания): А2 (ценность = 0,51, приоритет = 1), А1 (ценность = 0,28, приоритет = 2), А3 (ценность = 0,21, приоритет = 3).

Шаг 3. Рассчитаем согласно методу аналитических иерархий степень предпочтения каждой альтернативы по каждому критерию верхнего уровня иерархии. Для этого составим новую версию табл. 4, исключив из нее вложенные критерии и проставив приоритеты, рассчитанные на шаге 2 (табл. 5, закрашенные строки).

Таблица 5
Сравнительная оценка альтернативных семейств МК

Критерий	Приоритет альтернативы A_j		
	A1	A2	A3
К1. Предпочтения экспертов	2	3	1
К2. Вычислительная мощность ядра	2	1	3
К3. "Брендовая" архитектура ЦПУ контроллера	3	2	1
К4. Стоимость разработки	2	1	3
К5. Объем ОЗУ	1	1	1
К6. Наличие альтернативных поставщиков	2	2	1

Далее построим матрицы Y^{Kl} (2) взаимного предпочтения альтернатив по каждому критерию из табл. 5, аналогичные матрицам (1). Используем ту же шкалу относительной важности альтернатив: 1, 3, 5.

$$Y^{K1} = \begin{vmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{vmatrix}; \quad Y^{K2} = \begin{vmatrix} 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{vmatrix};$$

$$Y^{K3} = \begin{vmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/3 \\ 5 & 3 & 1 \end{vmatrix}; \quad Y^{K4} = \begin{vmatrix} 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{vmatrix};$$

$$Y^{K5} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad Y^{K5} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Далее с использованием значений y_{ij}^{Kl} каждой матрицы Y^{Kl} из (2) проведем процедуру расчета итоговой ценности альтернатив по критериям верхнего уровня иерархии (аналогичную процедурам расчета на шаге 2 для вложенных критериев): $U_{A1} = 0,16$; $U_{A2} = 0,54$; $U_{A3} = 0,30$. Очевидно, что итоговое ранжирование альтернатив по степени предпочтительности дает следующий результат (в порядке убывания): A2 (ценность = 0,54), A3 (ценность = 0,30), A1 (ценность = 0,16).

Задачи этапа 5 "выбора критериев отбора МК"

На этапе 5 ЛПР выбирает критерии в группу 2 для отбора МК внутри семейства на основе анализа технического задания, спецификаций фирмы-изготовителя и предпочтений разработчиков. Перечень критериев может быть следующим: K1 — наличие необходимой периферии (составной); K2 — наличие дополнительного набора периферии, расширяющего возможности МК; K3 — стоимость (составной: кристалла и его монтажа); K4 — тип корпуса (оценка надежности платы); K5 — температурный диапазон эксплуатации; K6 — отладочные возможности МК; K7 — объем ОЗУ; K8 —

объем ПЗУ и другие критерии, вытекающие из задачи. Следует учесть, что при составлении группы 2 можно не включать ряд достаточно важных критериев, но имеющих одинаковые значения для разных представителей семейства, а остановиться лишь на критериях, по которым альтернативные МК различаются. Например, если все МК рассматриваемого семейства имеют одинаковую тактовую частоту, то сравнение альтернативных МК по этому критерию не имеет смысла.

Если ЛПР затрудняется с составлением перечня критериев группы 2, то можно провести процедуру группового принятия решения с участием экспертов, аналогичную процедуре выбора критериев в группу 1. Ранжирование критериев осуществляется ЛПР на основе анализа требований к техническому заданию по аналогии с этапом 3.

Будем считать, что на этом этапе была выбрана некоторая группа 2 критериев (табл. 6) и ЛПР задал их приоритеты таким образом: K1 (1), K2 (2), K3 (3), K4 (4), K5 (5). Рассчитаем их вес по аналогии с расчетами весов вложенных критериев K2.1, K2.2, K2.3, выполненным на этапе 4: $W_{K1} = 0,33$; $W_{K2} = 0,27$; $W_{K3} = 0,20$; $W_{K4} = 0,13$; $W_{K5} = 0,07$.

Задачи этапа 6 "выбора МК"

На этапе 6 необходимо выбрать наиболее подходящий МК для реализации проекта по критериям из группы 2 и выполнить ранжирование остальных альтернативных изделий. В простых случаях выбор конкретного экземпляра можно осуществлять и без применения методов принятия решений. Для более сложного случая применим метод аналитических иерархий, как и на этапе 4. Рассмотрим небольшой пример (табл. 6) выбора одного из четырех альтернативных МК (A1 — PIC32MX320F128H, A2 — PIC32MX440F256H, A3 — PIC32MX460F512L, A4 — PIC32MX460F256L) по пяти выбранным на пятом этапе критериям (K1—K5). Хотя фирма-изготовитель предоставляет существенно больший выбор МК семейства и видов корпусов для некоторых из них, для иллюстрации подхода ограничимся указанными в табл. 6 данными. Как и в

Таблица 6

Сравнительная оценка альтернативных МК семейства

Критерий	Вес критерия	Числовое значение характеристики (приоритет альтернативы по критерию)			
		A1	A2	A3	A4
K1. Отладочные возможности	0,33	2	2	1	1
K2. Объем Flash ПЗУ \geq 256 Кбайт	0,27	128K(2)	256K (1)	512K(1)	256K (1)
K3. Объем ОЗУ \geq 16 Кбайт	0,20	16K (2)	32K (1)	32K (1)	32K (1)
K4. Тип корпуса	0,13	TQFP-64 (1)	TQFP-64 (1)	XBGA-121 (3)	TQFP-100 (2)
K5. Стоимость	0,07	1	1	3	2

табл. 4, числа в скобках означают назначенные ЛПР приоритеты (относительную важность) каждой альтернативы по каждому критерию с точки зрения их актуальности для данного проекта.

Теперь аналогично использованному ранее методу аналитических иерархий рассчитаем степень предпочтения каждой альтернативы с учетом весов критериев: $U_{A1} = 0,17$; $U_{A2} = 0,26$; $U_{A3} = 0,28$; $U_{A4} = 0,29$. Отсюда ранжирование альтернатив по степени предпочтительности будет следующим: наиболее предпочтительная А4 (ценность = 0,29), далее — А3 (ценность = 0,28), А2 (ценность = 0,26), А1 (ценность = 0,17).

Заключение

В работе был рассмотрен вопрос выбора микроконтроллера при проектировании различных устройств управления и предложена методика решения задачи, состоящая из нескольких последовательных этапов. На каждом этапе, в результате применения методов поддержки принятия решений, объем выбора существенно сокращается, и в конечном итоге приводит к решению поставленной задачи. Разумеется, предлагаемый подход не является точным, однако он позволяет избежать

предвзятости специалистов, которая может привести к целому ряду неприятных для проекта последствий.

Предложенная методика выбора микроконтроллеров, основанная на формальных процедурах, позволяет автоматизировать отбор, учитывая множество факторов отбора исходя из специфики конкретной задачи, и получить в конечном итоге более качественное изделие.

Список литературы

1. **Ежов В.** Выбор микроконтроллера и другие решения для встраиваемой системы. [Электронный ресурс] // Электронные компоненты. 2008. № 11. С. 73–77. URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2192/doc/45630/> (Дата обращения: 18.02.2014).
2. **Giovino В.** Choosing a Microcontroller Architecture. [Электронный ресурс]. URL: http://microcontroller.com/Choosing_a_Microcontroller_Architecture_Part_1.htm (Дата обращения: 18.02.2014).
3. **Сердюков О. В., Мухин Ю. Д.** Выбор микроконтроллера. [Электронный ресурс]. URL: <http://asutpnews.ru/content/view/28/> (Дата обращения: 18.02.2014).
4. **Ларичев О. И.** Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Логос, 2002. 392 с.
5. **Трахтенгерц Э. А.** Компьютерная поддержка принятия решений. М.: СИНТЕГ, 1998. 376 с.

A. V. Vishnekov, Professor, **V. V. Erokhin**, Associated Professor, **E. M. Ivanova**, Associated Professor, National Research University Higher School of Economics, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Moscow, e-mail: avishnekov@hse.ru, verohin@hse.ru, emivanova@hse.ru

Automation of Microcontroller Choice Procedure

Currently many microcontrollers are produced around the world. They belong to different classes, thus may be used in different applications, they differ from each other in architecture and productivity of built-in-processors, peripheral set, memory volume, etc. But at the same time for the concrete task the only one microcontroller is necessary. Unfortunately, there is not "the best" microcontroller for all possible cases.

Selection of the microcontroller is complex multicriteria task. The choice depends on many factors, for example the features of the task, designer's skill and preferences, required technical features of microcontroller, economical requirements and even of fashion in some sense. Precise methods for decision of such kinds of tasks are absent.

The authors propose to solve the task of microprocessor choice using decision making theory in several steps. The first step is to define expert group. The group formulates criteria list as a base of future microcontroller choice, then during next steps number of choices is reduced sequentially and as result optimal in some sense microprocessor may be selected.

The described approach of microcontroller choice may be automated.

Keywords: project design, decision-maker person (DMP), the design solutions quality criteria, microcontroller, microcontroller's family

References

1. **Ezhov V.** Vibor Microcontroller i drugie resheniya dlya vstraivayemoy sistemi. *Electronniye komponenty*. 2008. N 11. P. 73–77. URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2192/doc/45630/> (For date: 18.02.2014).
2. **Giovino В.** Choosing a Microcontroller Architecture. URL: http://microcontroller.com/Choosing_a_Microcontroller_Architecture_Part_1.htm (For date: 18.02.2014).

3. **Serdyukov O. V., Mukhin Yu. D.** Vibor mikrokontrol-lera. URL: <http://asutpnews.ru/content/view/28/> (For date: 18.02.2014).
4. **Larichev O. I.** Teoriya I metody prinyatiya resheniy, a takzhe Khronoka sobitij v volshebnykh stranakh: Pupil book. 2-nd ed. Moscow.: Logos, 2002. 392 p.
5. **Trahtengerc Je. A.** Kompjutemaja podderzhka prinjatija reshenij. M.: SINTEG, 1998. 376 p.

Г. В. Молодцова, мл. науч. сотр., Р. А. Милованов, зам. нач. отдела, e-mail: Milovanov_r@inbox.ru,
 Д. Н. Зубов, мл. науч. сотр., Е. А. Кельм, мл. науч. сотр.,
 Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, г. Москва

ПОДХОДЫ К РАЗДЕЛЕНИЮ КРИСТАЛЛОВ СТЕКОВЫХ СБОРОК ПРИ АНАЛИЗЕ ОТКАЗОВ МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Поступила в редакцию 20.12.2013

При анализе отказов современных многокристалльных ИС типа 3D package, возникает необходимость обеспечения доступа к каждому кристаллу стекковой сборки. В работе рассмотрены подходы к разделению кристаллов на основе длительного воздействия дымящей азотной кислоты и циклического изменения температуры образца. Проведенные для flash-накопителя 32 Гбайт экспериментальные исследования показали возможность применения указанных подходов для получения доступа к каждому кристаллу стекковой сборки.

Ключевые слова: анализ отказов, 3D package, многокристалльные интегральные схемы (ИС), разделение кристаллов

Введение

В последнее время на рынке полупроводниковых изделий широкое распространение получили 3D-интегральные схемы (3D-ИС), объединяющие в одном корпусе несколько кристаллов, расположенных стекком (рис. 1) [1]. Одним из методов обеспечения межкристалльной коммутации является разварка проволокой (англ. *wire bonding*) контактных площадок кристаллов как между собой, так и с внешними выводами ИС. В англоязычных источниках такие ИС называют 3D package [2]. При анализе отказов 3D package ИС, помимо традиционных задач, связанных с декапсуляцией, послойным препарированием кристаллов и др. [3, 4], может возникать необходимость исследования отдельного кристалла из стека. Однако при расположении кристалла внутри стека, доступ к нему ограничен лежащими сверху кристаллами (кристаллом). Таким образом, для проведения исследований необходимо обеспечить к нему доступ. Для решения этой задачи, в работе [5] предлагается подход, при котором верхние (мешающие исследованию) кристаллы удаляются прецизионным фрезером. Недостатками такого метода являются существенный риск повреждения исследуемого и



Рис. 1. Схема 3D-ИС, объединяющей в одном корпусе четыре кристалла, расположенных стекком

разрушение верхних кристаллов. Альтернативным подходом является их разделение.

Поиск источников, описывающих подходы к разделению кристаллов 3D package ИС, показал, что в настоящее время эта тема мало изучена. Однако, учитывая необходимость развития методов анализа отказов 3D package ИС, в рамках данной работы были исследованы следующие подходы к разделению кристаллов:

- длительное воздействие дымящей азотной кислоты;
- циклическое изменение температуры стекковой сборки.

Образец для исследований.

Удаление корпуса

В качестве образца для исследований была выбрана 3D package ИС из состава *flash*-накопителя 32 Гбайт. Исследование его вертикального сечения, выполненного методом разделения ИС алмазной пилой с последующей шлифовкой области сечения, показало, что ИС содержит четыре кристалла, расположенных стекком (рис. 2). Межкристалльная коммутация выполнена золотой проволокой.

Учитывая, что корпус 3D package ИС выполнен из обычного пластика, его удаление (декапсуляция) выполнялось стандартным методом вываривания в дымящей азотной кислоте [3]. Образец был помещен на несколько минут в сосуд с предварительно нагретой до 90 °С дымящей азотной кислотой. После растворения корпуса и отделения кристаллов от многослойной печатной платы (МПП), стек был отмыт ацетоном в ультразвуковой (УЗ) ванне. Внешний вид образца после декапсуляции показан на рис. 3.

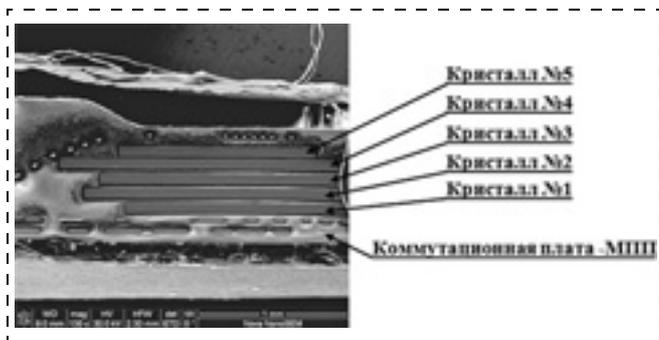


Рис. 2. Изображение фрагмента вертикального сечения 3D package IC — *flash*-накопителя 32 Гбайт

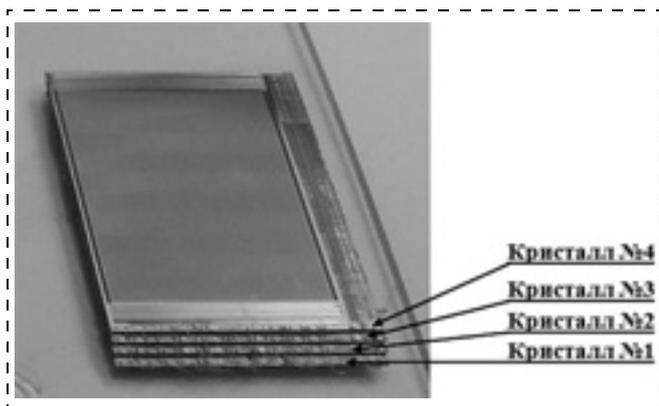


Рис. 3. Внешний вид 3D package IC — *flash*-накопителя 32 Гбайт после полного растворения корпуса

После того как доступ к стекловой сборке получен, были проведены исследования по разделению кристаллов.

Длительное воздействие дымящей азотной кислоты

Для разделения кристаллов дымящей азотной кислотой (ДАК) стекловая сборка была погружена в сосуд с предварительно нагретой до 120 °С ДАК. Через 30 мин кристаллы разделились попарно. Такой результат позволил предположить, что скрепляющий кристаллы материал (англ. *DA film (paste)* [6]) растворяется, однако вследствие малой области взаимодействия *DA film* и кислоты (только в области узкой щели между кристаллами), время процесса разделения зависит от площади кристалла и размеров щели. Таким образом, процесс разделения был продолжен.

Через 2 ч все кристаллы разделились (рис. 4, см. третью сторону обложки). После отмывки образцов ацетоном в УЗ ванне, кристаллы были исследованы. Анализ изображений кристаллов показал, что образцы не повреждены, за исключением алюминиевых контактных площадок, которые были удалены (рис. 5, см. третью сторону обложки).

Таким образом, подход к разделению кристаллов, основанный на длительном воздействии

ДАК, позволил получить доступ ко всем кристаллам 3D package IC. Однако дальнейшие работы по анализу отказов IC могут быть ограничены только послойным препарированием, так как различные типы анализа предусматривают подачу тестовых последовательностей на контактные площадки, которые удаляются при реализации описанного подхода.

Циклическое изменение температуры стекловой сборки

Реализация подхода к разделению кристаллов циклическим изменением температуры предусматривает последовательное воздействие высоких и низких температур на стекловую сборку. В проведенных исследованиях стекловая сборка была нагрета до 250 °С на плитке, а затем резко охлаждена до 195 °С погружением в сосуд с жидким азотом. Повторение циклов "нагрев — охлаждение" 4 раза привело к парному разделению кристаллов. Дополнительные три цикла позволили разделить полученные пары кристаллов. Таким образом, семикратное повторение циклов "нагрев — охлаждение" позволило получить доступ ко всем кристаллам 3D package IC (рис. 6, см. третью сторону обложки).

Учитывая, что при реализации данного подхода паста *DA film* не растворилась, для полноценного осуществления доступа к кристаллам, они были отмыты ацетоном в УЗ ванне. На рис. 7 (см. третью сторону обложки) приведены изображения разделенных кристаллов после их отмывки. Проведенные исследования показали, что подход к разделению кристаллов, основанный на циклическом изменении температуры стекловой сборки, позволяет получать доступ ко всем кристаллам. При этом в отличие от подхода, основанного на длительном воздействии ДАК, данный подход позволяет получать образцы с сохраненными контактными площадками, что делает возможным применение большинства методов анализа отказов.

Заключение

Рассмотрены подходы к разделению кристаллов стекловыхборок 3D package IC. Проведенные исследования показали, что длительное воздействие дымящей азотной кислоты и циклическое изменение температуры образца позволяют получить доступ ко всем кристаллам стекловой сборки *flash*-накопителя 32 Гбайт. Основным недостатком подхода, основанного на длительном воздействии ДАК, является удаление контактных площадок, что может ограничить дальнейшие работы по анализу отказов только послойным препарированием кристалла. При необходимости сохранения контактных площадок разделение кристаллов может быть осуществлено на основе циклического изменения температуры.

Список литературы

1. Xie Y., Chen Y., Sun G., Ouyang J. Three-dimensional Integrated Circuits: Design, EDA, and Architecture. Boston: Now Publishers Inc, 2011. 153 p.

2. Garrou P., Bower C., Ramm P. Handbook of 3D Integration: Volumes 1. Technology and Applications of 3D Integrated Circuits. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2012. 799 p.

3. Beck F. Integrated circuit failure analysis. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1998. 174 p.

4. Ross R. J. Microelectronics failure analysis. Desk reference. 6-ed Ed. Ohio: ASM International, 2011. 660 p.

5. <http://www.ultratecusa.com>

6. Toh C. H., Mehta Gaurav, Tan Hua Hong, Ong Wilson P. L. Die Attach Adhesives for 3D Same-Sized Dies Stacked Packages // Proc. of Electronic Components and Technology Conference, 2008. P. 1538—1543.

G. V. Molodtsova, Junior Researcher, R. A. Milovanov, Assistant Chief of Department, e-mail: Milovanov_r@inbox.ru, D. N. Zubov, Junior Researcher, E. A. Kelm, Junior Researcher
Institute of Nanotechnology Microelectronics RAS

Approaches to a Die Decoupling During Failure Analysis of the 3D Package Integrated Circuits

During failure analysis of integrated circuits, it is often necessary to have opportunity to inspect surface of die. But modern IC processing technology often provide integration of number of overlapping dies in one package (3D package type). In this case upper die complicate access to low die. Thus finding techniques which provide opportunity to inspect surface of each die is actual. In present work we consider approaches to a die decoupling with long and cyclic change of the IC's temperature. Our experimental research shows ability of use both approaches to a die decoupling. Dies exposure to fuming nitric acid leads to removing aluminium bonding pads and in this case further IC failure analysis limited only deprocessing. Cyclic change of the IC's temperature provide to safe bonding pads and give opportunity to use a majority of failure analysis techniques.

Keywords: failure analysis, 3D package, multilayer integrated circuit, die decoupling

References

1. Xie Y., Chen Y., Sun G., Ouyang J. Three-dimensional Integrated Circuits: Design, EDA, and Architecture. Boston: Now Publishers Inc., 2011. 153 p.

2. Garrou P., Bower C., Ramm P. Handbook of 3D Integration: Volumes 1. Technology and Applications of 3D Integrated Circuits. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2012. 799 p.

3. Beck F. Integrated circuit failure analysis. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1998. 174 p.

4. Ross R. J. Microelectronics failure analysis. Desk reference. 6-th Ed. Ohio: ASM International, 2011. 660 p.

5. <http://www.ultratecusa.com>

6. Toh C. H., Mehta Gaurav, Tan Hua Hong, Ong Wilson P. L. Die Attach Adhesives for 3D Same-Sized Dies Stacked Packages // Proc. of Electronic Components and Technology Conference, 2008. P. 1538—1543.

УДК 621.3.049.776

В. Г. Спирин, д-р техн. наук, e-mail: spvl49@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева
Арзамасский политехнический институт (Филиал НГТУ им. П. Е. Алексеева)

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ПЛАТЫ С ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Поступила в редакцию 27.01.2014

Разработаны три конструктивно-технологических варианта многоуровневых плат с изоляцией проводящих уровней толстой пленкой органического диэлектрика. В качестве альтернативы межуровневых переходов выдвинута идея соединения выводов компонентов к контактным площадкам разных уровней коммутации, в том числе и расположенных на межуровневой изоляции. Данное решение повышает надежность, плотность проводников и снижает трудоемкость изготовления плат.

Ключевые слова: микросборка, многоуровневая плата, толстопленочная полимерная изоляция

На пути перехода от микро- к нанoeлектронике требования к уменьшению площади, занимаемой межсоединениями проводников разных уровней, неуклонно ужесточаются. Рост функциональной сложности электронных устройств, использование многовыводных полупроводниковых компонентов в микросборках (МСБ), постоянно возрастающие требования по быстрдействию и плотности упа-

ковки заставляют разработчиков электронных устройств искать новые конструктивно-технологические решения проектирования и изготовления коммутационных плат.

В тонкопленочных многоуровневых платах (рис. 1) используют пленки диэлектрика толщиной 2...4 мкм. Такая толщина пленок не позволяет создавать межуровневую изоляцию (МИ) без ее про-

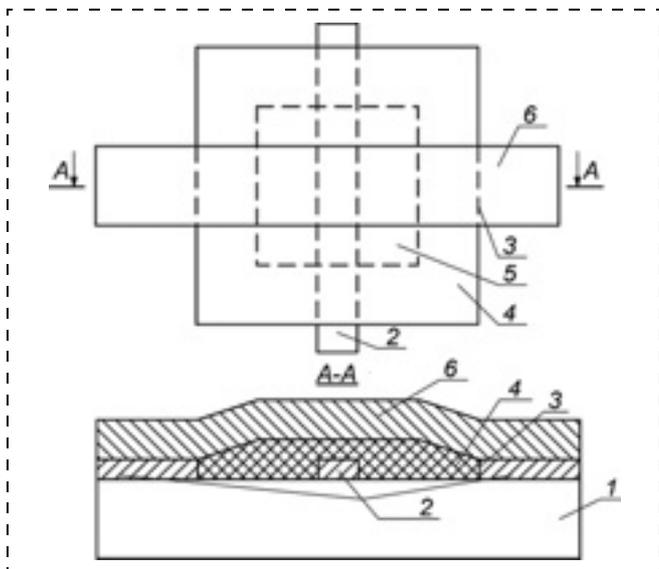


Рис. 1. Двухуровневая плата:

1 — подложка; 2 — проводник первого уровня; 3 — ступенька; 4 — МИ второго уровня; 5 — МИ первого уровня; 6 — проводник второго уровня

колов, которые вызывают короткие замыкания между проводниками разных уровней. Причинами проколов изоляции являются пористость диэлектрика, загрязнения, неоднородность структуры подложки, механические повреждения и т. д. Чтобы исключить образование сквозных проколов МИ формируют в 2—3 слоя [1]. Однако такое решение увеличивает трудоемкость изготовления МСБ. Увеличение толщины МИ приводит к возрастанию высоты ступенек, на которых происходит обрыв проводников второго и последующих уровней [2].

Таким образом, основными технологическими проблемами, которые возникают при создании тонкопленочной многоуровневой коммутации, являются пробой изоляции и обрыв проводников на ступеньках МИ. Причем эти два дефекта связаны между собой. Действительно, увеличивая толщину МИ, можно исключить ее пробой. Например, в работе [3] предложено использовать МИ из полиимидного лака толщиной 8...15 мкм. Практические исследования, выполненные авторами работы [3], показывают, что при толщине диэлектрического слоя более 8 мкм сквозные поры в МИ отсутствуют. Однако при толстых пленках МИ для известных конструктивно-технологических вариантов многоуровневых плат, использующих неорганические и органические диэлектрики, становится проблематичным предотвращение обрыва проводников на ступеньках МИ.

Наиболее часто в многоуровневых платах на жестких подложках в качестве МИ используют органические и неорганические диэлектрики. Предельная толщина неорганического диэлектрика, получаемого методами вакуумного осаждения, обычно

не превышает 3...4 мкм, при этом паразитная емкость в местах пересечений составляет 1...2 пФ при ширине проводников 100 мкм. Большинство органических диэлектриков имеют невысокую нагревостойкость. Например, максимальная рабочая температура негативного фоторезиста ФН-11КС не превышает 200 °С.

Еще одной серьезной проблемой создания тонкопленочной многоуровневой коммутации является высокая трудоемкость изготовления, которая обусловлена большим числом технологических операций по формированию МИ и высших уровней коммутации. Например, формирование МИ из полиимидного лака в два слоя требует 12 операций. Высокая трудоемкость и низкий процент выхода годных плат существенно повышают их себестоимость.

Цель данной работы — разработка многоуровневых коммутационных плат, содержащих тонкопленочные резисторы, проводники и контактные площадки (КП), конденсаторы, в которых в качестве МИ используется толстая пленка органического диэлектрика.

Органические диэлектрики с толщиной более 10 мкм после полимеризации образуют плотную пленку без пустот и трещин. Для повышения надежности изоляции толщина пленки органического диэлектрика должна составлять 20...30 мкм. Большинство полимеров имеют объемное удельное сопротивление не менее 10^{12} Ом·см. Вследствие относительной подвижности связей полимеры имеют высокий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), порядка 10^{-4} ... 10^{-5} 1/°С. Поэтому можно предполагать, что они плохо совместимы с материалами, имеющими меньший ТКЛР: металлами и полупроводниками. Однако высокая эластичность полимеров и сравнительно небольшой интервал рабочих температур электронных устройств позволяют широко применять их в виде пленок, нанесенных на поверхность любого материала [4].

Количество межуровневых соединений можно существенно уменьшить, если присоединение выводов компонентов выполнять на КП, расположенных на МИ. Для выбора материала МИ надо знать максимальную температуру в месте соединения вывода компонента с КП платы.

Рассмотрим основные виды компонентов, которые требуют разных методов монтажа их выводов. При монтаже бескорпусных компонентов в основном используют три метода присоединения их выводов к КП платы [5]: термокомпрессионная сварка, ультразвуковая сварка (УЗС) и пайка. Термокомпрессионная сварка используется для монтажа золотых проволочных выводов интегральных схем (ИС) модификации 1, а УЗС — для монтажа ленточных алюминиевых выводов ИС модификации 2. Пайкой присоединяются жесткие органи-

Технологические режимы соединения выводов компонентов к КП платы

Метод монтажа выводов ИС	Соединяемые металлы		Усилие сжатия, Н	Температура в месте соединения, °С	Время соединения, с
	Выводы ИС	КП платы			
Термокомпрессионная сварка	Золото, алюминий Золото	Cr—Al, Cr—Cu—Ni Лужение припоем	0,03...0,5 —	400...550 220...250	0,2...1,0
Ультразвуковая сварка	Алюминий	Cr—Al, Cr—Cu—Ni	0,2...0,4	150...200	0,3...0,8
Пайка	Лужение припоем	Лужение припоем	—	145...250	1...3

зованные выводы ИС. Примером таких компонентов являются бескорпусные кристаллы с объемными выводами, монтируемые методом перевернутого кристалла, компоненты в микорпусах, пассивные компоненты. В табл. 1 приведены основные технологические режимы [2, 5] соединения выводов компонентов к КП платы МСБ.

Многоуровневая коммутация необходима при разводке ИС, имеющих организованные выводы (ИС модификации 2, ИС в микорпусах и ИС, монтируемых методом перевернутого кристалла). Выводы ИС модификации 1 всегда можно развести в одном уровне коммутации. Учитывая, что выводы ИС модификации 1 соединяются с КП платы термокомпрессионной сваркой, при которой образуется высокая температура в месте соединения, выводы данных ИС монтируют только к КП первого уровня коммутации.

Согласно табл. 1 минимальная рабочая температура МИ должна быть не менее 250 °С. Нагревостойкие полимеры выпускает отечественная и зарубежная промышленность. Основные параметры некоторых из них приведены в табл. 2.

В России в качестве МИ используются полиимидный лак ПАК-1 и полибензомидазольный лак ПБИ-1. Эти полимеры имеют высокую радиационную и температурную стойкость. Они обладают хорошим набором технологических свойств: отсутствием газыделения в вакууме до температур 200...250 °С, устойчивостью к воздействию кислот и способностью к травлению [6].

Недостатками отечественных полимеров является их высокая стоимость, повышенное влагопоглощение, что создает определенные неудобства при технологическом процессе: хранение и нанесение таких лаков на подложки можно осуществлять только в сухих помещениях, перед герметизацией МСБ платы необходимо высушивать. Повышенное влагопоглощение ухудшает частотные свойства полимеров. Кроме того, эти лаки не обладают фоточувствительностью, что приводит к увеличению трудоемкости при формировании рисунка МИ, вследствие необходимости применения фоторезиста.

В качестве МИ более перспективным видится применение фотоэкспонируемых паяльных масок [7], которые широко используют при производст-

ве печатных плат, например маски Сагарасе ЕМР 110HR. Несмотря на то что нагревостойкость таких полимеров ниже, чем отечественных лаков, их применение более предпочтительно по технологическим свойствам. В состав паяльной маски Сагарасе ЕМР 110HR входят эпоксидная и акриловая смолы, а также фоточувствительные добавки.

Достоинства эпоксидов состоят в отсутствии побочных продуктов и очень малой усадке (0,2...0,5 %) при отверждении, высокой смачивающей способности и адгезии к различным материалам [4]. Паяльная маска обладает высоким разрешением и позволяет формировать перемычки шириной 25 мкм. Кроме того, маска Сагарасе ЕМР 110HR имеет высокую механическую прочность и твердость (7 баллов по десятибалльной шкале Мооса), высокую скорость экспонирования и проявления, прекрасную электроизоляцию и влагостойкость.

Материал SU-8 является негативным фоторезистом, относящимся к типу эпоксидных смол [8]. Это относительно недорогой материал. В микросистемной технике из него изготавливают диэлектрические структуры толщиной 2...1000 мкм. Этот фоторезист имеет превосходные адгезионные качества, его применяют практически с любыми подложками.

Использование толстой пленки МИ исключает ее пробой и снижает паразитную емкость между проводниками разных уровней, что повышает быстродействие электронных устройств. Вместе с тем традиционно считается, что толстые пленки МИ

Таблица 2

Параметры органических диэлектриков

Тип диэлектрика	Электрическая прочность, В/мкм	Диэлектрическая проницаемость	Максимальная рабочая температура, °С
Полиимидный лак ПАК-1	150	3,5 (1 кГц)	400
Полибензомидазольный лак ПБИ-1	100	4 (1 кГц)	400
Фотоэкспонируемая паяльная маска Сагарасе ЕМР 110HR	85	4 (1 МГц)	270
Фоторезистивный материал SU-8	—	3—4 (10 МГц)	270

не позволяют получать надежные межсоединения тонкопленочных проводников разных уровней и это является основной проблемой создания многоуровневой коммутации с высокой плотностью проводников в каждом уровне. Рассмотрим, каким образом ее можно решить.

В печатных, в том числе и гибких полиимидных платах, проводники формируют на двух противоположных поверхностях. Поэтому для соединения проводников разных уровней используют переходные отверстия, которые иногда занимают до 30 % площади платы. В тонкопленочных и толстопленочных платах проводящие и изолирующие слои формируют на одной поверхности подложки. В этом случае формирование переходных межуровневых соединений не всегда обязательно, так как возможно через окна в изоляции присоединение выводов компонентов непосредственно к КП конкретного уровня проводников. При этом межсоединения, формируемые в каждом уровне, должны быть максимально независимы друг от друга.

Рассмотрим три конструктивно-технологических варианта (КТВ) многоуровневых плат [9], которые различаются методами присоединения выводов компонентов к КП платы.

Как правило, во всех трех вариантах в первом уровне, т. е. подложке, располагают резисторы, нижние электроды конденсаторов, сигнальные проводники и КП, к которым присоединяют выводы любых компонентов и внешние выводы МСБ. Для повышения плотности коммутации в первом уровне располагают проводники с минимальной шириной, так как технологически это проще сделать именно в первом уровне. Кроме того, это более эффективно и с экономической точки зрения, поскольку операции с высокой вероятностью брака желательнее выполнять на более ранней стадии изготовления платы. В последующих уровнях коммутации располагают проводники питания и сигнальные проводники с увеличенной шириной, электроды конденсаторов и КП.

Первый КТВ платы с многоуровневой коммутацией предназначен для присоединения выводов компонентов к КП только сваркой. Конструкция такой двухуровневой платы показана на рис. 2. Основными компонентами в данном случае являются ИС и полупроводниковые приборы модификации 1 и 2, а также пассивные компоненты. Их выводы присоединяются к КП любого уровня методом УЗС, а выводы компонентов модификации 1 могут развариваться к КП первого уровня методом термокомпрессионной сварки [10].

Краткая технология изготовления двухуровневой платы, изображенной на рис. 2, приведена ниже.

1. Напыление структуры Cr—Al—Cr (толщина слоя 1...1,5 мкм).
2. Формирование проводников и КП первого уровня.

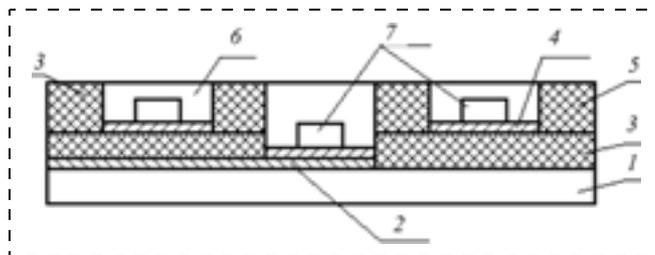


Рис. 2. Конструкция, предназначенная для присоединения выводов компонентов к КП сваркой:

1 — подложка; 2 — КП первого уровня; 3 — МИ; 4 — КП второго уровня; 5 — защитная изоляция; 6 — окно в защитной изоляции; 7 — выводы ИС

3. Формирование резисторов из хрома (Cr).
4. Химическая и ионная очистка подложки.
5. Нанесение и формирование рисунка МИ (толщина слоя 20...30 мкм).
6. Химическая и ионная очистка подложки.
7. Напыление структуры Cr—Al (толщина слоя 1...1,5 мкм).
8. Формирование проводников и КП второго уровня.
9. Формирование защитной изоляции (толщина слоя 20...30 мкм).
10. Разделение подложки на платы.

Многоуровневые платы используют в основном при создании цифровых МСБ, в которых применяют резисторы с большими допусками и низкой стабильностью. Поэтому адгезионный подслои хрома первого уровня коммутации может быть использован в качестве резистивного материала. Верхний слой хрома в проводниках и КП первого уровня обеспечивают адгезию МИ и проводящей пленки второго уровня. Для повышения адгезии пленок проводят как химическую, так и ионную очистку подложек.

При формировании защитной изоляции (ЗИ) оставляют открытыми только КП для присоединения выводов компонентов и внешних выводов МСБ. Она формируется из того же диэлектрика и теми же способами, что и МИ. Для качественного разделения подложки на платы в местах реза не должно быть пленочных элементов.

Отметим, что монтаж выводов компонентов на КП рассматриваемой платы легко осуществим, так как выводы бескорпусных компонентов имеют хорошую гибкость. В случае необходимости соединения КП разных уровней используют проволочные или ленточные перемычки из алюминия или вывод ИС модификации 2, разваривая их УЗС на КП разных уровней. Компоненты рекомендуется устанавливать на МИ, при этом увеличивается количество проводников первого уровня, так как они могут проходить под компонентами, а теплоотвод от компонентов ухудшается незначительно, ввиду малой толщины МИ.

Второй КТВ платы с многоуровневой коммутацией предназначен для монтажа смешанных ком-

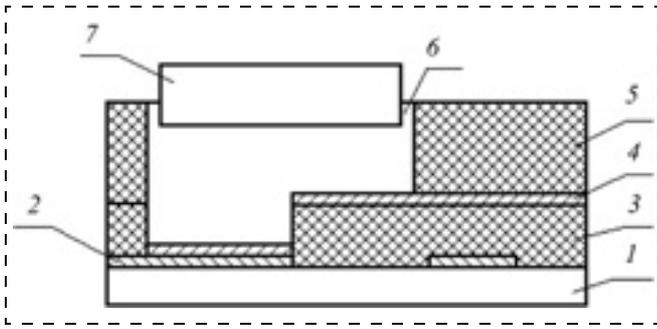


Рис. 3. Соединение КП разных уровней коммутации припоем:
1 — подложка; 2 — КП первого уровня; 3 — МИ; 4 — КП второго уровня; 5 — ЗИ; 6 — припойная паста; 7 — вывод ИС

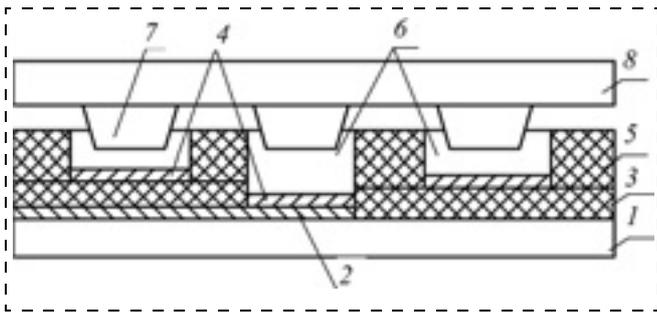


Рис. 4. Установка компонента пайкой методом перевернутого кристалла:
1 — подложка; 2 — КП первого уровня; 3 — МИ; 4 — КП второго уровня; 5 — ЗИ; 6 — припойная паста; 7 — выводы ИС; 8 — ИС с объемными выводами

понентов, выводы которых соединяются с КП платы либо сваркой, либо пайкой, а также, в случае необходимости, он позволяет формировать большое количество межуровневых соединений. Этот КТВ представляет собой комбинацию фрагментов, изображенных на рис. 2, 3. На рис. 3 показана конструкция КП, которая предназначена для соединения вывода компонента пайкой. Данная конструкция обеспечивает межуровневое соединение с помощью припоя. Технологический процесс изготовления такой платы практически такой же, как и платы первого КТВ. Отличие заключается лишь в том, что здесь в качестве последнего уровня коммутации (7-я операция) напыляют пленку структуры Cr—Cu—Ni толщиной 2...2,5 мкм.

На КП, используемые для присоединения выводов компонентов пайкой и (или) соединения разных уровней коммутации, с помощью дозатора наносят припойную пасту. Устанавливают на плату компоненты, выводы которых соединяются с КП платы пайкой. Затем плату помещают в печь и оплавливают припой, который при этом полностью заполняет окна в ЗИ. В целях миними-

зации числа межуровневых переходов их рекомендуется объединять с КП для пайки вывода компонента. Длина КП в каждом уровне коммутации (см. рис. 2) равна половине длины КП знакоместа компонента. Такой подход к конструированию платы повышает плотность упаковки и обеспечивает высокую надежность межуровневых соединений благодаря большим размерам КП. Компоненты, выводы которых присоединяются сваркой, устанавливают на заключительном этапе сборки платы.

Третий КТВ платы с многоуровневой коммутацией предназначен для установки компонентов с жесткими матричными или периферийными выводами методом пайки и представляет собой комбинацию фрагментов, изображенных на рис. 3, 4. На рис. 4 показан монтаж ИС с объемными выводами методом перевернутого кристалла. Отличие технологии изготовления таких плат от второго КТВ состоит в том, что все КП и переходные отверстия платы подвергают лужению. Нанесение припойной пасты выполняют известными методами [11].

Автором была разработана тестовая двухуровневая плата по первому КТВ (рис. 5). В качестве МИ был применен лак ПБИ-1 толщиной 6 мкм. На изготовленной плате размером 34 × 20 мм было установлено 17 логических микросхем модификации 2 с 16 выводами и один конденсатор. Присоединение выводов компонентов к обоим уровням коммутации осуществлялось УЗС.

Небольшое усложнение технологического процесса изготовления многоуровневых плат [12] позволит проводить контроль параметров МИ, таких как сопротивление и стойкость к высокому напряжению. Для этого каждый уровень проводников соединяют проводящими технологическими перемычками, над которыми в МИ формируют окна для последующего удаления перемычек. После формирования второго проводящего уровня проверяют параметры МИ, после чего технологические перемычки удаляют методом фотолитографии и травления.

Рассмотренные КТВ позволяют создавать число уровней коммутации свыше двух. Однако практика

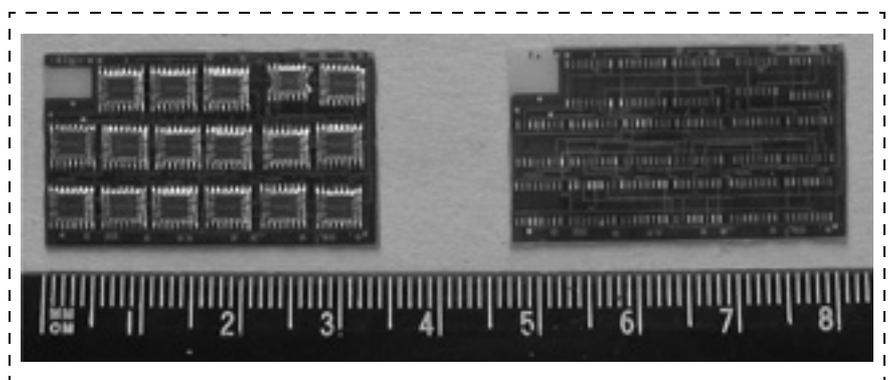


Рис. 5. Тестовая двухуровневая плата

проектирования МСБ и экономическая целесообразность показывают, что в большинстве случаев можно обойтись двумя уровнями коммутации [13].

Выводы

1. Разработаны три конструктивно-технологических варианта многоуровневых плат, в которых, в отличие от известных технических решений в качестве межуровневой и защитной изоляции применяется термостойкая, толстая (10...30 мкм) пленка фоточувствительного органического диэлектрика (негативного фоторезиста). Это позволяет присоединять выводы компонентов к контактным площадкам, расположенным на межуровневой изоляции, методами ультразвуковой сварки и пайки и исключает проколы изоляции, свойственные тонким пленкам.

2. Другой отличительной особенностью разработанных конструкций плат является то, что в них число межуровневых соединений проводников сведено к минимуму, что повышает надежность плат и плотность межсоединений.

3. За счет применения негативного фоторезиста и формирования межуровневой и защитной изоляции в один слой трудоемкость и себестоимость изготовления многоуровневой платы могут быть снижены в 2–3 раза по сравнению с известными тонкопленочными прототипами.

Список литературы

1. **Алексенко А. Г., Бадюлин С. С., Барулин Л. Г.** и др. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры. Под ред. Б. Ф. Высоцкого. М.: Советское радио, 1978. 351 с.
2. **Гимпельсон В. Д., Радионов Ю. А.** Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. М.: Машиностроение, 1976. 328 с.
3. **Грушевский А. М., Зимрутян А. В., Коледов Л. А., Томашенко С. Н.** Коммутационные платы на крупноформатных металлических подложках с полимерной изоляцией // Электронная промышленность. 1985. Вып. 2. С. 27–29.
4. **Материалы** микроэлектронной техники: учеб. пособие для вузов / Под ред. В. М. Андреева. М.: Радио и связь, 1989. 352 с.
5. **Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Газаров А. А.** Монтаж микроэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1986. 176 с.
6. **Коледов Л. А.** Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989. 400 с.
7. **Медведев А. М.** Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005. 304 с.
8. **Варадан В., Виной К., Дзоже К.** VЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.
9. **Спирин В. Г.** Конструкторско-технологические основы создания микросборок высокой плотности упаковки: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.27.01. Арзамас, 2008. 32 с.
10. **Панов Е. Н.** Особенности сборки специализированных БИС на базовых матричных кристаллах: учеб. пособие для ПТУ. М.: Высш. шк., 1990. 96 с.
11. **Зеленюк И.** Новые технологии нанесения припойных паст // Компоненты и технологии. 2003. № 9. С. 180–181.
12. **А. с. 1628836 СССР, МКИ⁵ Н 05 К 3/00.** Способ изготовления многослойной платы / В. С. Кораблев, В. Г. Спирин — 15.10.90.
13. **Уэбер С.** Многокристалльные модули — перспективное направление в области СБИС // Электроника. 1989. № 7. С. 63–71.

V. G. Spirin, Professor,

Nizhegorodskiy State Technical University im. R. E. Alekseeva Arzamasskiy Polytechnic Institute
(Branch NGTU im. R. E. Alekseeva), e-mail: spvl49@mail.ru

Design and Technology of the Layered Charge with Polymeric Insulation

Three constructive-technological variants of multi-level boards with insulation of leading levels by a thick film of organic dielectric which differ with methods of association of outputs of components to land areas boards are developed:

- *Outputs of components join to land areas boards only welding;*
- *Outputs of components join to land areas boards welding and soldering;*
- *Outputs of components join to land areas boards only soldering.*

Alternatively interlevel passages the idea of connection of outputs of components to land areas of different levels of switching, including allocated on interlevel insulation is advanced. As interlevel insulation it is more preferable to use negative photoresist with working temperature not less 250 °C. The Thick film of interlevel insulation solves two main problems: its breakthrough eliminates and reduces stray capacity between explorers of different levels that raises high-speed performance of electronic devices. The given decision raises reliability, density of explorers and reduces labor input of manufacture of boards.

Keywords: *micromodule, a multi-level board, thick-film polymeric insulation*

References

1. **Aleksenko A. G., Badulin S. S., Barulin L. G.** et al. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры / Eds. by B. F. Vysockij. M.: Sovetskoe radio, 1978. 351 p.
2. **Gimpel'son V. D., Radionov Ju. A.** Tonkoplenochnye mikroschemy dlja priborostroenija i vychislitel'noj tehniky. M.: Mashinostroenie, 1976. 328 p.
3. **Grushevskij A. M., Zimrutjan A. V., Koledov L. A., Tomashhenko S. N.** Kommutacionnye platy na krupnoformatnyh metallicheskih podlozhkah s polimernoj izoljaciej. *Jelektronnaja promyshlennost'*. 1985. N 2. P. 27–29.
4. **Materially** mikrojelektronnoj tehniky: Ucheb. Posobie dlja vuzov / Ed. by V. M. Andreev. M.: Radio i svjaz', 1989. 352 p.
5. **Gus'kov G. Ja., Blinov G. A., Gazarov A. A.** Montazh mikrojelektronnoj apparatury. M.: Radio i svjaz', 1986. 176 p.
6. **Koledov L. A.** Tehnologija i konstrukcii mikroschem, mikroprocessorov i mikrosborok. M.: Radio i svjaz', 1989. 400 p.

7. **Medvedev A. M.** Pечатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005. 304 p.
8. **Варадан В., Виной К., Дзоже К.** VЧ MJeMS и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 p.
9. **Спирин В. Г.** Конструкторско-технологические основы создания микросборок высокой плотности упаковки: Автореф. Дис. докт. техн. наук: 05.27.01. Арзамас, 2008. 32 p.
10. **Панов Е. Н.** Особенности сборки специализированных БИС на базовых матричных кристаллах: учеб. пособие для ПТУ. М.: Высш. шк., 1990. 96 p.
11. **Зеленюк И.** Новые технологии нанесения припойных паст. *Компоненты и технологии*. 2003. N 9. P. 180–181.
12. **А. с. 1628836 SSSR, МКИ⁵ Н 05 К 3/00.** Способ изготовления многослойной платы / В. С. Кораблев, В. Г. Спирин — 15.10.90.
13. **Weber S.** Многокристалльные модули — перспективное направление в области СБИС. *Jelektronika*. 1989. N 7. P. 63–71.

О. Е. Глухова, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: oeglukhova@yandex.ru,
А. С. Колесникова, канд. физ.-мат. наук, ассистент, **М. М. Слепченков**, канд. физ.-мат. наук, ассистент,
Д. С. Шмыгин, студент,
 Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ФОСФОЛИПИДА ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Поступила в редакцию 21.01.2014

Представлены результаты теоретического исследования, направленного на выявление закономерностей манипулирования молекулой фосфолипида на поверхности графена с помощью молекулярно-механического метода. Впервые показано, что взаимодействие между графеном и фосфолипидом возможно только в том случае, когда фосфолипидная молекула ориентирована параллельно плоскости графенового листа. Установлено, что движением фосфолипида можно управлять с помощью внешнего электрического поля напряженностью $1 \cdot 10^6$ В/м и тремя фуллеренами C_{60} , заряженными $+1e$. Разработанный способ манипулирования органическими и неорганическими молекулами может являться основой работы молекулярных двигателей (наномашин).

Ключевые слова: фосфолипид, графен, фуллерен, электрическое поле, траектория движения, энергия взаимодействия

В настоящее время активно исследуется взаимодействие биологических объектов с молекулами фуллеренов. В работе [1] описывается поведение фуллеренов внутри пространства между бислоями фосфолипидов. Проницаемость фуллеренов через головные липидные мембраны является результатом их взаимодействия с окружающей средой. Оценивается потенциал разрушения липидного слоя фуллеренами, находящимися в водной среде. Показано, что фуллерены вызывают дестабилизацию клеточной мембраны. При увеличении числа фуллеренов в бислое фосфолипидов наблюдается уменьшение стабильности этого бислоя [2], особенно, если расстояние между фуллеренами, расположенными вдоль бислоя, больше 0,8 нм [3]. Методом молекулярной динамики установлено, что одиночные фуллерены спонтанно проникают сквозь бислои фосфолипидов [3].

В работе [2] показано, что фуллерены являются токсичным материалом, и предложен способ уменьшения токсичности фуллерена на липосомный бислой для использования фуллерена в качестве материала, позволяющего доставлять лекарственные препараты.

Одной из актуальных задач современной медицины является доставка биообъектов в необходимую область организма человеку. Возможным способом решения этой проблемы является осуществление управления биомолекулой с помощью внешнего электрического поля. В связи с этим цель данной работы заключается в управлении поведением молекулярной структуры фосфолипида на поверхности графена во внешнем электрическом поле с помощью его взаимодействия с заряженным фуллереном C_{36} .

Объектом исследования является система, состоящая из графенового листа (4550 атомов) шириной zigzag 11,07 нм и шириной armchair 10,43 нм

и фосфолипида, находящегося на Ван-дер-Ваальсовом расстоянии от графенового листа. "Голова" фосфолипида в модели заряжена, что обусловлено самой природой фосфолипида [4]. Полярная головка представляет собой диполь с зарядами $+0,7$ и $-0,7$ эВ [4].

При исследовании Ван-дер-Ваальсового взаимодействия фосфолипида с графеном установлено, что энергетически наиболее выгодно располагаться фосфолипиду параллельно графеновому листу. Это объясняется тем, что равновесная энергия Ван-дер-Ваальсового взаимодействия при расположении фосфолипида "головкой" вниз составляет $-0,2$ эВ, а при расположении "головки" вверх относительно графенового листа составляет $-0,14$ эВ (рис. 1). При параллельном расположении фосфолипида относительно графенового листа энергия взаимодействия составляет $-0,6$ эВ. В связи с этим в дальнейшем будет рассматриваться расположение фосфолипида, параллельное графеновому листу. При таком взаимодействии фосфолипида и графенового листа фосфолипид движется по поверхности графена, что можно объяснить тепловым движением. На рис. 2 представлена траектория движения фосфолипида по графеновому листу при Ван-дер-Ваальсовом взаимодействии.

В целях определения способов управления движением молекулярной структуры фосфолипида рассмотрим действие внешнего электрического поля $10^5 \dots 10^7$ В/см по оси Y . Система находилась под воздействием поля в течение примерно 10 пс. На рис. 3...5 представлена траектория движения фосфолипида. Во внешнем электрическом поле фосфолипид вращался, выстраиваясь по направлению действия поля, что соответствует движению диполя. Также происходило поступательное движение

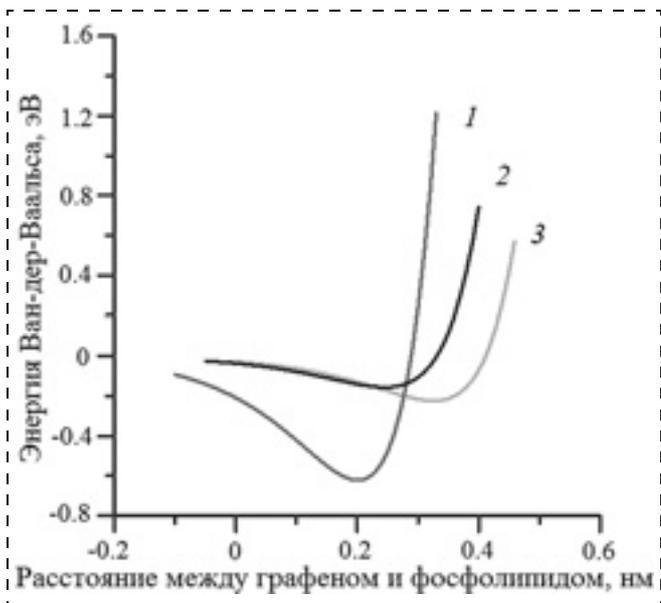


Рис. 1. Энергия Ван-дер-Ваальсового взаимодействия в зависимости от способа расположения молекулы фосфолипида:

1 — фосфолипид располагается параллельно графеновому листу; 2 — "голова" фосфолипида направлена от графена; 3 — "голова" фосфолипида направлена к графену

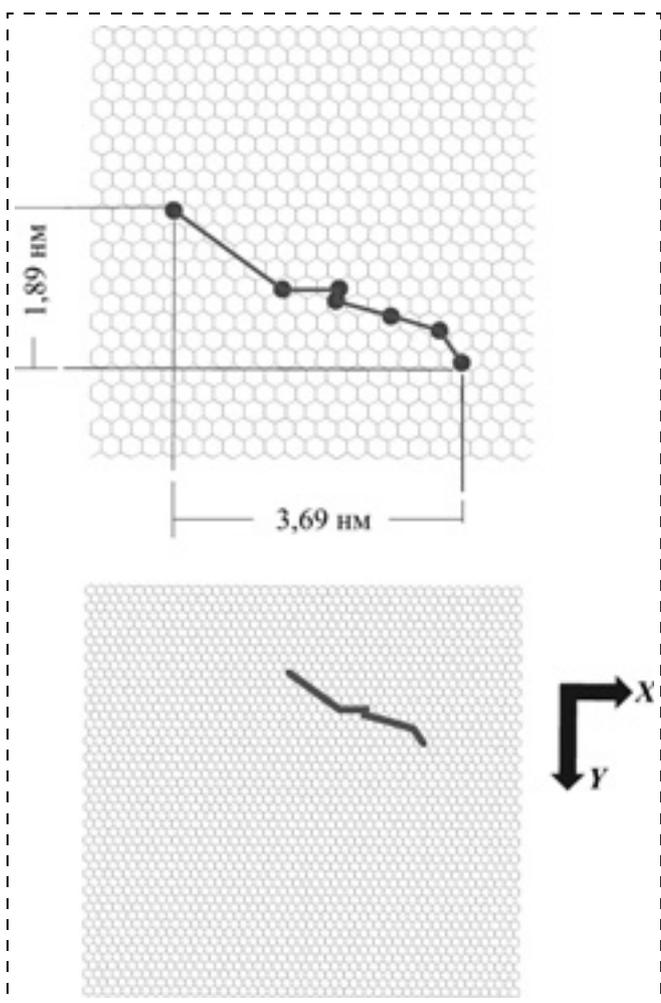


Рис. 2. Траектория движения фосфолипида за счет теплового эффекта и Ван-дер-Ваальсового взаимодействия

молекулы фосфолипида вдоль оси X . Установлено, что при изменении внешнего электрического поля траектория движения фосфолипида изменяется непредсказуемым образом, а также увеличивается расстояние между фосфолипидом и графеновым листом, что можно объяснить тепловым эффектом, возникающим в процессе взаимодействия графена и фосфолипида. При увеличении напряженности поля температура взаимодействия увеличивается. Следовательно, способов управления движением фосфолипида с помощью внешнего электрического поля не обнаружено.

В связи с этим рассмотрено взаимодействие молекулы фосфолипида с фуллереном. В последнее время активно развиваются исследования взаимодействия между фуллеренами и липидными бислоями молекулами. Особый интерес фуллерены представляют в качестве транспорта для доставки лекарств, таких как катионные пептиды. Установлено, что фуллерены C_{60} способствуют улучшению проникающей способности катионных пептидов в липидный бислой мембраны [6].

Для управляемой транспортировки фосфолипида по графеновому листу в данной работе перво-

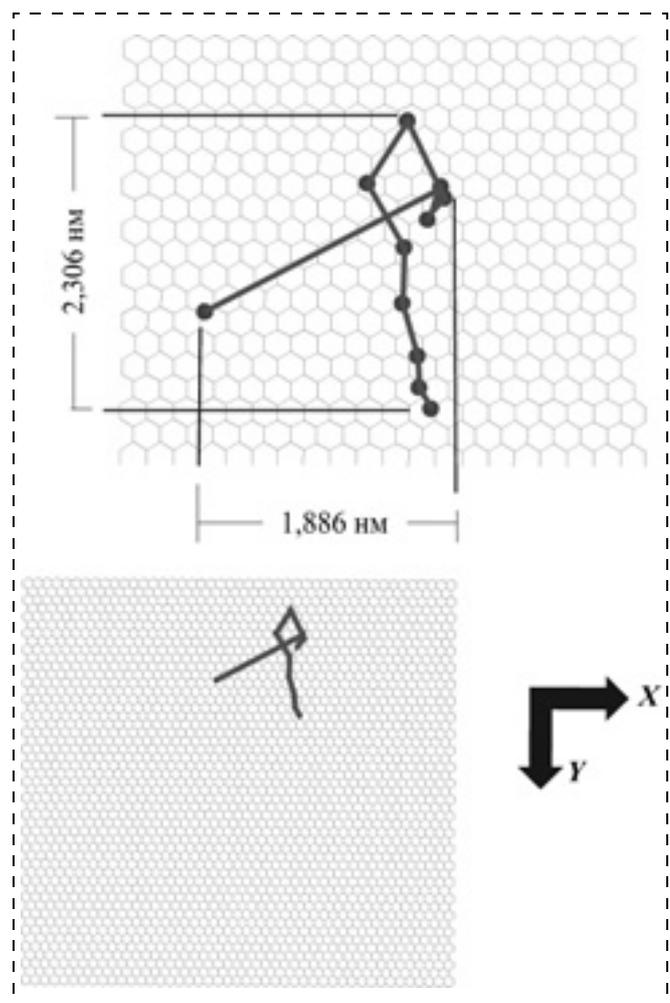


Рис. 3. Движение фосфолипида под действием поля $E_Y = 10^5$ В/м в плоскости XY

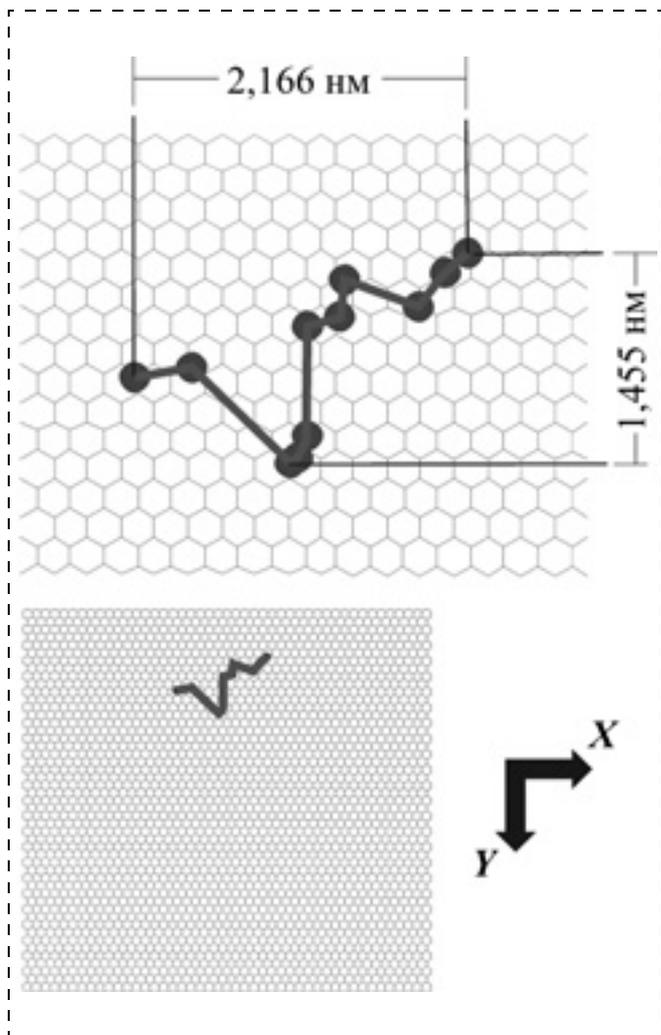


Рис. 4. Движение фосфолипида под действием поля $E_Y = 10^6$ В/м в плоскости XU

начально предложено использовать молекулу C_{36} . Рассмотрим детально взаимодействие молекулы фосфолипида с фуллереном C_{36} .

В качестве объекта исследования был выбран изомер фуллерена C_{36} группы точечной симметрии D_{6h} с топологической конфигурацией 36:15, которая наряду с конфигурацией 36:14, характерной для группы точечной симметрии D_{2d} , является самой стабильной по энергии для молекулы C_{36} [7]. В такой конфигурации атомный каркас фуллерена C_{36} образуют 8 шестиугольников и 12 пятиугольников (рис. 6).

Для выявления закономерностей управления движением молекулы C_{36} проведен ряд численных экспериментов. Фуллерену C_{36} сообщался заряд $+1e$, а графеновому листу для сохранения электронейтральности системы — заряд $-1e$. При наложении электрического поля напряженностью $1 \cdot 10^6$ В/м вдоль выбранного направления наблюдалось направленное движение молекулы C_{36} с минимальными отклонениями от изначально заданной траектории. При этом фуллерен не катился, а

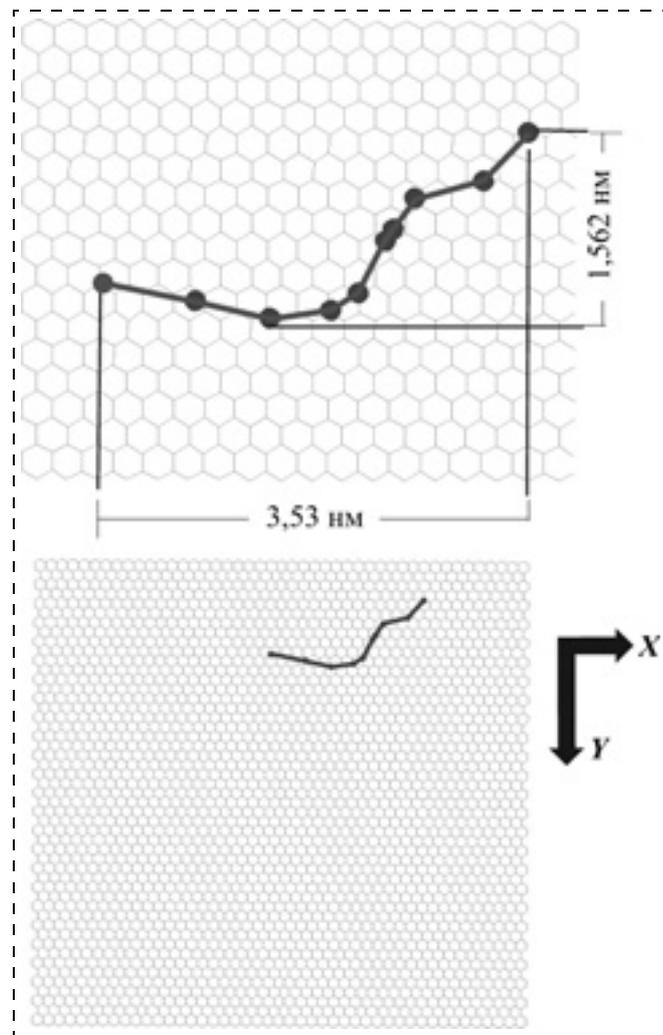


Рис. 5. Движение фосфолипида под действием поля $E_Y = 10^7$ В/м в плоскости XU

скользил по поверхности графенового листа. Такой тип движения возможен при условии, что фуллерен C_{36} обращен одиночным шестиугольником к графеновой поверхности.

Взаимодействие молекулы C_{36} с фосфолипидом исследовалось молекулярной динамикой с исполь-

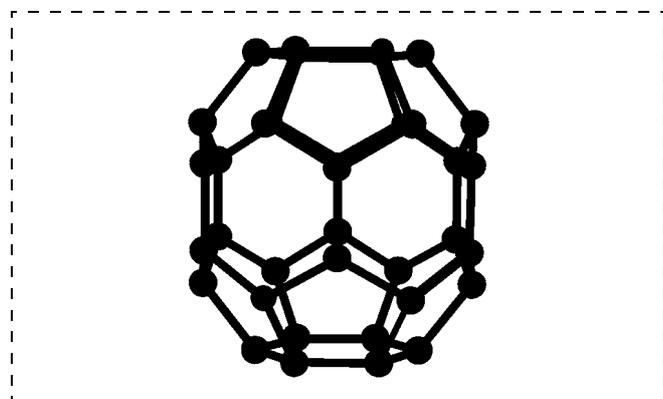


Рис. 6. Атомная структура фуллерена C_{36}

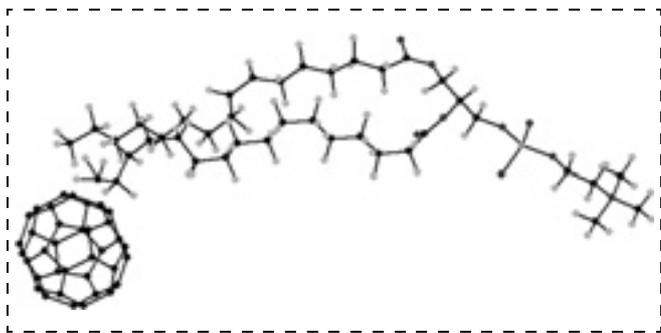


Рис. 7. Взаимное расположение фосфолипидной молекулы и фуллера C_{36} в результате оптимизации

зованием силового поля Amber. В результате оптимизации установлено, что фуллерен C_{36} взаимодействует с фосфолипидными "хвостами" посредством сил Ван-дер-Ваальса. Установленный факт подтверждается рядом экспериментальных исследований, в которых показано, что с молекулами фуллеренов взаимодействуют именно фосфолипидные "хвосты" [8, 9]. Взаимное расположение фосфолипидной молекулы и фуллера C_{36} после оптимизации изображено на рис. 7.

Таким образом, можно сделать вывод, что оптимальным способом транспортировки молекулы фосфолипида является использование заряженного фуллера C_{36} , взаимодействующего с фосфолипидными "хвостами" под действием внешнего электрического поля.

В связи с тем, что фуллерену C_{36} можно задавать положительный заряд $+1e$ [10, 11] и управлять его движением во внешнем электрическом поле, было рассмотрено движение фуллера, взаимодействующего с фосфолипидом во внешнем электрическом поле.

Исследования проводили при напряженности внешнего электрического поля $1 \cdot 10^6$ В/м по оси Y . Заряд фуллера составлял $+1e$. Заряд распределялся по всей поверхности фуллера. Установлено, что в связи с тем, что фуллерен сдвинулся относительно оси X на 0,32 нм в течение 400 пс, изменяя положение фосфолипида. Фосфолипид опоясывает фуллерен, и движение фосфолипида и фуллера прекращается. При взаимодействии фосфолипида с двумя фуллеренами C_{36} , расположенными в области "хвостов" фосфолипида, наблюдается, что фосфолипид обхватывает каждый фуллерен "хвостами", располагаясь между фуллеренами C_{36} . При этом движение фосфолипида также прекращается приблизительно через 500 пс. При расположении фуллеренов не рядом с "хвостами", а под ними, наблюдается, что "хвосты" соскальзывают с фуллеренов. При взаимодействии фосфолипида с тремя фуллеренами C_{36} движение фосфолипида также прекращается приблизительно через 147 пс. Это объясняется тем, что фосфо-

липид обладает большей массой, и под действием этой массы фуллерен прекращает свое движение.

В связи с этим в качестве двигательного фуллера был выбран фуллерен C_{60} . При взаимодействии фосфолипида с двумя фуллеренами C_{60} , расположенными в области "хвостов" фосфолипида, наблюдается, что фосфолипид также обхватывает каждый фуллерен "хвостами", располагаясь между фуллеренами C_{60} . Однако при взаимодействии фосфолипида с тремя фуллеренами C_{60} наблюдается движение данной структуры по графеновой поверхности.

Можно предположить, что подобная технология может быть применима в медицине для транспортировки биомолекул и лекарств внутри организма.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 14-01-31429, 14-01-31508, 12-01-31036) и Президентской стипендии 2013-2016 (проект № СП-2302.2013.1) и при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 3.1155.2014/К.

Список литературы

1. Zupanc J., Drobne D., Drasler B. et al. Experimental evidence for the interaction of C_{60} fullerene with lipid vesicle membranes // Carbon. 2012. V. 50. P. 1170—1178.
2. Bouropoulos N., Katsamenis O. L., Cox P. A. et al. Probing the perturbation of lecithin bilayers by unmodified C_{60} fullerenes using experimental methods and computational simulations // J. Phys. Chem. C. 2012. V. 116. P. 3867—3874.
3. Bedrov D., Smith G. D., Davande H. et al. Passive Transport of C_{60} fullerenes through a lipid membrane: a molecular dynamics simulation study // J. Phys. Chem. B. 2008. V. 112. P. 2078—2084.
4. Marrink S. J., de Vries A. H., Mark A. E. Coarse grained model for semiquantitative lipid simulations // J. Phys. Chem. B. 2004. V. 108. P. 750—760.
5. Naderil F., Rostamian S., Naderi B. A study on the electronic and structural properties of fullerene C_{36} and its interaction with amino acid // International Journal of Physical Sciences. 2012. V. 7 (13). P. 2006—2009.
6. Kraszewski S., Tarek M., Ramseyer C. Uptake and translocation mechanisms of cationic amino derivatives functionalized on pristine C_{60} by lipid membranes: a molecular dynamics simulation study // ACS Nano. 2011. V. 5 (11). P. 8571—8578.
7. Muhammad S., Fukuda K., Minami T. et al. Interplay between the diradical character and third-order nonlinear optical properties in fullerene systems // Chemistry. 2013. Jan 28. V. 19 (5). P. 1677—1685.
8. Zhan W., Jiang K. A modular photocurrent generation system based on phospholipid-assembled fullerenes // Langmuir. 2008. V. 24 (23). P. 13258—13261.
9. Li L., Davande H., Bedrov D. et al. A molecular dynamics simulation study of C_{60} fullerenes inside a dimyristoylphosphatidylcholine lipid bilayer // J. Phys. Chem. B. 2007. V. 111. P. 4067—4072.
10. Krawez N., Gromov A., Tellmann R. et al. Electronic properties of novel materials. Progress in molecular nanostructures. 1998. 368 p.
11. Pai W. W., Jeng H. T., Cheng C. M. et al. Optimal electron doping of a C_{60} monolayer on Cu(111) via interface reconstruction // Phys Rev Lett. 2010. Jan 22. V. 104 (3). P. 036103.

O. E. Glukhova, Professor, e-mail: oeglukhova@yandex.ru, A. S. Kolesnikova, Assistant, M. M. Slepchenkov, Assistant, D. S. Shmygin, Student

Motion Control Phospholipids in the Electric Field

Regularities in control of phospholipid molecule motion located above graphene surface were investigated by molecular mechanical method. It was first shown that interaction between graphene and phospholipids is most strong just when phospholipid molecule is parallel to plane of graphene sheet. Phospholipid molecule on graphene located in an external electric field does not behave predictable way in the absence of fullerenes C_{60} . It was found, that motion of phospholipid can be controlled by external electric field with strength V/m and by three charged $+1e$ fullerenes C_{60} . The reason that does not allow to reduce the size of fullerenes, keeping their number and the amount of charge has been installed. Developed method of organic and non-organic molecules manipulating can be the basis of molecular motors (nanomachines) and a may be a possible way to transport drugs. It can be assumed that this technology can be applied in medicine for the transport of drugs and biomolecules within an organism.

Keywords: phospholipid, graphene, fullerene, electric field, motion trajectory, interaction energy

References

1. Zupanc J., Drobne D., Drasler B. et al. Experimental evidence for the interaction of C_{60} fullerene with lipid vesicle membranes. *Carbon*. 2012. V. 50. P. 1170—1178.
2. Bouropoulos N., Katsamenis O. L., Cox P. A. et al. Probing the perturbation of lecithin bilayers by unmodified C_{60} fullerenes using experimental methods and computational simulations. *J. Phys. Chem. C*. 2012. V. 116. P. 3867—3874.
3. Bedrov D., Smith G. D., Davande H. et al. Passive Transport of C_{60} fullerenes through a lipid membrane: a molecular dynamics simulation study. *J. Phys. Chem. B*. 2008. V. 112. P. 2078—2084.
4. Marrink S. J., de Vries A. H., Mark A. E. Coarse grained model for semiquantitative lipid simulations. *J. Phys. Chem. B*. 2004. V. 108. P. 750—760.
5. Naderil F., Rostamian S., Naderi B. A study on the electronic and structural properties of fullerene C_{36} and its interaction with amino acid. *International Journal of Physical Sciences*. 2012. V. 7 (13). P. 2006—2009.
6. Kraszewski S., Tarek M., Ramseyer C. Uptake and translocation mechanisms of cationic amino derivatives func-

tionized on pristine C_{60} by lipid membranes: a molecular dynamics simulation study. *ACS Nano*. 2011. V. 5 (11). P. 8571—8578.

7. Muhammad S., Fukuda K., Minami T. et al. Interplay between the diradical character and third-order nonlinear optical properties in fullerene systems. *Chemistry*. 2013. Jan 28. V. 19 (5). P. 1677—1685.

8. Zhan W., Jiang K. A modular photocurrent generation system based on phospholipid-assembled fullerenes. *Langmuir*. 2008. V. 24 (23). P. 13258—13261.

9. Li L., Davande H., Bedrov D. et al. A molecular dynamics simulation study of C_{60} fullerenes inside a dimyristoylphosphatidylcholine lipid bilayer. *J. Phys. Chem. B*. 2007. V. 111. P. 4067—4072.

10. Krawez N., Gromov A., Tellmann R. et al. Electronic properties of novel materials. *Progress in molecular nanostructures*. 1998. 368 p.

11. Pai W. W., Jeng H. T., Cheng C. M. et al. Optimal electron doping of a C_{60} monolayer on Cu(111) via interface reconstruction. *Phys Rev Lett*. 2010. Jan 22. V. 104 (3). P. 036103.

УДК 004.942:681.586.35

А. И. Артемова, студент, Ю. А. Михайлов, канд. техн. наук, руководитель группы опытного производства, В. В. Панков, ст. науч. сотр., e-mail: Pvv@tcen.ru, В. С. Суханов, нач. лаборатории, e-mail: Vs@tcen.ru, НПК "Технологический центр"

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАВЛЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ЖЕСТКИМ ЦЕНТРОМ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Поступила в редакцию 10.04.2014

Представлен метод оптимизации конструкции кремниевого чувствительного элемента (ЧЭ) давления с распределенным жестким центром. С помощью компьютерного трехмерного моделирования были созданы несколько конструкций ЧЭ с различными вариантами исполнения жесткого центра.

С помощью программного комплекса ANSYS было проведено моделирование конструкций ЧЭ при разных приложенных давлениях методом конечных элементов. Полученные выходные значения чувствительности и нелинейности характеристики позволяют сравнить конструкции ЧЭ и выбрать наиболее оптимальный вариант исполнения изделия.

Ключевые слова: МЭМС преобразователь, чувствительный элемент (ЧЭ), тензорезисторы, жесткий центр, конечно-элементный анализ

Согласно маркетинговым исследованиям за 2013 г. рынок МЭМС-устройств, в число которых также входят МЭМС-преобразователи давления,

вырос на 10 % [1]. Область применения устройств измерения давления также растет. Наравне растет и конкуренция среди производителей, поэто-

му требования к метрологическим характеристикам постоянно увеличиваются, и появляется необходимость совершенствования конструкции МЭМС-устройств.

Создание новой конструкции МЭМС-преобразователя только на основе опытно-лабораторного метода является трудоемким, времязатратным и дорогим методом. Но в условиях развития компьютерных технологий существует возможность ускорить процесс создания нового устройства и выведения его на рынок с помощью использования математического трехмерного моделирования.

При умелом расчете результаты моделирования хорошо согласуются с результатами тестирования реального устройства. Единственное ограничение компьютерных моделей строится на их ресурсозатратности компьютерных мощностей и времени расчета в зависимости от необходимой точности решения.

Исходные данные исследуемой конструкции

В работе рассматривается конструкция кремниевого чувствительного элемента (ЧЭ) давления мембранного типа с тремя жесткими центрами размером $6,2 \times 6,2$ мм с толщиной мембраны 30 мкм (рис. 1).

На лицевой стороне 1 монокристаллической кремниевой пластины *n*-типа проводимости, ориентированной в плоскости (100), сформированы тензорезисторы 4 *p*-типа проводимости, вытянутые в направлении [011] и объединенные в мост Уитстона. С обратной стороны 2 кристалла сформирована тонкая мембрана 3 и три жестких центра 5 [2].

Для расчета выходных характеристик чувствительного элемента используется следующее соотношение:

$$U_{\text{вых}} = \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) U_{\text{пит}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{пит}}$ — напряжение питания моста.

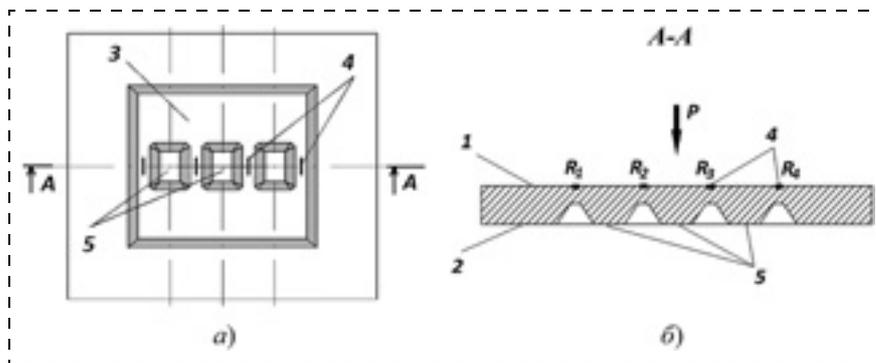


Рис. 1. Вид ЧЭ давления с тремя жесткими центрами:

a — вид со стороны углубления; *b* — поперечный разрез по А—А пластины

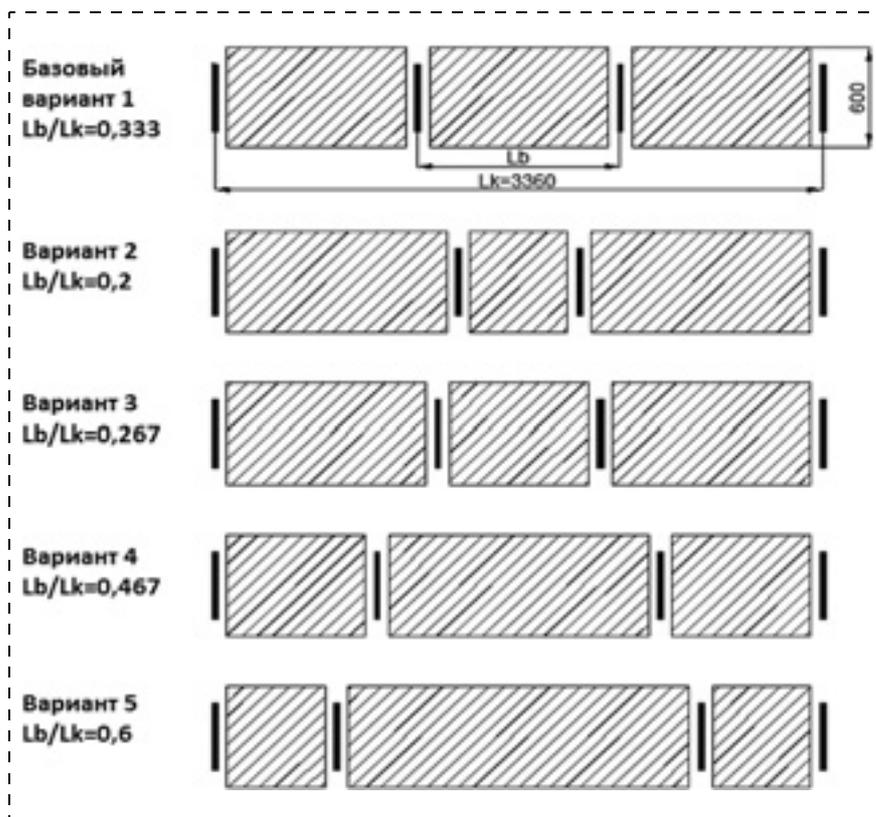


Рис. 2. Варианты конструкций распределенного жесткого центра ЧЭ

Чувствительность кристалла оценивается по формуле

$$S = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{пит}}}. \quad (2)$$

Нелинейность $2K_{\text{нл}}$, %, была вычислена по формуле

$$2K_{\text{нл}} = \frac{U_{\text{вых}_i} - \left(U_0 + \frac{U_{\text{вых}} - U_0}{P_{\text{ном}}} P_i \right)}{U_{\text{вых}} - U_0} 100, \% \quad (3)$$

где $U_{\text{вых}_i}$ — выходное напряжение при $P = P_i$, $P_i = 0,5P_{\text{ном}}$; U_0 — напряжение при $P = 0$, в данном случае $U_0 = 0$.

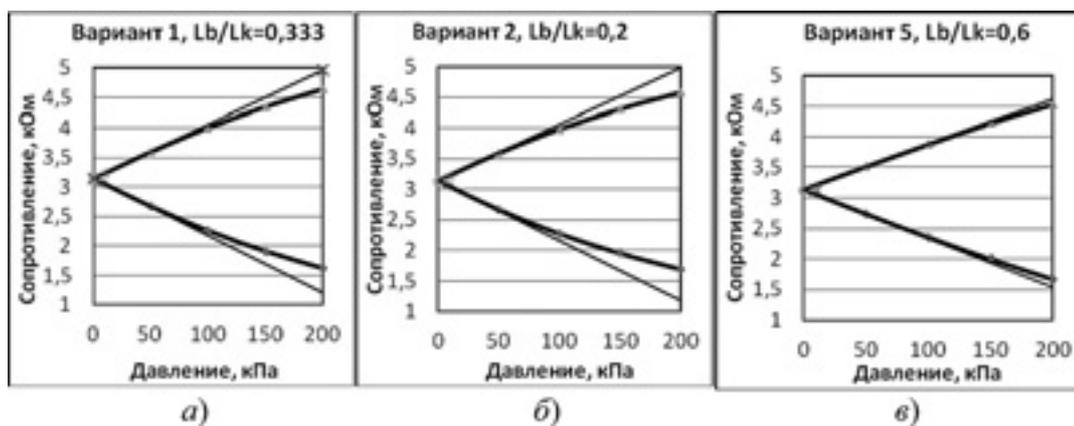


Рис. 3. Зависимость сопротивления тензорезисторов от приложенного на мембрану давления

Цель расчета — оптимизировать размеры и расположение жестких центров со сравнением критических выходных характеристик по чувствительности и нелинейности конструкции.

На рис. 2 представлено схематическое изображение вариантов конструкций с опорными размерами.

L_b/L_k — это параметр, характеризующий относительные размеры распределенного жесткого центра. При этом общая площадь, занимаемая распределенным жестким центром, остается постоянной, что исключает ее влияние на чувствительность [3].

Моделирование и результаты

Создание и моделирование конструкции ЧЭ проводили в специализированном программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS [4].

В компьютерной модели для уменьшения расчетов принят ряд упрощений:

- в силу симметрии кристалла моделировалась его четверть;
- в модели не учитывалось влияние металлической разводки, которая проходит по жесткой части кристалла;
- не учтен тонкий оксидный слой.

Общее число конечных элементов составляет около 200 000, причем в критичных областях модели проводилось более детальное разбиение.

На основе разработанной модели и параметров материалов был проведен расчет деформации ЧЭ под приложенными нагрузками — давление от 10 до 200 кПа. А выходными параметрами моделирования было сопротивление тензорезисторов, из которых можно просчитать выходные параметры ЧЭ.

На рис. 3, а—в для сравнения представлены зависимости сопротивления тензорезисторов от приложенного давления, полученные в результате моде-

лирования. Для наглядности на графиках добавлена линия, показывающая, насколько сильно сопротивление отклоняется от линейной характеристики.

Согласно расчетным данным по выходному сопротивлению тензоэффект $\Delta R/R$ в предложенных конструкциях составил 3 % при рабочем давлении 10 кПа, 27 % — при 100 кПа, 46...49 % — при 200 кПа.

На рис. 4 и 5 представлены графики зависимости выходного сигнала при $U_{пит} = 2,55$ В (для ва-

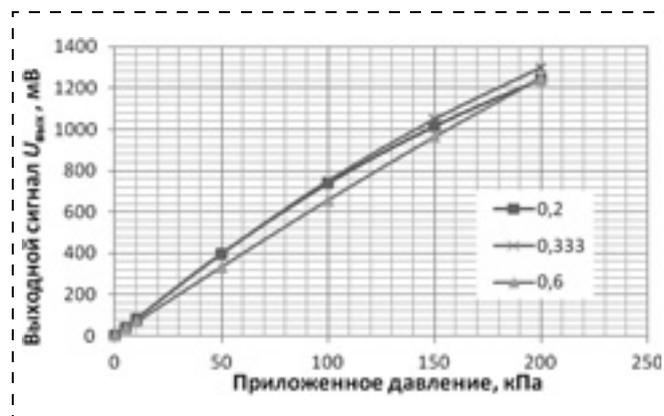


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения от давления

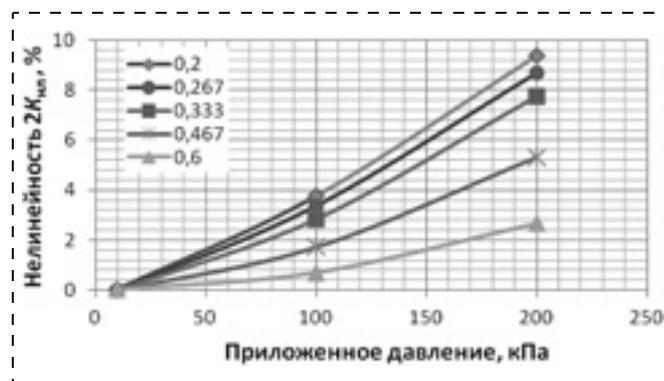


Рис. 5. Зависимость нелинейности конструкций от давления



Рис. 6. Зависимость чувствительности конструкции от размеров концентраторов при $P_{\text{ном}} = 10$ кПа

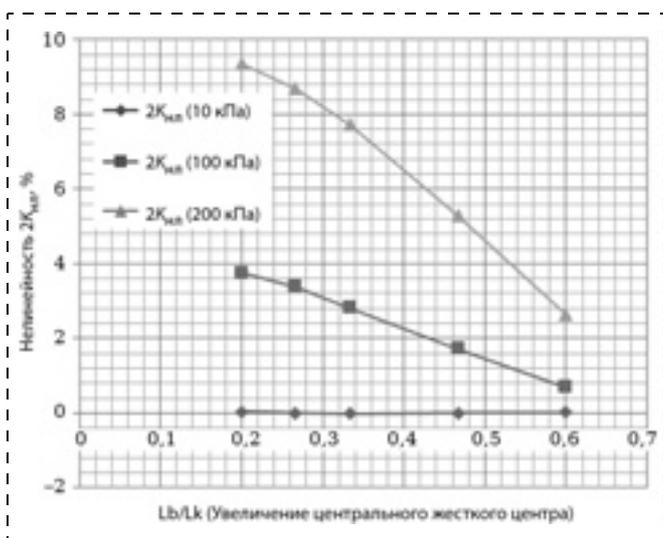


Рис. 7. Зависимость нелинейности конструкции от размеров концентраторов при разных давлениях

риантов 1, 2, 5, см. рис. 2) и нелинейности характеристики ЧЭ от приложенного давления (для всех вариантов).

Для наглядного представления полученных результатов и последующего сравнения вариантов конструкций были построены зависимости чувствительности от формы распределенного жесткого центра при номинальном давлении $P = 10$ кПа (рис. 6) и нелинейности для разных конструкций при давлениях 10, 100, 200 кПа (рис. 7).

Используя полученные в результате моделирования данные, можно сделать вывод касательно применения того или иного варианта конструкции чувствительного элемента. При уменьшении центрального концентратора распределенного жесткого центра можно получить большее значение чувствительности ЧЭ. При этом обнаружено увеличение нелинейности характеристики. Наименьшими значениями нелинейности обладает конструкция варианта 5 (см. рис. 2), что предполагает ее использование для более высоких давлений. Но при рабочих диапазонах давления до 10 кПа нелинейность выходных характеристик всех конструкций примерно равны и не превышают необходимых требований, что оставляет делать выбор в пользу варианта конструкции 2 с узким жестким центром, который дает наибольшее значение чувствительности.

Список литературы

1. Status of MEMS industry [Электронный ресурс]. URL: http://www.researchandmarkets.com/reports/2610209/status_of_the_mems_industry_2013#rela0.
2. Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С., Михайлов Ю. А. Интегральный преобразователь давления. Патент РФ № 2362132. 2009.
3. Игнатъева Е. В., Михайлов Ю. А. О показателе чувствительности конструкции кремниевых тензопреобразователей давления // Датчики и системы. 2008. № 10. С. 35–38.
4. www.ansys.com.

A. I. Artemova, Student, Yu. A. Mikhailov, Senior Researcher, V. V. Pankov, Senior Researcher, V. S. Sukhanov, Head of Laboratory, Scientific-Manufacturing Complex "Technological center" MIET

Optimization of Pressure Sensing Element Construction with Distributed Rigid Center Using 3D Computer Modeling

The article shows the method to optimize a construction of pressure sensing element (SE) with distributed rigid center. A number of SE constructions with different rigid center variants were designed using computer 3d modeling.

SE constructions were simulated under different applied pressure by ANSYS program which uses finite-element analysis. Obtained output parameters of sensitivity and nonlinearity make it possible to compare SE constructions and to choose the optimal variant for producing.

Keywords: MEMS transducer, sensing element (SE), tensoresistors, rigid center, finite-element analysis

References

1. Status of MEMS industry [Электронный ресурс]. URL: http://www.researchandmarkets.com/reports/2610209/status_of_the_mems_industry_2013#rela0.
2. Danilova N. L., Pankov V. V., Suhanov V. S., Mikhailov Yu. A. Integral'nyi preobrazovatel' davleniya. Patent RF N 2362132. 2009.

3. Ignat'eva E. V., Mikhailov Yu. A. O pokazatele chuvstvitel'nosti konstruktzii kremnievykh tenzopreobrazovateley davleniya. *Datchiki i sistemy*. 2008. N 10. P. 35–38.
4. www.ansys.com.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 546.284-31 + 531.768 + 531.77

Е. А. Гринькин, канд. техн. наук, нач. лаб., e-mail: evg_grinkin@mail.ru, **С. А. Жукова**, канд. техн. наук, нач. комплекса, e-mail: szh17@yandex.ru, **Д. Ю. Обижаев**, канд. техн. наук, зам. нач. отдела, e-mail: obizhaevd@mail.ru, **А. В. Тютюгин**, нач. лаб., e-mail: anton_tyutyugin@mail.ru, **В. Е. Турков**, канд. физ.-мат. наук, нач. центра, e-mail: vltur@rambler.ru, Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт химии и механики" имени Д. И. Менделеева, г. Москва

КИНЕТИКА ТРАВЛЕНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКОГО "ЖЕРТВЕННОГО" СЛОЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ

Поступила в редакцию 19.12.2013

Исследован процесс травления неорганического "жертвенного" слоя в трехслойных подложках кремний-на-изоляторе. Представлены результаты исследования кинетики травления диоксида кремния в парах водного раствора плавиковой кислоты в зависимости от продолжительности процесса и температуры поверхности образцов. Показано увеличение скорости процесса по мере травления и при уменьшении температуры.

Ключевые слова: "жертвенный" слой, диоксид кремния, травление, плавиковая кислота

Введение

Одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся направлений в области микроэлектромеханических систем (МЭМС), и в особенности чувствительных элементов (ЧЭ) инерциальных датчиков, является использование технологии кремний-на-изоляторе (КНИ) при их изготовлении. Десятки крупнейших мировых лидеров электронной индустрии объединились в "SOI INDUSTRY CONSORTIUM" [1] для продвижения этой технологии на производстве. Технология основана на использовании трехслойной подложки со структурой кремний — неорганический

диэлектрик — кремний вместо обычно применяемых монокристаллических кремниевых пластин. Подложка, выполненная по технологии КНИ, схематическое изображение которой приведено на рис. 1, представляет собой трехслойный пакет, который состоит из монокристаллической кремниевой пластины, диэлектрика и размещенного на нем поверхностного слоя кремния. В качестве диэлектрика обычно выступает диоксид кремния SiO_2 .

Процесс изготовления ЧЭ инерциальных датчиков [2, 3], схема которого представлена на рис. 2, заключается в формировании различных элементов в поверхностном кремниевом слое с последующим удалением (вытравливанием) слоя SiO_2 из-под тех элементов, которые должны быть подвижными в процессе эксплуатации устройства. Таким образом, слой диоксида кремния является "жертвенным", а поверхностный кремниевый слой — функциональным (структурным) и, вместе с тем, выполняющим роль маски при вытравливании "жертвенного" слоя.

Для сокращения времени, затрачиваемого на удаление "жертвенного" слоя, и обеспечения равномерности его травления в поверхностном крем-

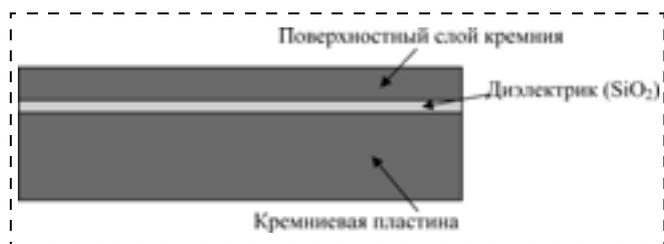


Рис. 1. Структура подложки КНИ

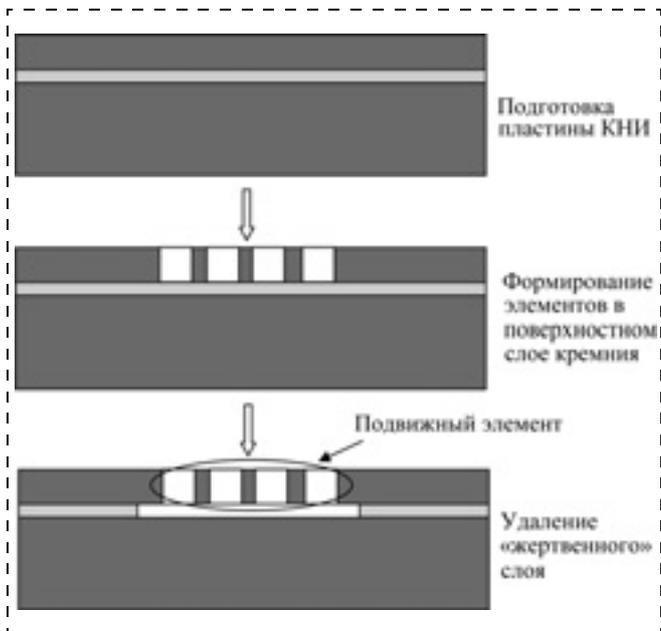


Рис. 2. Схема изготовления компонентов МЭМС по технологии КНИ

ниевом слое одновременно с формированием структурных элементов необходимо выполнить перфорационную систему "окон". Оптимизация геометрических параметров системы перфорации состоит в нахождении наиболее подходящего для каждого разрабатываемого устройства сочетания деформационно-прочностных характеристик его перфорированных элементов и степени технологичности их изготовления. При этом технологичность конструкции определяется главным образом продолжительностью травления "жертвенного" слоя. В связи с этим изучение кинетики травления слоя SiO_2 под маску от различных параметров для определения оптимальных режимов при изготовлении различных ЧЭ инерциальных датчиков представляется весьма актуальным, что определило цель настоящих исследований.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлся "жертвенный" слой диоксида кремния толщиной 2 мкм, являющийся составной частью пластины КНИ. Схема подготовки образцов для проведения исследований травления неорганического "жертвенного" слоя, представленная на рис. 3, включала в себя отмывку пластины КНИ, пиролитическое осаждение нитрида кремния с последующей фотолитографией по его верхнему слою и жидкостное анизотропное травление кремния через защитную маску Si_3N_4 .

Травление "жертвенного" слоя SiO_2 осуществляли с помощью установки HF VPE-150 (фирма *Idonus*, Швейцария), принципиальная схема и фото-

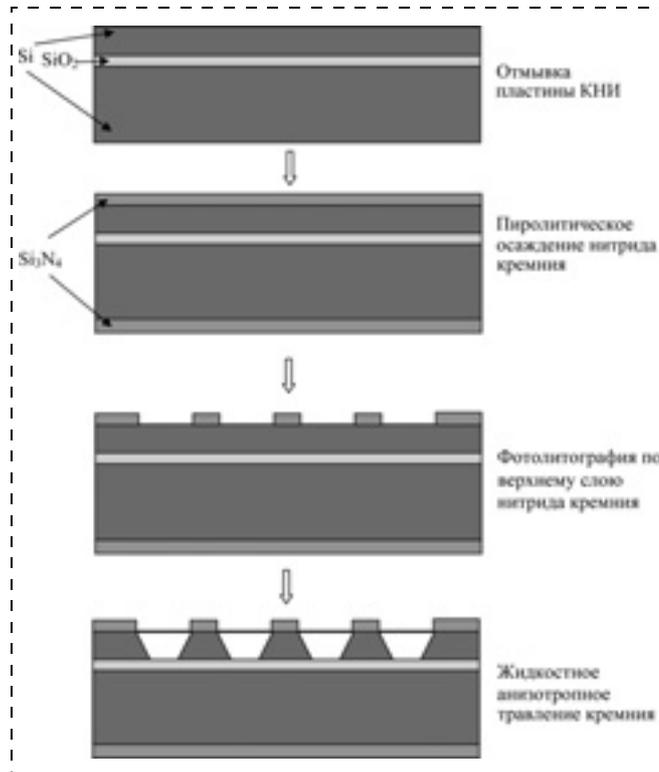


Рис. 3. Схема подготовки образцов для исследования травления неорганического "жертвенного" слоя

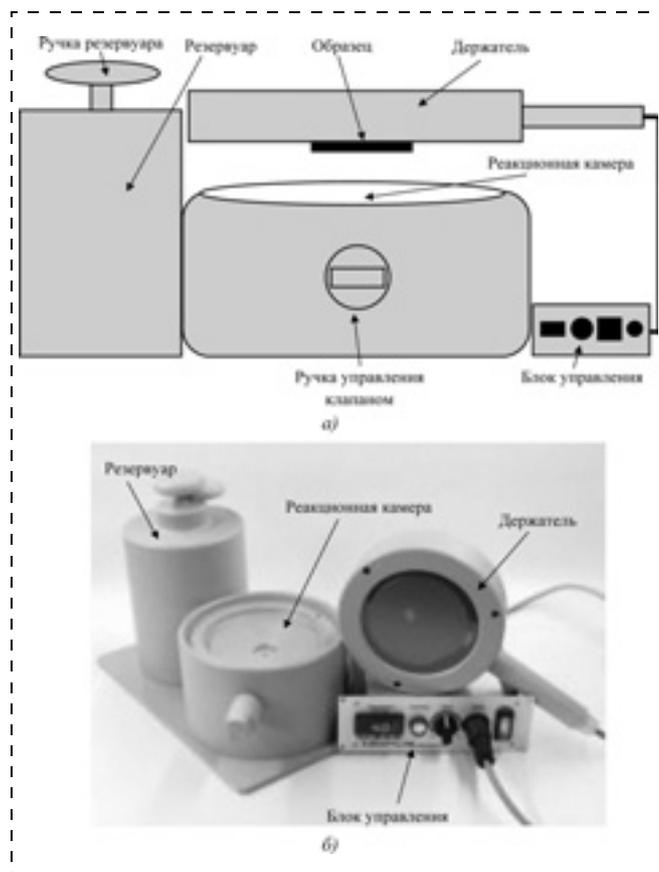


Рис. 4. Принципиальная схема (а) и фотография (б) установки травления неорганического "жертвенного" слоя в парах водного раствора плавиковой кислоты

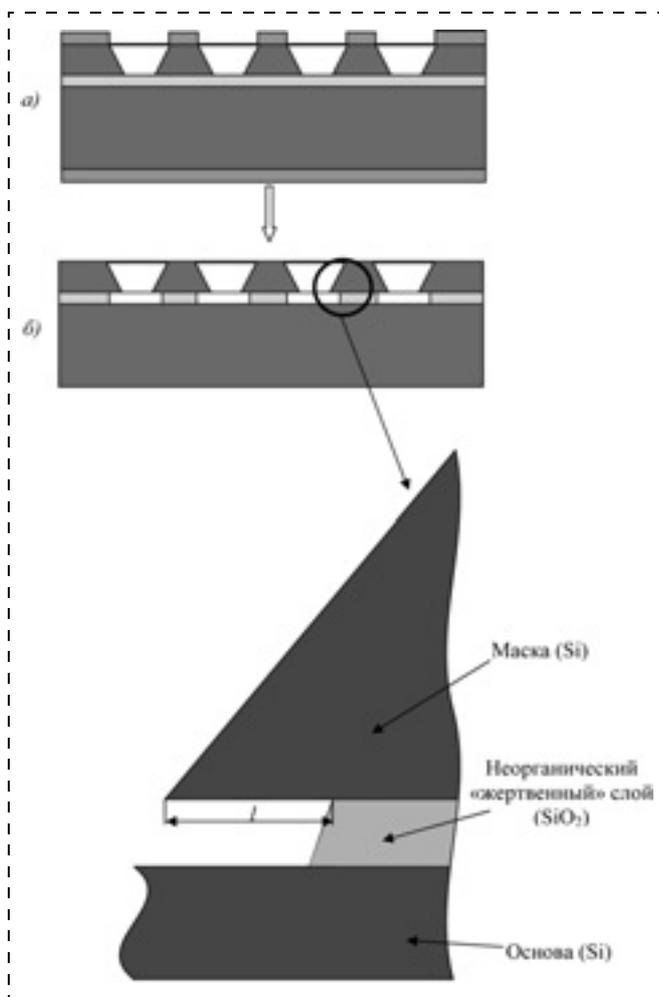


Рис 5. Схематическое изображение образца до (а) и после (б) травления неорганического "жертвенного" слоя (l — подтрав "жертвенного" слоя под маску, мкм)

тография которой приведены на рис. 4. Установка состоит из резервуара для хранения травящего раствора, реакционной камеры и держателя пластин со встроенным нагревательным элементом и возможностью электростатического прижима к нему подвергаемых травлению образцов. Регулирование температуры поверхности образцов и силы их прижима к держателю обеспечивается с помощью блока управления.

Травление неорганического "жертвенного" слоя осуществляли в парах испаряющегося 45 %-ного водного раствора плавиковой кислоты, залитого в реакционную камеру, которую закрывали держателем с образцом. При этом варьировали температуру поверхности образцов (от 35 до 60 °С) и продолжительность травления (до 7,5 ч). На рис. 5 представлено схематическое изображение образца до и после травления неорганического "жертвенного" слоя.

Подтрав "жертвенного" слоя под маску определяли по микрофотографиям, полученным с помощью аналитического автоэмиссионного растрового электронного микроскопа Zeiss Cross Beam Neon 60 (фирма Carl Zeiss, Германия). Скорость травления "жертвенного" слоя рассчитывали как отношение подтрав l к продолжительности травления τ .

Результаты и их обсуждение

На рис. 6 приведены микрофотографии профилей "жертвенного" слоя после травления в парах водного раствора плавиковой кислоты в течение

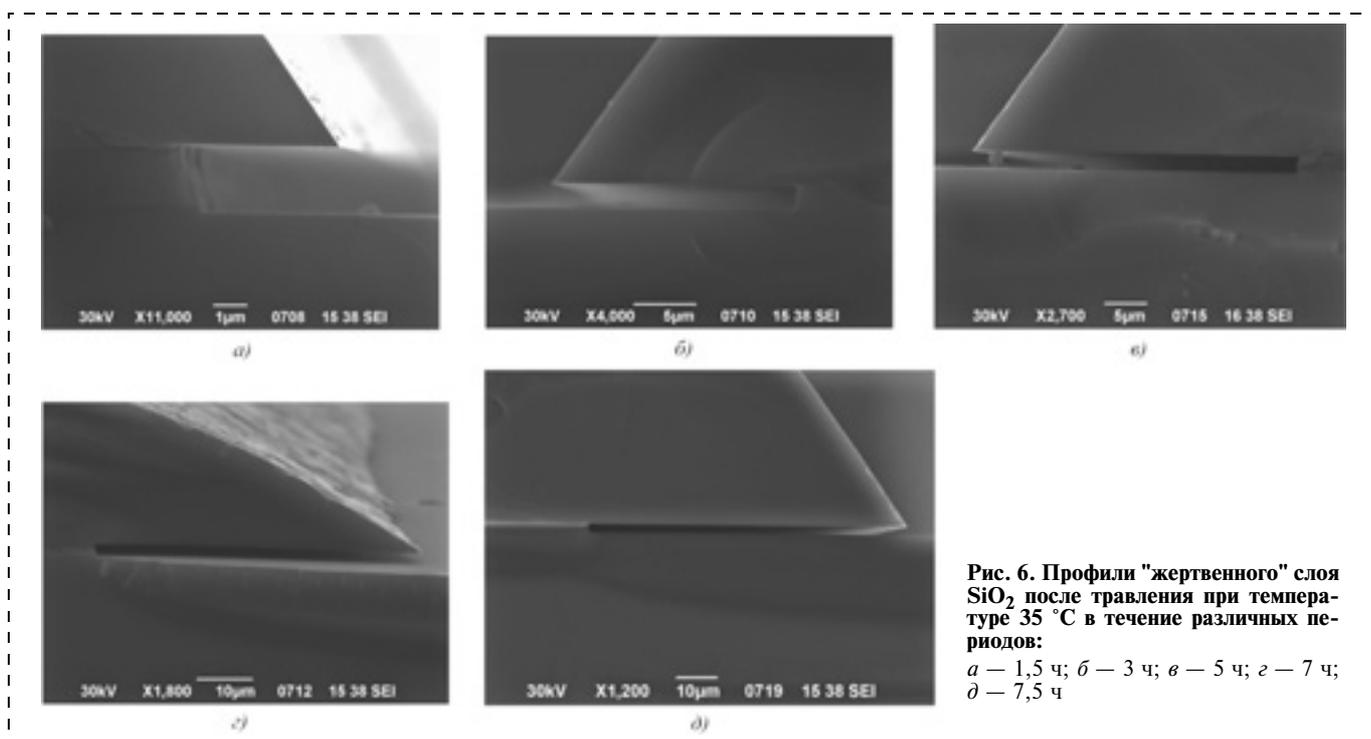


Рис. 6. Профили "жертвенного" слоя SiO_2 после травления при температуре 35 °С в течение различных периодов:
 а — 1,5 ч; б — 3 ч; в — 5 ч; г — 7 ч;
 д — 7,5 ч

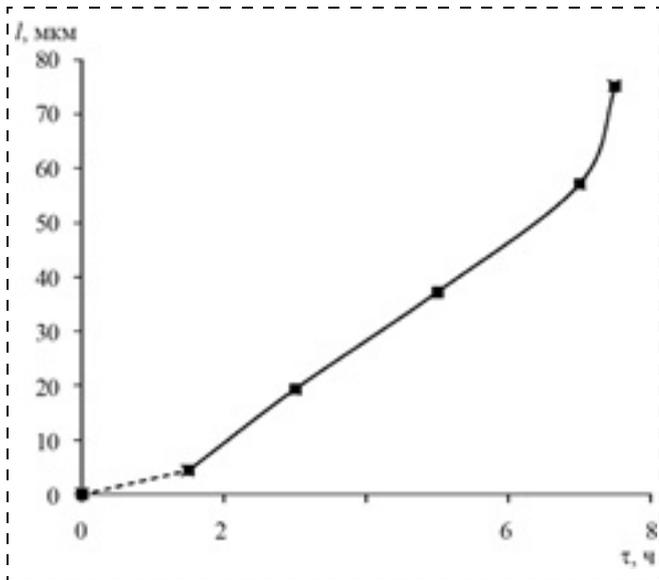


Рис. 7. Зависимость подтравы l "жертвенного" слоя под маску от продолжительности травления τ при температуре поверхности образцов 35 °С

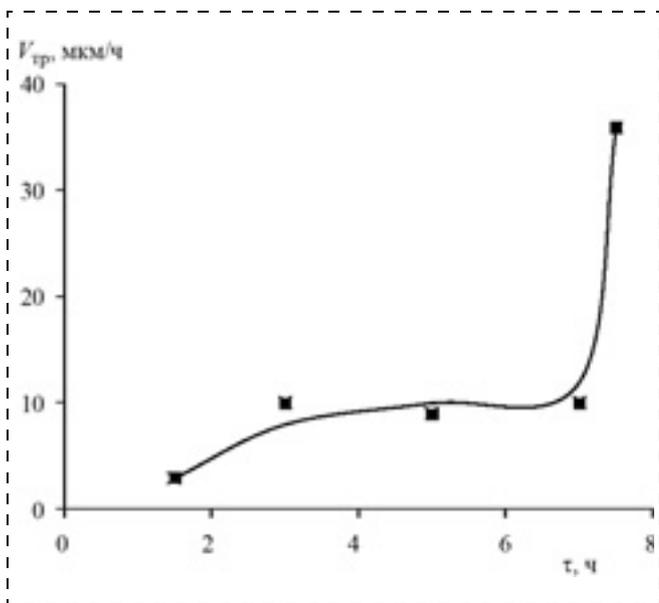
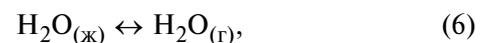
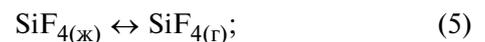
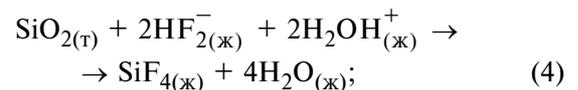
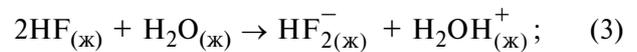
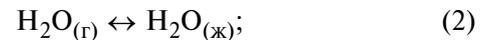
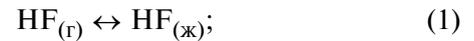


Рис. 8. Зависимость скорости травления V_{tr} "жертвенного" слоя от продолжительности процесса τ при температуре поверхности образцов 35 °С

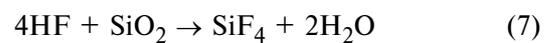
ние различных периодов при температуре поверхности образцов, составляющей 35 °С. На рис. 7 представлена зависимость подтравы "жертвенного" слоя под маску от продолжительности процесса. Как видно из рис. 6 и 7, с течением времени подтрав возрастает. При этом скорость травления "жертвенного" слоя, зависимость которой от продолжительности процесса представлена на рис. 8, сначала увеличивается, затем, после травления в течение 3 ч, становится постоянной, и после 7 ч процесса резко возрастает. Наблюдаемая зависи-

мость, по-видимому, связана с протекающими при травлении "жертвенного" слоя SiO_2 в парах водного раствора плавиковой кислоты HF химическими реакциями, описываемыми известными уравнениями [4]:



где "г" — газ; "ж" — жидкость; "т" — твердое.

Из приведенных уравнений видно, что в роли катализатора реакции взаимодействия диоксида кремния с плавиковой кислотой выступает вода, адсорбирующаяся на поверхности "жертвенного" слоя из травящего раствора. Кроме того, имеет место автокатализ: роль катализатора при взаимодействии SiO_2 и HF может играть вода, являющаяся продуктом реакции



— комбинации уравнений (3) и (4).

Таким образом, по мере травления "жертвенного" слоя скорость процесса должна возрастать, что подтверждается начальным участком зависимости скорости травления SiO_2 от продолжительности процесса, представленной на рис. 8.

Затем количество воды на поверхности "жертвенного" слоя, вероятно, становится постоянным благодаря балансу, наступающему между процессами адсорбции и образования воды, с одной стороны, и ее испарения с поверхности "жертвенного" слоя — с другой. Таким образом, наблюдается постоянство скорости травления "жертвенного" слоя при продолжительности процесса в диапазоне от 3 до 7 ч.

Резкое увеличение скорости травления "жертвенного" слоя после продолжительного травления (более 7 ч) вызвано, возможно, замедлением скорости испарения воды с поверхности SiO_2 в результате возрастания подтравы.

На рис. 9 представлены микрофотографии профилей "жертвенных" слоев после травления в течение 3 ч при различной температуре поверхности образцов, а на рис. 10 и 11 — зависимости подтравы и скорости травления SiO_2 от температуры соответственно. Из рис. 11 видно, что скорость травле-

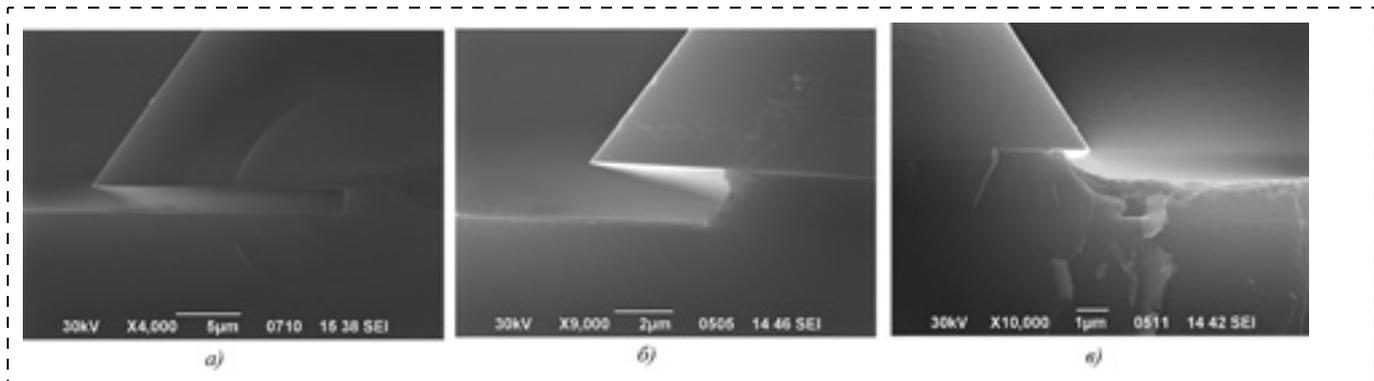


Рис. 9. Профили "жертвенных" слоев SiO_2 после травления в течение 3 ч при различной температуре: $a - 35^\circ\text{C}$; $b - 50^\circ\text{C}$; $c - 60^\circ\text{C}$

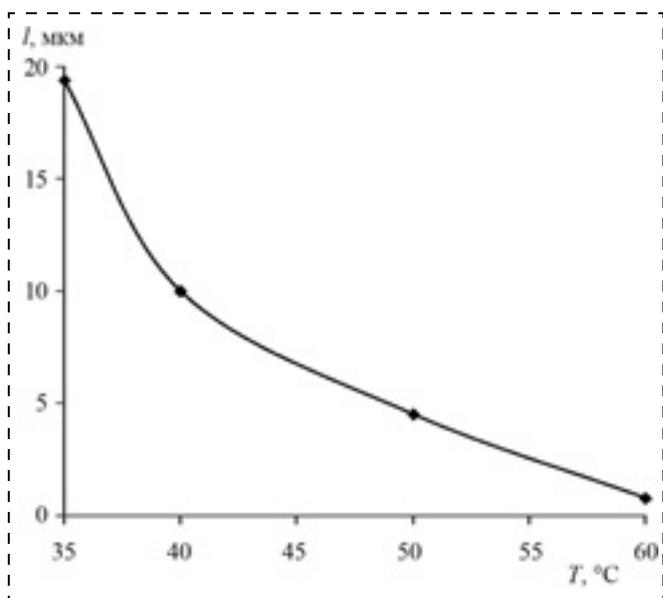


Рис. 10. Зависимость подтравы I "жертвенного" слоя под маску от температуры поверхности образцов T . Продолжительность травления 3 ч

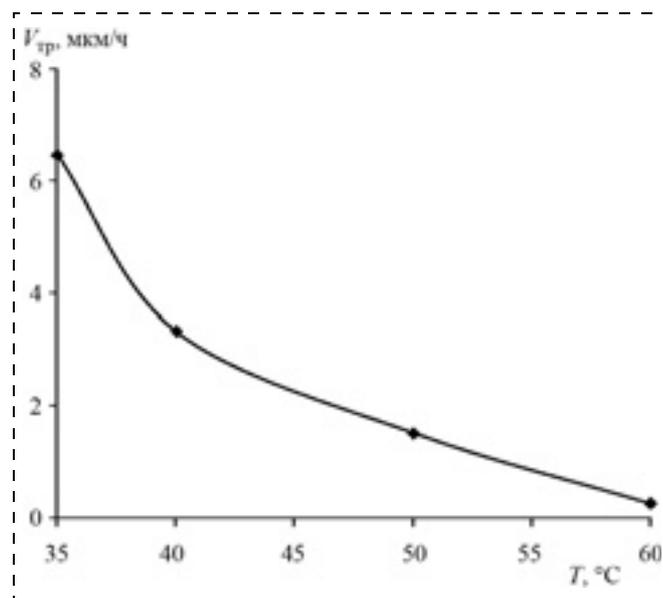


Рис. 11. Скорость травления $V_{\text{тр}}$ "жертвенного" слоя в зависимости от температуры поверхности образцов T . Продолжительность травления 3 ч

ния "жертвенного" слоя уменьшается при нагреве образцов, что, по-видимому, является следствием повышения интенсивности испарения с поверхности диоксида кремния взаимодействующих с ним реагентов при повышении температуры.

Заключение

Исследована кинетика травления "жертвенного" слоя диоксида кремния в парах водного раствора плавиковой кислоты в зависимости от продолжительности процесса и температуры поверхности образцов. Показано, что по мере травления скорость процесса возрастает, а при увеличении температуры — уменьшается. Наблюдаемые зависимости связаны, по-видимому, с процессами адсорбции, образования и испарения с поверхности "жертвенного" слоя воды, являющейся катализатором реакции взаимодействия диоксида кремния и

плавиковой кислоты. При этом максимальная зафиксированная скорость травления "жертвенного" слоя составила приблизительно 80 мкм/ч. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации процессов изготовления ЧЭ микромеханических инерциальных датчиков.

Список литературы

1. SOI Industry Consortium. Leading SOI Innovation into Broader Markets. URL: <http://www.soiconsortium.org>
2. Nguyen B., Celler G., Mazuré C. A Review of SOI technology and its application // Journal of Integrated Circuits and Systems. 2009. V. 4, N 2. P. 51–54.
3. Renard S. Industrial MEMS on SOI // Journal of Micro-mechanical Microengineering. 2000. V. 10. P. 245–249.
4. Lee C. S., Baek J. T., Yoo H. J. Modeling and characterization of gas-phase etching of thermal oxide and TEOS oxide using anhydrous HF and CH_3OH // Journal of Electrochemical Society. 1996. V. 143, N 3. P. 1099–1103.

E. A. Grinkin, Laboratory Chief, e-mail: evg_grinkin@mail.ru, **S. A. Zhukova**, Head of the Complex, **D. Yu. Obizhaev**, Deputy Head of Department, **A. V. Tyutyugin**, Laboratory Chief, **V. E. Turkov**, Head of the Center State Scientific Centre of Russia. Central Research Institute of Chemistry and Mechanics

Kinetics of Inorganic Sacrificial Layer Etching in the Manufacture of Inertial Sensors Sensing Elements Using "Silicon-on-Insulator" Technology

The process of inorganic "sacrificial" layer etching in three-layer "silicon-on-insulator" substrates was investigated. The results of studies of the kinetics of silicon dioxide etching in a vapor of an aqueous solution of hydrofluoric acid according to the process duration and samples surface temperature were presented. An etching rate increase during etching process and with decreasing temperature was shown. Apparently the observed dependences are connected with water adsorption, formation and evaporation from the surface of the "sacrificial" water layer processes, while water is a catalyst for the reaction between silicon dioxide and hydrofluoric acid. The maximum recorded speed of "sacrificial" layer etching was approximately 80 $\mu\text{m}/\text{h}$. The results can be used in designing and optimization of micromechanical inertial sensors sensing elements manufacturing processes.

Keywords: "sacrificial" layer, silicon dioxide, etching, hydrofluoric acid

References

1. SOI Industry Consortium. Leading SOI Innovation into Broader Markets. URL: <http://www.soiconsortium.org>
2. **Nguyen B., Celler G., Mazuré C.** A Review of SOI technology and its application. *Journal of Integrated Circuits and Systems*. 2009. V. 4, N 2. P. 51–54.

3. **Renard S.** Industrial MEMS on SOI. *Journal of Micro-mechanical Microengineering*. 2000. V. 10. P. 245–249.

4. **Lee C. S., Baek J. T., Yoo H. J.** Modeling and characterization of gas-phase etching of thermal oxide and TEOS oxide using anhydrous HF and CH_3OH . *Journal of Electrochemical Society*. 1996. V. 143, N 3. P. 1099–1103.

УДК 537.9; 535.211; 535-15

Н. Ю. Фирсова¹, аспирант, **А. С. Елшин**¹, студент, **М. А. Марченкова**¹, студент, e-mail: crazy853@mail.ru, **А. К. Болотов**¹, студент, **М. С. Иванов**¹, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., **И. П. Пронин**², канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., **С. В. Сенкевич**², канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., **Д. А. Киселев**³, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., **Е. Д. Мишина**¹, д-р физ.-мат. наук, проф.

¹ МГТУ МИРЭА

² Физико-технический институт им. Иоффе РАН

³ Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"

ПЕРЕКЛЮЧАЕМОСТЬ ПЕРОВСКИТНЫХ МИКРООБЛАСТЕЙ ПЛЕНОК ЦТС, ЛОКАЛЬНО ОТОЖЖЕННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Поступила в редакцию 14.01.2014

Представлены результаты исследования локальных областей перовскита, сформированного в пленке ЦТС при лазерном отжиге. Особенностью методики является, во-первых, использование фемтосекундных лазерных импульсов, обеспечивающих неинвазивность необлученных областей, а во-вторых, использование длины волны из области прозрачности пленки, не попадающей в область поглощения металлического подслоя.

Ключевые слова: ЦТС, фемтосекундный лазерный отжиг, кристаллизация, сегнетоэлектрические пленки, вторая гармоника, пьезоотклик, атомно-силовая микроскопия

Введение

Пленки ЦТС толщиной 300 нм на подложках платинированного кремния были получены методом магнетронного распыления без последующего отжига и имели аморфную структуру. Локальный отжиг проводили с помощью излучения фемтосекундного лазера с длиной волны 1040 нм, сфокусированного в пятно диаметром 5 мкм. Свойства отоженных областей исследовали методами интерферометрии, генерации второй гармоники (ГВГ) и атомно-силовой микроскопии в пьезоде.

Для определения возможности переключения поляризации в отоженной структуре к образцу

прикладывали постоянное напряжение противоположного знака в течение нескольких минут. Показано, что в отоженных областях происходит переключение диэлектрической поляризации, причем области переключения коррелируют с областями высокой интенсивности второй гармоники (ВГ). Области, в которых наблюдается линейная оптическая интерференция, значительно больше областей, в которых наблюдаются высокие значения интенсивности ВГ и пьезокоэффициента.

Фемтосекундные импульсы обладают особыми свойствами, позволяющими разрабатывать, с одной стороны, неинвазивные диагностические ме-

тодики, а с другой — методы локального модифицирования свойств твердого тела. Когда лазерный сверхкороткий импульс взаимодействует с твердой мишенью, электроны нагреваются до высокой температуры за счет поглощения энергии лазерного излучения. Вследствие электрон-фононного взаимодействия горячие электроны передают энергию решетке. Для фемтосекундного лазерного импульса энергия передается электронам в масштабе времени гораздо быстрее, чем время передачи этой энергии в решетку материала, а затем время дальнейшего распространения теплоты по образцу. Последнее приводит к гораздо меньшим тепловым повреждениям по сравнению с более длинными импульсами воздействия. Важную роль играет также строгое гауссово распределение энергии в пучке. Поскольку для многих процессов существуют пороговые значения их возбуждения, то контролируемая область оказывается существенно меньше дифракционного предела и может составлять 100...200 нм.

Фемтосекундное лазерное излучение высокой плотности мощности (порядка ТВт/см²) используют для обработки прозрачных и непрозрачных материалов, лазерной абляции и наноструктурирования твердотельных материалов [1], а также живых тканей [2, 3]. Фемтосекундное лазерное излучение низкой плотности мощности (порядка ГВт/см²) используют для неинвазивной диагностики различных материалов, как органических, так и неорганических. Излучение с промежуточной по значениям плотностью мощности может быть использовано для достаточно мягкой обработки материалов (переведение через фазовый переход, кристаллизацию).

Лазерный отжиг применяют для кристаллизации сегнетоэлектрических пленок с целью минимизировать нагрев элементов, окружающих функциональную область. Как правило, для этой цели используют эксимерные лазеры, энергия импульса которых значительно превосходит ширину запрещенной зоны. Это обеспечивает высокую эффективность отжига, однако, только приповерхностного слоя. Кроме того, модовая структура пятна эксимерных лазеров не позволяет локализовать отжиг в нанометровой области. Проводится также отжиг с использованием СО₂ лазеров, излучение которого с длиной волны 10,6 мкм также попадает в область поглощения материалов. Именно в силу высокого поглощения перечисленные лазеры не дают возможности реализовать *in-situ* диагностику процесса кристаллизации, поскольку в диапазоне этих длин волн оптические свойства не изменяются.

В данной работе представлены результаты локального фемтосекундного лазерного отжига пленок ЦТС. Локальное формирование перовскитной фазы подтверждалось как непосредственно в процессе отжига, так и *ex-situ* по результирующим функциональным параметрам, для чего были разработаны специальные методики.

Эксперимент

Пленки Pb(Zr_{0,54}Ti_{0,46})O₃ толщиной 300 нм наносили на платинированную кремниевую подложку Pt/SiO₂/Si методом магнетронного распыления керамической мишени, содержащей дополнительно 10 % мол. оксида свинца. В процессе осаждения температура подложки составляет 150 °С, вследствие чего, как показывают рентгеновские исследования, структура пленок оказывается аморфной.

Для локального отжига пленки использовали излучение твердотельного иттербиевого лазера (ТеМа, ООО "Авеста-Проект") с длительностью импульса 100 фс, длиной волны 1040 нм, частотой повторения 70 МГц. Излучение падало на образец под углом 45° и фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 2,5 см, размер светового пятна на образце составлял 5 мкм, средняя мощность на образце составляла 70 мВт, время облучения 20 мин.

Процесс отжига контролировался *in-situ* по сигналу второй оптической гармоники в геометрии "на отражение", регистрируемому фотоэлектронным умножителем и системой счета фотонов. Излучение накачки отрезалось цветным фильтром BG39 (Schott Glass). Сигнал ВГ на длине волны 520 нм начинал записываться синхронно с открыванием затвора на пути лазерного луча. Методика ГВГ диагностики процесса кристаллизации пленок ЦТС основана на чувствительности ГВГ к симметрии: ее интенсивность в нецентросимметричной среде (в нашем случае — перовскитной фазе пленки ЦТС) должна превосходить интенсивность в центросимметричной среде (в нашем случае — аморфной фазе пленки ЦТС) на 4...6 порядков [4].

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) была использована для исследования рельефа отожженной области (в режиме топографии), а также для выявления областей сегнетоэлектрической перовскитной фазы и наличия переключения поляризации (в режиме пьезомоды). Использовался атомно-силовой микроскоп NT-MDT. В режиме пьезомоды между кантилевером и противоэлектродом прикладывается переменное напряжение, при этом кантилевер сканируется в контактном режиме [5]. В данном эксперименте использовали сканирующую зондовую нанолaborаторию Ntegra Prima (НТ-МДТ, Россия). В режиме пьезомоды между кантилевером и противоэлектродом прикладывалось переменное напряжение, при этом кантилевер находился в непосредственном контакте с поверхностью образца [5]. Пьезосигнал записывается в виде $A \cos \varphi$, где A — амплитуда пьезоэлектрического смещения, а φ — сдвиг фаз между задающим и детектируемым сигналами. Области поляризации с противоположными полярностями при таких измерениях демонстрируют различный контраст. В пьезомоде помимо режима сканирования использовали режим "переключение". В этом режиме

к образцу прикладывалось постоянное напряжение ± 50 В в течение 2 мин, приводящее к локальной (точечной) поляризации образца (в случае наличия сегнетоэлектричества), после чего проводилось сканирование в пьезомоде.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Зависимость интенсивности ГВГ от времени показана на рис. 1. В начальный момент сигнал ГВГ равен нулю в пределах погрешности измерений. В течение первых 30 с сигнал ГВГ несколько возрастает, после чего следует его резкое возрастание с последующей стабилизацией на более низких значениях. Отметим, что осцилляции сигнала ГВГ связаны с осцилляциями интенсивности мощности лазера.

Результат отжига тестировался прежде всего методами оптической микроскопии. На рис. 2, а (см. вторую сторону обложки) представлено обычное (линейно-оптическое) изображение (освещение лампой). Отметим, что именно методами линейной оптики при стандартном объемном отжиге (в печи) диагностируется переход в перовскитную (сегнетоэлектрическую) фазу, поскольку при этом изменяется показатель преломления. Из рисунка видно, что всю область изображения можно разделить на три части. Внутренняя, представляющая собой круг диаметром около 6 мкм (что совпадает с размером лазерного пятна), стала прозрачной и за счет интерференции излучения при многократном отражении приобрела цвет. Внешняя, начиная с диаметра 12...15 мкм, является пленкой, не подвергшейся действию лазерного облучения. На промежуточном кольце с внутренним диаметром 6 мкм и внешним 12...15 мкм видно воздействие лазерного излучения, однако оно не привело к появлению интерференционной картины, а следова-

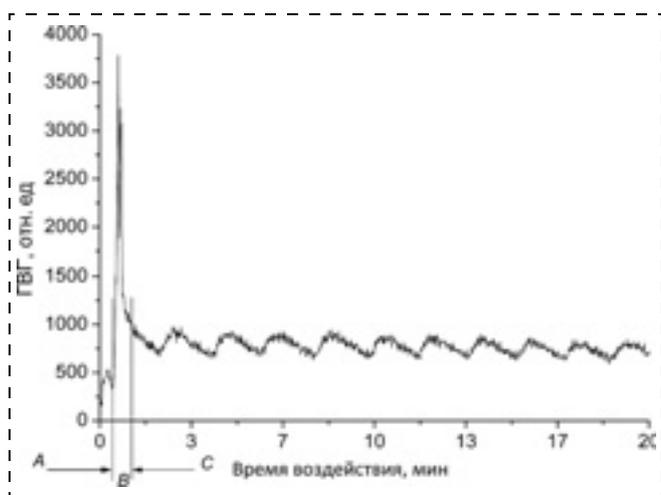


Рис. 1. Зависимость интенсивности ГВГ от времени, полученная *in-situ* в процессе отжига. Стрелками разделены области А, В и С, соответствующие различным процессам, происходящим в области лазерного пятна

тельно, изменению показателя преломления, возникающего при фазовом переходе в перовскитную фазу.

На рис. 2, б представлено изображение отожженной области, полученное на длине волны второй гармоники (400 нм). Изображение имеет четко выделенную кольцевую часть, внешний диаметр которого совпадает с "кругом прозрачности" линейно-оптического изображения. Центральная часть этого круга, однако, не излучает на длине волны ВГ, оставаясь темной, так же как и вся внешняя часть (контраст "яркой" и "темной" частей изображения составляет примерно 500). Поскольку интенсивность ВГ является критерием образования нецентросимметричной фазы, то из рис. 2, б следует, что кристаллизация в перовскитную фазу произошла в кольцевой области с внутренним и внешним диаметром 3 и 6 мкм соответственно.

АСМ-изображение отожженной области представлено на рис. 3 (см. вторую сторону обложки). Рельеф поверхности (рис. 3, а) существенно изменен после отжига. По сравнению с пленкой (шероховатость которой составляет примерно 100 нм) в отожженной области наблюдается центральный провал глубиной порядка 0,3...0,4 мкм и кольцевой (незамкнутый) "вал" высотой 0,4...0,5 мкм. Провал соответствует внутреннему темному кругу на рис. 2, б, "вал" по размерам соответствует кольцевой области интенсивной ВГ на рис. 2, б. Провал в топографии может быть образован за счет абляции ЦТС в области максимальной мощности лазерного пятна, "вал" — за счет кристаллизации в перовскитную фазу, которая происходит с изменением объема. Необходимо отметить различие в структуре кольцевой области на пьезоАСМ- и ГВГ-изображениях: ГВГ-кольцо более прерывистое, что означает, что ГВГ не является мерой геометрического объема кристаллизации. На рис. 3, б представлено АСМ-изображение отожженной области, которое является существенно более прерывистым и в значительно большей степени соответствует ГВГ-изображению. Поскольку АСМ-изображение показывает контраст областей с различной поляризацией сегнетофазы, то можно сделать вывод о том, что ГВГ-изображения также отражают картину кристаллизации в сегнетофазу.

На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) представлены изображения распределения амплитуды пьезоотклика после процесса переполаризации. Из рисунка видно, что в исследуемой структуре происходит переключение поляризации, диаметр области переключения составляет примерно 2 мкм.

После анализа всех изображений необходимо вернуться к временной зависимости сигнала ГВГ, полученного в процессе отжига, и построить модель отжига.

По-видимому, первоначальный отжиг ЦТС в перовскитную фазу на максимальной площади был

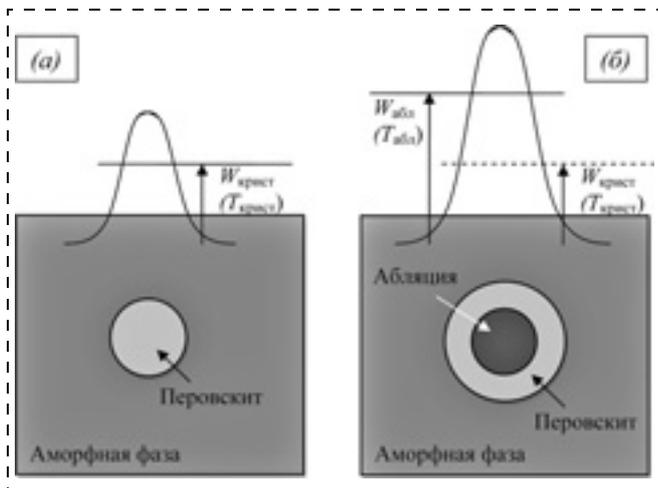


Рис. 5. Модель отжига пленки ЦТС при различных плотностях мощности (соответствующие критические значения $W_{\text{крис}}$ и $W_{\text{абл}}$) и по мере увеличения времени (соответствующие критические значения $T_{\text{крис}}$ и $T_{\text{абл}}$)

осуществлен за первую минуту, чему соответствует максимальный сигнал ГВГ. Дальнейшее уменьшение сигнала ВГ и его стабилизация соответствуют возможной лазерной абляции в центре.

Кристаллизация представляет собой пороговый процесс: она возможна только при достижении пленкой определенной температуры, которой соответствует определенная плотность мощности $W_{\text{крис}}$. Поскольку лазерный пучок является гауссовым, то при небольших мощностях область $W_{\text{крис}}$ существенно меньше ширины гауссова пучка (рис. 5, а). При увеличении мощности область плотности мощности, необходимой для кристаллизации, возрастает, но плотность мощности в центре достигает значений $W_{\text{абл}}$, вызывающих абляцию (рис. 5, б). В связи с этим область, имеющая перовскитную структуру, представляет собой кольцо. При соотношении внешнего и внутреннего диаметров, равного двум, $W_{\text{абл}}/W_{\text{крис}} \approx 2,5$. Поскольку процесс повышения температуры и кристаллизации носит кумулятивный характер [6], то аналогичную картину можно представить и по мере облучения с постоянной мощностью. Процесс

сы, представленные на рис. 5, соответствуют временным интервалам А и В рис. 1.

Заключение

Исследован процесс локального отжига пленок ЦТС с использованием фемтосекундного лазера инфракрасного диапазона. Показано, что структура отожженной области имеет достаточно сложный характер: область перовскита имеет кольцевую форму и достаточно неоднородна. Диапазон температур, при которых происходит кристаллизация, достаточно узок: при ее превышении в 2,5 раза происходит абляция, и в центре лазерного пятна образуется провал. Существенным результатом данной работы является демонстрация полного соответствия изображения ГВГ изображению АСМ в пьезоде и их несоответствие обычному линейно-оптическому изображению. Это означает, что именно методика ГВГ должна использоваться для бесконтактной удаленной диагностики процессов кристаллизации ЦТС в сегнетоэлектрическую фазу, причем это может быть осуществлено в процессе кристаллизации.

Работа поддержана РФФИ (грант 12-02-31620) и при финансовой поддержке Минобрнауки России на оборудовании ЦКП "Материаловедение и металлургия" на базе НИТУ "МИСиС".

Список литературы

- Gattass R. R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // Nat. Photonics. 2008. Vol. 2, 219.
- Juhász T., Nagy Z., Sarayba M., Kurtz R. M. Femtosecond lasers in ophthalmology: clinical applications in anterior segment surgery // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7589, 758904.
- Yanik M. F., Cinar H., Cinar H. N., Chisholm A. D., Jin Y., Ben-Yakar A. Neurosurgery: Functional regeneration after laser axotomy // Nature. 2004. Vol. 432, 822.
- Бломберген Н. Нелинейная оптика. М.: Мир, 1966.
- Kholkin A. L., Bdikin I., Kiselev D. A., Shvartsman V. V., and Kim S. H. Nanoscale piezoelectric characterization of polycrystalline ferroelectrics // J. of Electroceramics. 2007. Vol. 19. P. 81–94.
- Eirsova N. Yu., Mishina E. D., Sigov A. S., Senkevich S. V., Pronin I. P., Kholkin A., Bdikin I., Yuzyuk Yu. I. Femtosecond Infrared Laser Annealing of PZT Films on a Metal Substrate // Ferroelectrics, 2012. Vol. 433, N 1. P. 164–169.

N. Yu. Firsova¹, Graduate Student, A. S. Elshin¹, Student, M. A. Marchenkova¹, Student, A. K. Bolotov¹, Student, M. S. Ivanov¹, Junior Researcher, I. P. Pronin², Senior Researcher, S. V. Senkevich², Research Assistant, D. A. Kiselev³, Research Assistant MISiS, Senior Researcher, E. D. Mishina¹, Professor

¹ Moscow State Technical University of Radioengineering, Electronics and Automation (MSU-MIREA)

² Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences

³ National University of Science and Technology "MISiS"

Switching of Perovskite Micro Regions in Amorphous PZT Thin Films, Annealed with Femtosecond IR Laser

Article presents results of research of perovskite local regions in PZT thin-film by laser annealing. There are two features of this method. Firstly, application femtosecond laser pulsing provides non-invasiveness of unirradiated regions, and, secondly, we use the wavelength falling into transparency band of PZT, and into absorbing band of metal underlayer.

PZT films thickness of 300 nm on platinized silicon substrates were prepared by magnetron sputtering without subsequent annealing and had an amorphous structure. Local annealed with a femtosecond laser with a wavelength of 1040 nm, focused to a spot diameter of 5 microns, was using. Properties of annealed areas studied by interferometry, second harmonic generation and atomic force microscopy at piezomode.

To determine the possibility of polarization switching in the annealed structure, a constant voltage of opposite sign was applied to the sample during a few minutes. It is shown that in the annealed areas of the dielectric polarization is switched, the switching field are correlated with areas of high intensity of the second harmonic. Areas in which there is a linear optical interference, much more areas where there are high value SH intensity and the piezocoefficient.

Keywords: PZT, femtosecond laser annealing, crystallization, ferroelectric films, second harmonic generation, piezoresponse, atomic force microscopy

Reference

1. Gattass R. R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. *Nat. Photonics*. 2008. Vol. 2, 219.

2. Juhasz T., Nagy Z., Sarayba M., Kurtz R. M. Femtosecond lasers in ophthalmology: clinical applications in anterior segment surgery. *Proc. SPIE*. 2010. Vol. 7589, 758904.

3. Yanik M. F., Cinar H., Cinar H. N., Chishoim A. D., Jin Y., Ben-Yakar A. Neurosurgery: Functional regeneration after laser axotomy. *Nature*. 2004. Vol. 432, 822.

4. Blombergen N. *Nelineynaya optika*. M.: Mir, 1966.

5. Kholkin A. L., Bdikin I., Kiselev D. A., Shvartsman V. V., and Kim S. H. Nanoscale piezoelectric characterization of polycrystalline ferroelectrics. *J. of Electroceramics*. 2007. Vol. 19. P. 81–94.

6. Firsova N. Yu., Mishina E. D., Sigov A. S., Senkevich S. V., Pronin I. P., Kholkin A., Bdikin I., Yuzyuk Yu. I. Femtosecond Infrared Laser Annealing of PZT Films on a Metal Substrate. *Ferroelectrics*. 2012. Vol. 433, N 1. P. 164–169.

УДК 65.011.56(075.8)

И. А. Аверин¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф., И. А. Пронин¹, аспирант, e-mail: pronin_i90@mail.ru, В. А. Мошников^{2, 4}, д-р физ.-мат. наук, проф., каф., Д. Ц. Димитров³, д-р физ.-мат. наук, доц., Н. Д. Якушова¹, студент, А. А. Карманов¹, аспирант, М. В. Кузнецова¹, канд. техн. наук, доц., нач. научно-инновационного управления

¹ ФГБОУ ВПО "Пензенский государственный университет"

² ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)"

³ Софийский университет им. св. Климента Охридского

⁴ Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

АНАЛИЗ КАТАЛИТИЧЕСКИХ И АДСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ d-МЕТАЛЛОВ-МОДИФИКАТОРОВ ДИОКСИДА ОЛОВА

Поступила в редакцию 29.01.2014

Исследуются соотношения между каталитической и адсорбционной активностью d-модификатора, а также его электронной конфигурацией в рамках приближения теории кристаллического поля в полупроводниковых адсорбционных сенсорах на основе диоксида олова. При введении модификаторов d-металлов в матрицу диоксида олова при малой их концентрации будет образовываться твердый раствор замещения. Установлено, что приближение кристаллического поля позволяет прогнозировать каталитические и адсорбционные свойства катионов-модификаторов газочувствительного диоксида олова. Хотя данная модель не учитывает реальные заряды на поверхности и возможности s- и p-связывания, из нее вытекают простые и достаточно достоверные корреляции между адсорбционной и каталитической активностью и структурой d-модификатора. Разработанные модели подтверждаются исследованиями газочувствительности тонких пленок диоксида олова, модифицированного d-металлами, к сероводороду.

Ключевые слова: газовый сенсор, модифицирование, касситерит

Разработка газочувствительных материалов на основе полупроводниковых оксидов металлов — одно из перспективных направлений нанотехнологий [1, 2]. В настоящее время в основе подавляющего числа хеморезистивных газовых сенсоров лежит полупроводниковый диоксид олова SnO₂ [3, 4]. Существует большое число методов его син-

теза для нужд производства датчиков. Однако основной недостаток SnO₂ — большое число различных типов адсорбционных центров на его поверхности, что приводит к низкой селективности распознавания отдельных газов в анализируемых смесях [5]. Поэтому модификация диоксида олова, позволяющая улучшить его селективные свойства,

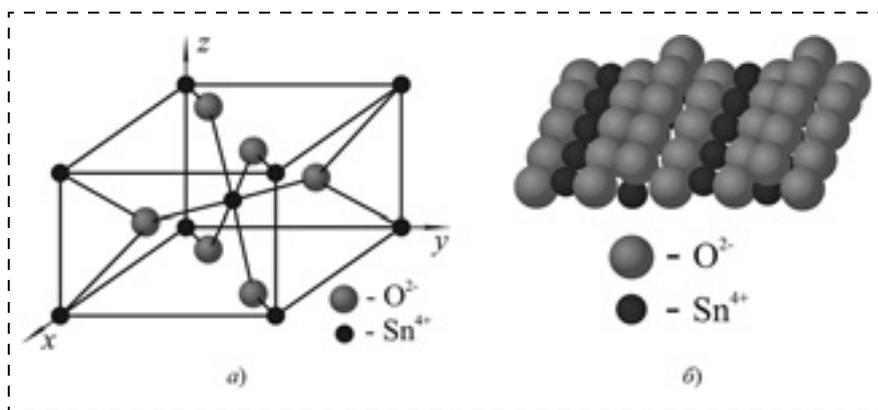


Рис. 1. Структура и поверхность SnO₂:

a — структура SnO₂; *б* — структура идеальной поверхности (110) SnO₂

является актуальной задачей. Особое место в модификации поверхности занимают катионы *d*-металлов, отличающиеся специфическими свойствами углового и радиального распределения *d*-орбиталей, определяющего его химические и адсорбционные свойства.

Целью работы является установление соотношения между каталитической и адсорбционной активностью *d*-модификатора, а также его *d*-электронной конфигурации в рамках приближения теории кристаллического поля. Авторы отмечают, что данное приближение является достаточно грубым и не учитывает ряд факторов. Однако из него вытекают простые соотношения между адсорбционными свойствами и строением модификаторов, что актуально перед разработчиками газовых сенсоров и мультисенсорных систем. Несмотря на достаточно простое приближение эти соотношения подтверждаются большинством окислительно-восстановительных реакций.

структур на основе SnO₂ в большей или меньшей степени. Следует также отметить, что разрыв структуры бесконечного кристалла должен проходить таким образом, чтобы на поверхности не осталось некомпенсированных дипольных моментов, перпендикулярных ей [7]. Это приводит к тому, что поверхность SnO₂ будет иметь вид, представленный на рис. 2, *б* [8].

На рис. 2, *б* видно, что на поверхности будут существовать два сорта катионов олова: один с координационным числом 6, находящийся в центре правильного кислородного октаэдра; другой, с координационным числом 5, находящийся в квадратной пирамиде из ионов кислорода. Некоторые авторы отмечают релаксацию приповерхностной области, которая не изменяет трансляционную симметрию. Также следует отметить, что на поверхности обязательно будут присутствовать вакансии кислорода, которые понижают координационное число катионов олова до 4 или даже 3.

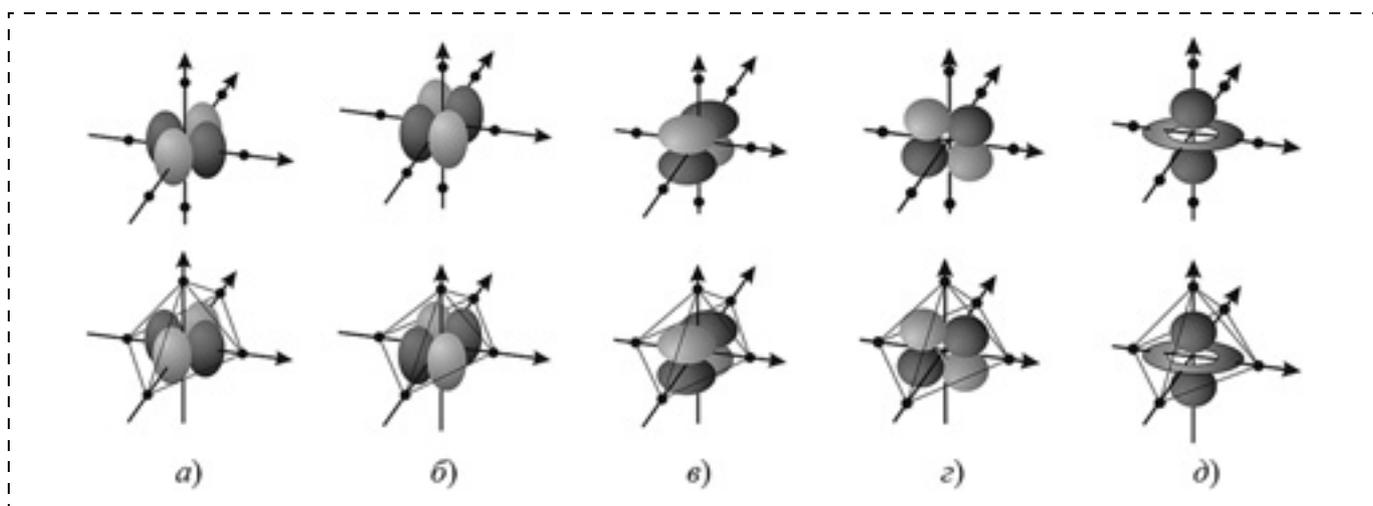


Рис. 2. *d*-орбитали в октаэдрическом поле и поле квадратной пирамиды:

a — $d_{x^2-y^2}$; *б* — d_{xy} ; *в* — d_{zx} ; *г* — d_{yz} ; *д* — d_z^2

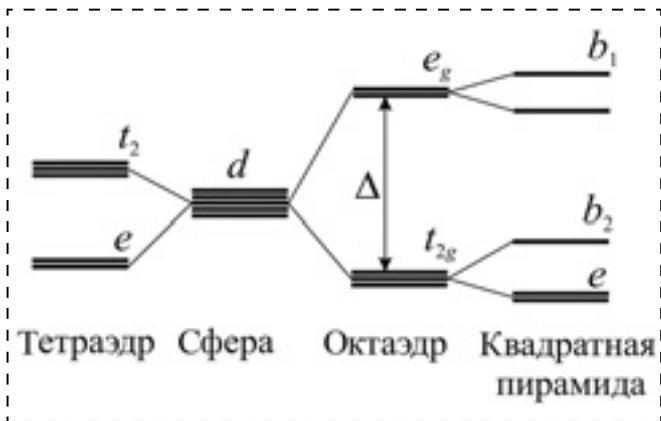


Рис. 3. Схема расщепления катиона модификатора в поле октаэдра, тетраэдра и квадратной пирамиды

При введении модификаторов d -металлов в матрицу диоксида олова при малой концентрации будет образовываться твердый раствор замещения [9–12]. В этом случае ион переходного металла будет иметь ту же координацию, что и замещаемый ион Sn^{4+} . Если взглянуть на форму d -орбиталей (рис. 2), то их можно разделить на две условные группы:

- орбитали $d_{x^2-y^2}$ и d_{z^2} направлены вдоль осей (они носят название e_g -орбиталей);
- орбитали d_{xy} , d_{zx} , d_{yz} локализованы между осями (t_{2g} -орбитали).

В случае расположения d -катиона в сферически-симметричном поле никакого расщепления орбиталей происходить не будет (рис. 3).

Занимая позицию Sn^{4+} , ион переходного металла находится в октаэдрическом поле анионов кислорода. Из рис. 2 (верхний ряд) видно, что в этом

случае орбитали $d_{x^2-y^2}$ и d_{z^2} будут сильнее отталиваться от O^{2-} , чем все остальные. В этом случае происходит расщепление d -уровня на два подуровня. Величину этого расщепления обозначим Δ (см. рис. 3). Катионы модификатора, которые занимают поверхностное положение иона олова с координационным числом 5, находятся в поле пониженной симметрии — квадратной пирамиды (см. рис. 2, нижний ряд). При этом происходит дальнейшее расщепление энергетических подуровней. Так, уровни e_g и t_{2g} распадаются на два подуровня (см. рис. 3).

Применим данную теорию расщепления уровней для процессов адсорбции и катализа на поверхности модифицированного диоксида олова. Для этого учтем, что процесс адсорбции увеличивает координационное число катиона модификатора, а процесс десорбции — уменьшает.

Для количественной оценки выигрыша энергии различных конфигураций окружающих анионов по сравнению со сферической конфигурацией используем параметр энергии стабилизации кристаллическим полем (ЭСКП). Например, очевидно, что для октаэдрической конфигурации $(t_{2g})^m(e_g)^n$ (где m и n — числа электронов на t_{2g} - и e_g -орбиталях соответственно)

$$\text{ЭСКП} = \frac{\Delta}{10} (4m - 6n). \quad (1)$$

Установлено [13], что для большинства оксидов реализуется случай слабого поля лигандов, т. е. суммарный спин всех d -электронов будет максимальным. С учетом этого в таблице представлены расчеты ЭСКП по формулам, аналогичным (1).

Энергии стабилизации кристаллическим полем d -электронов

Число d -электронов	Катион модификатора	ЭСКП, Δ				
		Октаэдр	Квадратная пирамида	Тетраэдр	Разность, $\Delta_{\text{окт.}} - \Delta_{\text{кв.пир.}}$	Разность, $\Delta_{\text{кв.пир.}} - \Delta_{\text{тетр.}}$
0	Ti^{4+} , Sc^{3+}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	V^{4+}	0,4	0,46	0,27	-0,06	0,19
2	Ti^{2+} , V^{3+}	0,8	0,91	0,53	-0,11	0,38
3	Cr^{3+} , Mn^{4+}	1,2	1,0	0,36	0,2	0,66
4	Cr^{2+} , Fe^{4+}	0,6	0,91	0,18	-0,31	0,73
5	Fe^{3+}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	Co^{3+}	0,4	0,46	0,27	-0,06	0,19
7	Ni^{3+}	0,8	0,91	0,53	-0,11	0,38
8	Ni^{2+}	1,2	1,0	0,36	0,2	0,66
9	Cu^{2+}	0,6	0,91	0,18	-0,31	0,73
10	Zn^{2+} , Cu^{+}	0,0	0	0,0	0,0	0,0

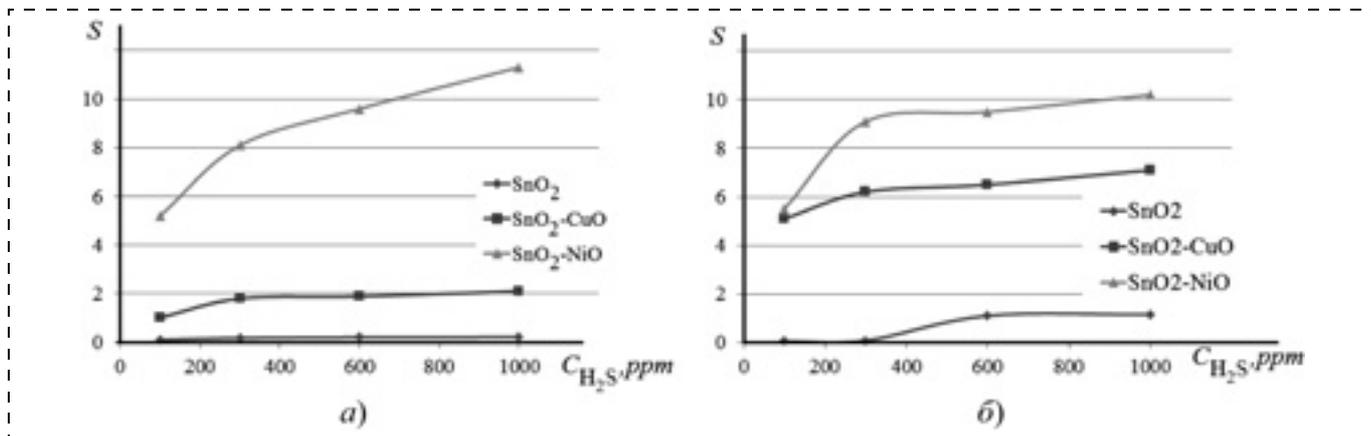


Рис. 4. Чувствительность чистого и модифицированного диоксида олова к сероводороду:
 а — $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; б — $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ расчетов показывает, что при переходе "тетраэдр — квадратная пирамида" (хемосорбция молекулы газа на катион, находящийся рядом с вакансией кислорода) во всех случаях, кроме d^0 , d^5 и d^{10} будет наблюдаться выигрыш в энергии, т. е. адсорбция будет происходить в первую очередь на этих активных центрах. При переходе "квадратная пирамида — октаэдр" выигрыш в энергии будет наблюдаться не всегда, а только в случаях d^3 и d^8 . В этом случае адсорбция таких электроотрицательных молекул, как NH_3 и H_2S , будет энергетически выгодна и будет сопровождаться экзотермическим эффектом. На рис. 4 представлены концентрационные зависимости чувствительности пленок оксида олова, легированного d -модификатором, к сероводороду. Видно, что как при внесении ионов Cu^{2+} , так и ионов Ni^{2+} происходит увеличение чувствительности во всех диапазонах концентраций.

Таким образом, приближение кристаллического поля позволяет прогнозировать каталитические и адсорбционные свойства катионов-модификаторов газочувствительного диоксида олова. Хотя данная модель не учитывает реальные заряды на поверхности, возможности s - и p -связывания и др., из нее вытекают простые и достаточно достоверные корреляции между адсорбционной и каталитической активностью и структурой d -модификатора.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания № 2014/151 (код проекта 117), а также при частичной поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части госзадания НовГУ им. Ярослава Мудрого, проект № 1755.

Список литературы

1. Пронин И. А., Аверин И. А., Александрова О. А., Мошников В. А. Модифицирование селективных и газочувствительных свойств резистивных адсорбционных сенсоров пу-

тем целенаправленного легирования // Датчики и системы. 2013. № 3 (166). С. 13—16.

2. Пронин И. А., Аверин И. А., Димитров Д. Ц., Крестева Л. К., Папазова К. И., Чаначев А. С. Исследование чувствительности к этанолу переходов $\text{ZnO}-\text{ZnO}:\text{Fe}$ на основе тонких наноструктурированных пленок, полученных с помощью золь-гель-технологии // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 6—10.

3. Bakin A. S., Bestaev M. V., Dimitrov D. Tz., Moshnikov V. A., Tairov Yu. M. SnO_2 based gas sensitive sensor // Thin Solid Films. 1997. V. 296, N 1—2. P. 168—171.

4. Вошилова Р. М., Димитров Д. П., Долотов Н. И., Кузьмин А. Р., Махин А. В., Мошников В. А., Таиров Ю. М. Формирование структуры газочувствительных слоев диоксида олова, полученных реактивным магнетронным распылением // Физика и техника полупроводников. 1995. Т. 29, № 11. С. 1987.

5. Пронин И. А. Анализ концентрации собственных дефектов при создании газочувствительных структур на основе диоксида олова // Молодой ученый. 2012. № 8. С. 7—8.

6. Кононова И. Е., Мошников В. А., Криштаб М. Б., Пронин И. А. Фрактально агрегированные микро- и наносистемы, синтезированные из золь-гелей // Физика и химия стекла. 2014. Т. 40, № 2. С. 264—281.

7. Аверин И. А., Мошников В. А., Пронин И. А. Влияние типа и концентрации собственных дефектов на свойства структур диоксида олова // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 1. С. 27—29.

8. Румянцева М. Н. Химическое модифицирование и сенсорные свойства нанокристаллического диоксида олова: Дисс. ... д-ра хим. наук. М.: МГУ, 2009. 328 с.

9. Аверин И. А., Карманов А. А., Мошников В. А., Печерская Р. М., Пронин И. А. Особенности синтеза и исследования нанокompозитных пленок, полученных методом золь-гель-технологии // Изв. высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2012. № 2. С. 155—162.

10. Pronin I. A., Goryacheva M. V. Principles of structure formation and synthesis models of produced by the sol-gel method $\text{SiO}_2-\text{Me}_x\text{O}_y$ nanocomposites // Surface and Coatings Technology. 2013. V. 235. P. 835—840.

11. Pronin I. A., Dimitrov D. Tz., Krasteva L. K., Papazova K. I., Averin I. A., Chanachev A. S., Vojinova A. S., Georgieva A. Ts., Yakushova N. D., Moshnikov V. A. Theoretical and experimental investigations of ethanol vapour sensitive properties of junctions composed from produced by sol-gel technology pure and Fe modified nanostructured ZnO thin films // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. V. 206. P. 88—96.

12. **Пронин И. А., Аверин И. А., Димитров Д. Ц., Мошников В. А.** Чувствительность переходов ZnO—ZnO:Fe к парам этанола // Датчики и системы. 2013. № 6 (169). С. 60—63.

13. **Крылов О. В.** Гетерогенный катализ. М.: ИКЦ "Академкнига", 2004. 679 с.

14. **Пронин И. А., Канева Н. В., Божинова А. С., Аверин И. А., Папазова К. И., Димитров Д. Ц., Мошников В. А.** Фотокаталитическое окисление фармацевтических препаратов на тонких наноструктурированных пленках оксида цинка // Кинетика и катализ. 2014. Т. 55, № 2. С. 176—180.

I. A. Averin¹, Head Chair, **I. A. Pronin**¹, Graduate student, **V. A. Moshnikov**², Professor, **D. Tz. Dimitrov**³, Associate Professor, **N. D. Yakushova**¹, Student, **A. A. Karmanov**¹, Graduate student, **M. V. Kuznetsova**¹, Head of Research

¹ Penza State University

² Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

³ University of Sofia of St. Kliment Ohridski

⁴ Yaroslavl — the Wise Novgorod State University

Analysis Catalytic and Adsorption Properties of *d*-Modifier Metal Tin Dioxide

*We investigate the relation between the catalytic and adsorptive activity *d*-modifier, as well as its electronic configuration in the framework of a crystal field theory in semiconductor sensors based on the adsorption of tin dioxide. With the introduction of modifiers *d*-metals in the matrix of tin dioxide at low concentration will form a substitutional solid solution. In this paper we found the crystal field approximation predicts catalytically and adsorption properties of cation modifier gas sensitive tin dioxide. Although this model does not take into account the actual charges on the surface, the possibilities of *s*-and-*p*-binding, it implies simple and sufficiently reliable correlation between adsorption and catalytic activity and the structure of *d*-modifier. The developed models are supported research gazochuvstvitel completely thin films of tin dioxide modified with *d*-metals to hydrogen sulfide.*

Keywords: gas sensor, modification, cassiterite

References

1. **Pronin I. A., Averin I. A., Aleksandrova O. A., Moshnikov V. A.** Modifikatsirovanie selektivnykh i gazochuvstvitelnykh svoystv rezistivnykh adsorbtsionnykh sensorov putem tselenapravlennoy legirovaniya. *Datchiki i sistemyi*. 2013. V. 3 (166). P. 13—16.

2. **Pronin I. A., Averin I. A., Dimitrov D. Tz., Krasteva L. K., Papazova K. I., Chanachev A. C.** Issledovanie chuvstvitelnosti k etanolu perehodov ZnO—ZnO:Fe na osnove tonkikh nanostrukturirovannykh plenok, poluchennykh s pomoshchyu zol-gel-tehnologii [Research the sensitivity to Ethanol Junctions ZnO—ZnO:Fe] *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*. 2013. V. 3. P. 6—10.

3. **Bakin A. S., Bestaev M. V., Dimitrov D. Tz., Moshnikov V. A., Tairov Yu. M.** SnO₂ based gas sensitive sensor. *Thin Solid Films*. 1997. V. 1—2 (296). P. 168—171.

4. **Voshilova R. M., Dimitrov D. Z., Dolotov N. I., Kuzmin A. R., Machin A. V., Moshnikov V. A., Tairov Yu. M.** Formirovanie struktury gazochuvstvitelnykh sloev dioksida olova, poluchennykh reaktivnyim magnetronnym raspyleniem. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. 1995. V. 11 (29). P. 1987.

5. **Pronin I. A.** Analiz kontsentratsii sobstvennykh defektov pri sozdanii gazochuvstvitelnykh struktur na osnove dioksida olova. *Molodoy ucheniy*. 2012. V. 8. P. 7—8.

6. **Kononova I. E., Moshnikov V. A., Krishtab M. B., Pronin I. A.** Fraktalno agregirovannyye mikro- i nanosistemy, sintezirovannyye iz zoley. *Fizika i himiya stekla*. 2014. V. 2 (40). P. 264—281.

7. **Averin I. A., Moshnikov V. A., Pronin I. A.** Vliyanie tipa i kontsentratsii sobstvennykh defektov na svoystva struktur dioksida olova. *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*. 2013. V. 1. P. 27—29.

8. **Rumyantseva M. N.** Himicheskoe modifikatsirovanie i sensornyye svoystva nanokristallicheskogo dioksida olova. *Disseratsiya ... doktora himicheskikh nauk*. M.: MSU. 2009. 328 p.

9. **Averin I. A., Karmanov A. A., Moshnikov V. A., Pechersky R. M., Pronin I. A.** Osobennosti sinteza i issledovaniya nanokompozitnykh plenok, poluchennykh metodom zol-gel-tehnologii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2012. V. 2. P. 155—162.

10. **Pronin I. A., Goryacheva M. V.** Principles of structure formation and synthesis models of produced by the sol-gel method SiO₂—Me_xO_y nanocomposites. *Surface and Coatings Technology*. 2013. V. 235. P. 835—840.

11. **Pronin I. A., Dimitrov D. Tz., Krasteva L. K., Papazova K. I., Averin I. A., Chanachev A. S., Bojinova A. S., Georgieva A. Ts., Yakushova N. D., Moshnikov V. A.** Theoretical and experimental investigations of ethanol vapour sensitive properties of junctions composed from produced by sol-gel technology pure and Fe modified nanostructured ZnO thin films. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. V. 206. P. 88—96.

12. **Pronin I. A., Averin I. A., Dimitrov D. Tz., Moshnikov V. A.** Chuvstvitelnost perehodov ZnO—ZnO:Fe k param etanola. *Datchiki i sistemyi*. 2013. V. 6 (169). P. 60—63.

13. **Krylov O. V.** Geterogennyiy kataliz. M.: ICC "Akademkniga", 2004. 679 p.

14. **Pronin I. A., Kanaeva N. V., Bozhinova A. S., Averin I. A., Papazova K. I., Dimitrov D. Tz., Moshnikov V. A.** Fotokataliticheskoe okislenie farmatsevticheskikh preparatov na tonkikh nanostrukturirovannykh plenkah oksida tsinka. *Kinetika i kataliz*. 2014. V. 2 (55). P. 176—180.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ Micro- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.383.5

С. Г. Новиков, канд. техн. наук, доц., **Н. Т. Гурин**, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., первый проректор, проректор по учебной работе, **А. В. Беринцев**, инженер, **В. А. Родионов**, аспирант, **А. А. Штанько**, науч. сотр., **И. С. Федоров**, студент
E-mail: novikovsg@ulsu.ru
Ульяновский государственный университет

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ С S-ОБРАЗНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Поступила в редакцию 26.02.2014

Рассмотрен новый класс полупроводниковых приборов с передаточными вольт-амперными характеристиками, содержащими участок отрицательного дифференциального сопротивления. Предложены способы описания и реализации приборов с передаточными S-образными вольт-амперными характеристиками. Проведено моделирование передаточных характеристик данных приборов. Показано, что рассмотренные приборы обладают встроенной защитой от перегрузки по напряжению на входе. Такие приборы могут найти применение в различных областях электроники, микроэлектроники, мехатроники и микросистемной техники.

Ключевые слова: отрицательное сопротивление, моделирование, передаточная вольт-амперная характеристика

Введение

Современные полупроводниковые приборы с положительной обратной связью (ПОС) [1], имеющие широкие функциональные возможности, принято делить по типу обратной связи (по току или по напряжению) на два класса: полупроводниковые приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) и приборы с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП). Кроме того, существуют полупроводниковые приборы, обладающие одновременно характеристиками, содержащими как участки ОДС, так и участки ОДП. Эти участки могут наблюдаться одновременно во входных и выходных цепях, например, у тиристора [2], симистора [3], *N*-транзистора [4] и некоторых биполярно-полевых приборов [5]. Также участки ОДС и ОДП можно наблюдать одновременно на выходной ВАХ прибора [6–8]. Кроме того участки, например ОДП, могут быть и на передаточных характеристиках полупроводниковых приборов [9, 10]. При этом в известных источниках отсутствуют данные, связанные с рассмотрением передаточных характеристик четырехполюсников, которые также могут содержать и участки ОДС. Такие приборы имеют встроенную защиту от перегрузки по напряжению на входе.

Постановка задачи

Задачи, решаемые в данной работе, касаются разработки, моделирования и исследования приборов с передаточными ВАХ, содержащими участок ОДС. Моделирование выполняли с использованием пакета PSPICE и моделей биполярных и полевых транзисторов.

Исследование полупроводниковых приборов с передаточной ВАХ S-типа

При исследованиях ПОС полупроводниковый прибор обычно представляется в виде четырехполюсника с внешней или внутренней цепью положительной обратной связи и рассмотрение проводится в рамках классической теории четырехполюсников и теории систем автоматического управления. Для анализа характера отрицательного сопротивления на передаточных характеристиках четырехполюсников с ПОС можно рассмотреть варианты их схемной реализации на основе приборов, имеющих во входной и выходной цепях ВАХ, содержащие участки ОДС и ОДП.

Рассмотрим четырехполюсник (рис. 1), для которого определим условия появления ОДС на передаточных ВАХ.

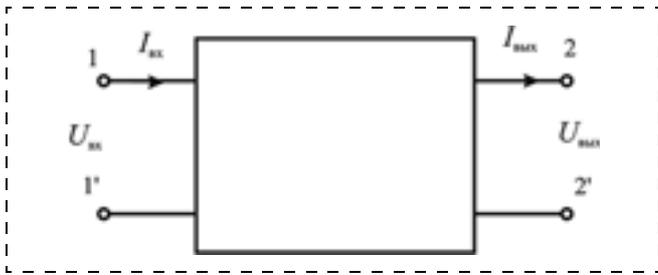


Рис. 1. Четырехполюсник с ОДС и ОДП во входных и выходных цепях

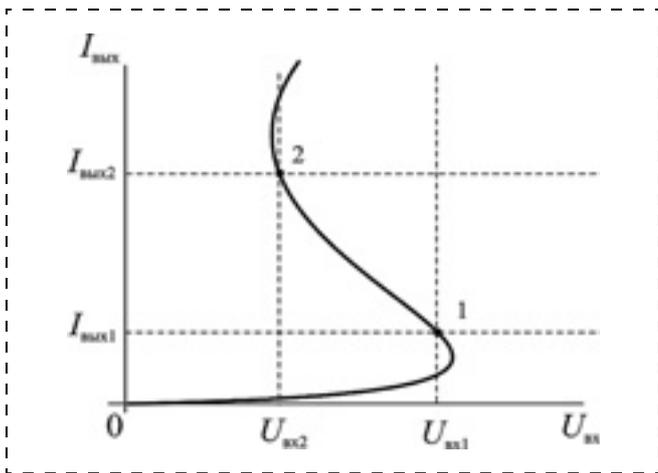


Рис. 2. Передаточная вольт-амперная характеристика четырехполюсника в случае $U_{вх1} > U_{вх2}$ и $I_{вых1} < I_{вых2}$

В качестве исследуемых характеристик рассмотрим передаточные сопротивления с входа на выход и с выхода на вход:

$$\Delta Z_{пер12} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вых}} = \frac{U_{вх1} - U_{вх2}}{I_{вых1} - I_{вых2}},$$

$$\Delta Z_{пер21} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вх}} = \frac{U_{вых1} - U_{вых2}}{I_{вх1} - I_{вх2}}.$$

Индексы 1 и 2 во входных и выходных напряжениях и токах соответствуют точкам на участке ОДС, последовательно появляющимся на кривой ВАХ при движении от начала координат (рис. 2).

Каждое из этих дифференциальных сопротивлений может иметь отрицательное значение, в частности, для $\Delta Z_{пер12}$ при $U_{вх1} > U_{вх2}$ и $I_{вых1} < I_{вых2}$ передаточная ВАХ имеет S -образный вид и участок ОДС (рис. 2).

Для передаточного сопротивления с выхода на вход $Z_{пер21}$ при условии $U_{вых1} > U_{вых2}$ и $I_{вх1} < I_{вх2}$ характеристика будет выглядеть аналогично.

Для реализации четырехполюсников с передаточными ВАХ, содержащими участки ОДС, можно воспользоваться известной элементной базой (би-

полярные и полевые транзисторы) и схемотехническими решениями [11], позволяющими образовать S - и N -образные характеристики во входных и выходных цепях четырехполюсника.

Как показывает анализ, возможны два варианта получения передаточных S -образных ВАХ, которые реализуются при использовании в качестве управляемого элемента прибора с выходной S -образной ВАХ.

В первом случае (рис. 3), в качестве управляемого элемента используется трехэлектродный управляемый ток прибор с выходной S -образной характеристикой (тиристор или симистор [12, 13]). В качестве управляющего прибора можно использовать любой двухэлектродный N -прибор или его схемотехнический аналог [11]. В результате такой комбинации происходит следующее. При первоначальном росте тока управления, протекающего через N -прибор, включенный в цепь управления S -прибора, у последнего наблюдается снижение напряжения переключения. При снижении рабочего тока, протекающего через N -прибор (на участке ОДП) происходит снижение тока управления S -прибора, и на выходной ВАХ S -прибора происходит рост напряжения переключения. Таким образом можно реализовать встроенную защиту от перенапряжения во входной цепи.

Зависимость выходного напряжения от входного тока прибора, реализованного по структурной схеме, изображенной на рис. 3, а, имеет участок отрицательного дифференциального сопротивления.

На рис. 3, б изображена модельная схема комбинированного прибора такого типа. В качестве управляемого S -прибора использован двухтранзисторный схемотехнический аналог тиристора, а в качестве управляющего прибора — схемотехнический аналог λ -диода. Дополнительные резистивные элементы в схеме обеспечивают режим согласования токов и напряжений для этих двух аналогов в составе схемы комбинированного прибора с S -образной передаточной ВАХ.

На рис. 3, в приведены выходные и передаточные характеристики такого прибора, полученные в результате SPICE-моделирования. График представляет собой поверхность, сечения которой плоскостью $(U_{э1э2}, I_{э2})$ являются типичными выходными характеристиками S -прибора, управляемого ток, а сечения плоскостью $(U_{э1э2}, U_{э1э3})$ являются передаточными ВАХ.

Особенностью представленной на рис. 3, в характеристики является то, что поверхность является неограничивающей. Для нахождения рабочих режимов данного прибора необходимо искусственно ограничить области входных напряжений для предотвращения перехода выходной характеристики N -прибора в область вторичной положительной ветви и пробоя.

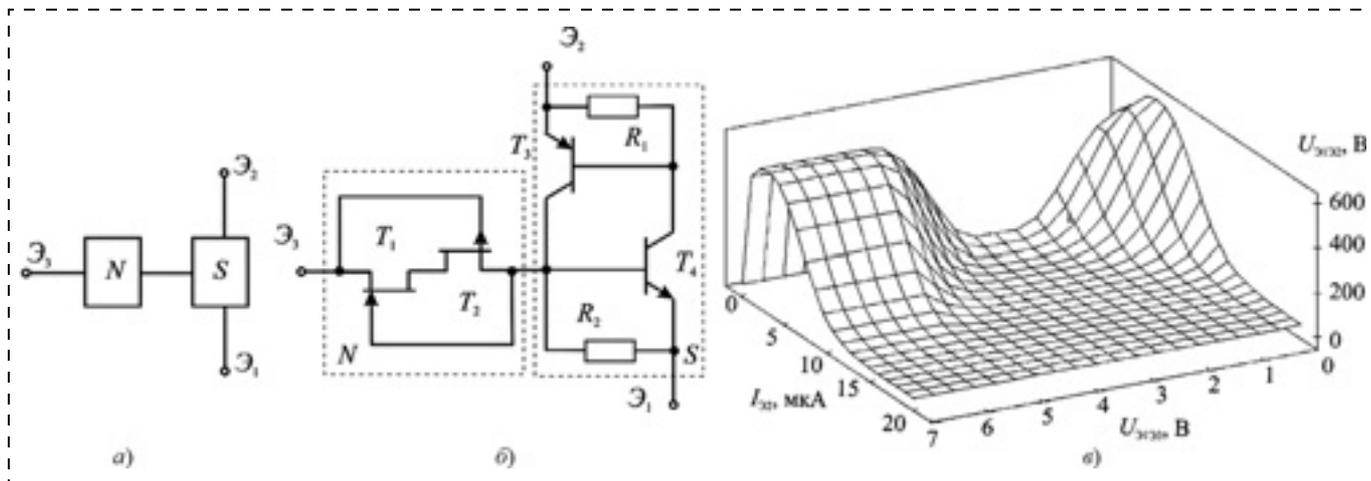


Рис. 3. Структурная (а), принципиальная (б) схемы комбинированного прибора с передаточными S -образными ВАХ и семейство его ВАХ (в)

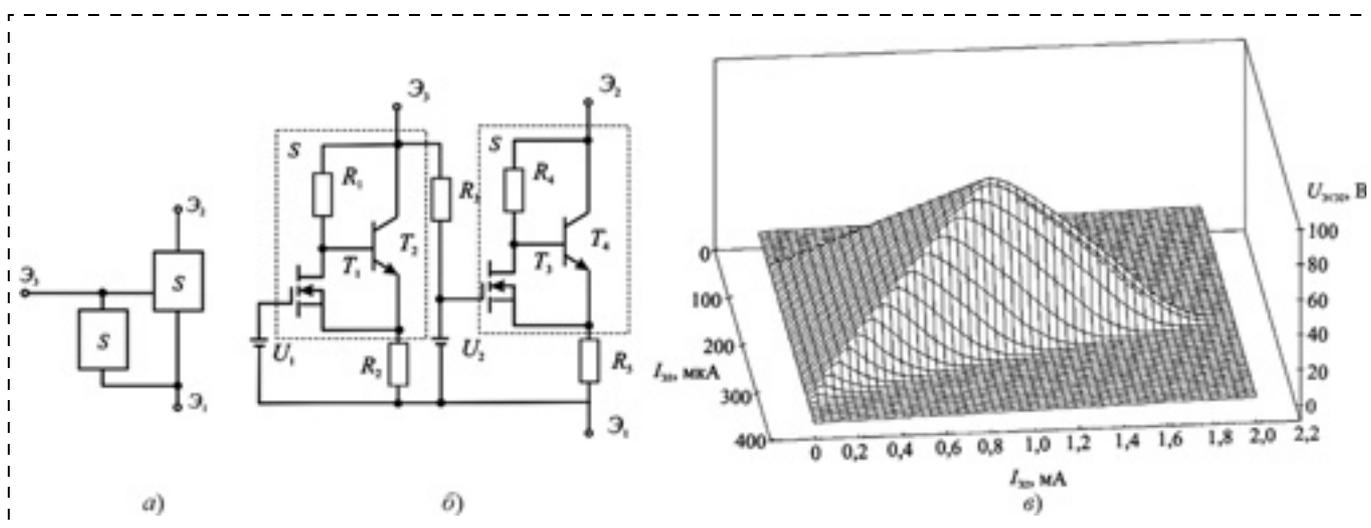


Рис. 4. Структурная (а) и принципиальная (б) схемы комбинированного прибора с S -образными передаточными ВАХ и семейства его ВАХ (в)

Другой вариант прибора с S -образной передаточной ВАХ представляет собой комбинированный трехэлектродный прибор с выходной S -образной ВАХ, управляемый двухэлектродным прибором также с S -образной выходной ВАХ (рис. 4, а). В результате такого взаимодействия на передаточной ВАХ также наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления.

При использовании такой комбинации начальный рост входного напряжения, а затем его уменьшение обеспечивают первоначальный рост выходного напряжения, а затем его уменьшение, и появление таким образом передаточной ВАХ S -типа.

В качестве модели такого прибора рассмотрена схема, представленная на рис. 4, б.

Для построения S -приборов использована схема, включающая в себя полевой транзистор с изолированным затвором и биполярный транзистор

[11]. Полевой транзистор выполняет роль управляемого шунта, включенного параллельно база-эмиттерному переходу биполярного транзистора. Для получения выходной ВАХ с участком отрицательного дифференциального сопротивления у такого прибора необходимо наличие дополнительного источника напряжения, подключенного к затвору полевого транзистора. При реализации комбинированного прибора с передаточной S -образной ВАХ использованы два одинаковых S -прибора, включенных по схеме, приведенной на рис. 4, б, с дополнительно введенными в схему резистивными делителями напряжения для согласования уровней входных и выходных напряжений S -приборов.

Выходные и передаточные характеристики, полученные в результате SPICE-моделирования, рассмотренной схемы в одном поле представляют собой поверхность, представленную на рис. 4, в.

Сечения поверхности плоскостью ($U_{Э2}$, $U_{Э1Э2}$) представляют собой типичные выходные характеристики S -прибора, а сечения плоскостью ($I_{Э3}$, $U_{Э1Э2}$) являются передаточными ВАХ. Передаточные ВАХ также имеют участок отрицательного дифференциального сопротивления, т. е. являются S -образными.

Заключение

Приведенные примеры реализации приборов с передаточными ВАХ S -типа указывают на существование отдельного класса приборов — приборов с S -образными передаточными ВАХ, у которых помимо входных и выходных статических вольт-амперных характеристик с участками отрицательного сопротивления и отрицательной проводимости и передаточные вольт-амперные характеристиками имеют участок ОДС, в результате чего, для проведения полного анализа работы подобных приборов необходимо рассматривать входные, выходные и передаточные характеристики. Наличие участка ОДС на этих характеристиках значительно расширяет функциональные возможности полупроводниковых приборов.

Таким образом, результаты исследования, представленные в данной работе, указывают на перспективу дальнейшего развития физики и техники полупроводниковых приборов с ОДС и ОДП в направлении создания твердотельных и интегральных приборов с участками отрицательного сопротивления на передаточных ВАХ, аналогичных прибору, описанному в [14], а также исследования влияния различных полей и излучений на свойства таких приборов, что может привести к созданию новой элементной и компонентной базы современной электроники.

Применение таких приборов возможно в различных областях электроники, микроэлектроники, мехатроники и микросистемной техники.

Список литературы

1. **Гаряинов С. А., Абезгауз И. Д.** Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. М.: Энергия, 1970. С. 320.
2. **Гаряинов С. А., Тиходеев Ю. С.** Физические модели полупроводниковых приборов с отрицательным сопротивлением. М.: Радио и связь, 1997. 216 с.
3. **Бакланов С. Б., Гурин Н. Т., Лычагин Е. В.** и др. Полярно-чувствительные N -образные входные вольт-амперные характеристики симисторной структуры // Изв. вузов Электроника. 2003. № 6. С. 17–21.
4. **Стафеев В. И., Ван-Шоу-Цзюе, Филина Л. В.** Триоды с N -образной характеристикой // Радиотехника и электроника. 1962. Т. 7, № 8. С. 1404–1408.
5. **Two-terminal negative resistance device employing bipolar-uni-polar transistor combination:** пат. 3670183 : / Ager D. J., Stanley I. W.; June. 1972.
6. **Многоустойчивый** полупроводниковый прибор: пат. 1095409: / Корабельников А. Т. — № 3503218; заявл. 14.10.1982; опубл. 30.05.1984, Бюл. № 20.
7. **Многоустойчивый** полупроводниковый прибор (его варианты): пат. 1129720: / Корабельников А. Т. — № 3546515; заявл. 28.01.1983; опубл. 15.12.1984, Бюл. № 46.
8. **Семенов А. А., Усанов Д. А.** Активный двухполюсник с S - и N -образной вольт-амперной характеристикой // Изв. вузов. Электроника. 2009. № 2. С. 17–21.
9. **Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В.** Моделирование и исследование биполярного транзистора с передаточной n -образной вольт-амперной характеристикой // Изв. вузов Электроника. 2010. № 4. С. 14–19.
10. **Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В.** Моделирование и исследование негatronа с передаточной N -образной вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 4. С. 17–24.
11. **Chua L., Yu Juebang, Yu Youying.** Bipolar — JFET — MOSFET negative resistance devices // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1985. Vol. 32. P. 46–61.
12. **Герлах В.** Тиристоры: пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1985. 328 с.
13. **Тейлор П.** Расчет и проектирование тиристоров: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 208 с.
14. **Полупроводниковый** прибор со встроенной защитой в цепях управления и нагрузки: пат. 2428765 Российская Федерация: / Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В.; заявитель и патентообладатель УлГУ. — № 2010116561/28; заявл. 26.04.2010; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25.

S. G. Novikov, Associate Professor of the Radiophysics and Electronics Department, Ulyanovsk State University, **N. T. Gurin**, Professor, Head of the Radiophysics and Electronics Department, Vice-Rector of Ulyanovsk State University, **A. V. Berintsev**, Engineer, **V. A. Rodionov**, Researcher, **A. A. Shtan'ko**, Researcher, **I. S. Fedorov**, Researcher
E-mail: novikovsg@ulsu.ru
Federal State-funded Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Semiconductor Devices with an S-Shaped Transfer Current-Voltage Characteristics

We study a novel class of semiconductor devices with transfer current-voltage characteristics comprising a section exhibiting negative differential resistance. A method to describe and develop various devices with S-shaped current-voltage characteristics has been proposed. Simulation of transfer characteristics in this class of devices has been performed. It is shown that the considered devices have built-in over-voltage protection in the input. Such devices can be used in various fields of electronics, microelectronics, mechatronics and microsystem technics.

Keywords: negative resistance, modeling, transfer current-voltage characteristic

References

1. **Garyainov S. A., Abezgauz I. D.** Poluprovodnikovyye pribory s otricatel'ny'm soprotivleniem (Semiconductor devices with negative resistance). Moscow: E'nergiya, 1970. 320 p.
2. **Garyainov S. A., Tixodeey Yu. S.** Fizicheskie modeli poluprovodnikovyx priborov s otricatel'ny'm soprotivleniem (Physical models of semiconductor devices with negative resistance), Moscow: Radio i svyaz', 1997. 276 p.
3. **Baklanov S. B., Gurin N. T., Ly'chagin E. V., Novikov S. G., Kartavenko A. V., Kosty'lov M. A.** Polyarno-chuvstvitel'ny'e N-obrazny'e vxochnyye vol't-ampernyye karakteristiki simistornoj struktury' (Structure of triac with N-shaped polar-sensitive input current-voltage characteristic). *Izvestiya vuzov E'lektronika*. 2003. No. 6. P. 17–21.
4. **Stafeev V. I., Van-Shou-Czyue, Filina L. V.** Triody's N-obraznoj karakteristikoj (Triodes with an N-shaped characteristic). *Radiotekhnika i e'lektronika*. 1962. Vol. 7, No. 8. P. 1404–1408.
5. **Two-terminal** negative resistance device employing bipolar-unipolar transistor combination: пат. 3670183 : / Ager David Joseph, Stanley Ian William; June. 1972.
6. **Korabel'nikov A. T.** Mnogoustojchivy'j poluprovodnikovyy'j pribor (Multi stable semiconductor device). Patent RF, No. 1095409, 1984.
7. **Korabel'nikov A. T.** Mnogoustojchivy'j poluprovodnikovyy'j pribor (Multi stable semiconductor device (variants thereof)), Patent RF, No. 1129720, 1984.
8. **Semyonov A. A., Usanov D. A.** Aktivny'j dvuxpolyusnik s S- i N-obraznoj vol't-ampernoj karakteristikoj (Active impedor with the S-and N-shaped current-voltage characteristic). *Izvestiya vuzov E'lektronika*. 2009. No. 2. P. 17–21.
9. **Novikov S. G., Gurin N. T., Korneev I. V.** Modelirovanie i issledovanie bipolyarnogo tranzistora s peredatochnoj n-obraznoj vol't-ampernoj karakteristikoj (Simulation and research of a bipolar transistor with a transfer N-shaped current-voltage characteristic). *Izvestiya vuzov E'lektronika*. 2010. No. 4. P. 14–19.
10. **Novikov S. G., Gurin N. T., Korneev I. V.** Modelirovanie i issledovanie negatrona s peredatochnoj N-obraznoj vol't-ampernoj karakteristikoj (Simulation and research of a negatron with the transfer N-shaped current-voltage characteristic). *Nano- i mikrosicemnaya texnika*. 2010. No. 4. P. 17–24.
11. **Chua L., Yu. Juebang, Yu. Youying.** Bipolar — JFET — MOSFET negative resistance devices. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1985. Vol. 32. P. 46–61.
12. **Gerlax V.** Tiristory' (Thyristors), Moscow: E'nergoatomizdat, 1985. 328 p.
13. **Tejlor P.** Raschet i proektirovanie tiristorov (Calculation and design of thyristors). Moscow: E'nergoatomizdat, 1990. 208 p.
14. **Novikov S. G., Gurin N. T., Korneev I. V.** Poluprovodnikovyy'j pribor so vstroennoj zashhitoy v cepyah upravleniya i nagruzki (Semiconductor device with integrated protection in control circuits and load). Patent RF, No. 2428765, 2011.

Новая книга

Igor I. Abramov. Brain as an Object of Electronics. Saarbrücken:
LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.

In the monograph the full interpretation of human brain functioning as an object of electronics is first presented. Three hypotheses are formulated, which on the one hand, enable to explain perception, thinking and other important mental functions and, on the other hand, to propose a perspective combined approach of detailed analysis of the brain, based on multilevel simulation in conjunction with experimental methods. The principles of brain functioning are explained from the point of view of a specialist in electronics. A clear definition of what is the thought is first proposed. The monograph will be of interest to a wide range of readers, including specialists in neurophysiology, neuropsychology, neurocybernetics, electronics, etc., as well as students, as it is written in a clear language without new terms.

Ознакомиться и приобрести книгу можно на сайтах:

<http://www.amazon.com/>

<https://www.ljubljkunigi.ru/>

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 20.05.2014. Подписано в печать 24.06.2014. Формат 60×88 1/8. Заказ МС614. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансд солошнз». Отпечатано в ООО «Авансд солошнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.