

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 19, № 6, 2017

- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикрооптоэлектромеханические системы

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

Vol. 19, № 6, 2017

The articles are published
in Russian and English





МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2017

Международный форум «Микроэлектроника - 2017»

Республика Крым
г. Алушта

Дата проведения: 2–7 октября 2017 г.

Место проведения: г. Алушта (Республика Крым),
отель Riviera Sunrise Resort & SPA



ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Международный форум «Микроэлектроника 2017» является высокоинтеллектуальной площадкой №1 в России, которая объединяет и маститых ученых с мировым именем, и молодых инженеров, и разработчиков, а также отечественных и зарубежных представителей бизнес-сообщества.

ПРОГРАММА МЕРОПРИЯТИЙ

Научная конференция

Конференция по микроэлектронике на тему: «Микроэлектроника – ЭКБ и электронные модули», состоящая из 8 секций по направлениям отрасли.

Фестиваль инноваций

Представление собственных разработок, идей, проектов представителями научных и бизнес-кругов и оценка экспертного совета о перспективах и возможностях их применения.

Деловая программа

Коммерческие доклады и круглые столы по разработке и принятию решений для развития отрасли в условиях современной экономической ситуации.

ЗАДАЧИ ФОРУМА

- Поддержание экспертного диалога по ключевым вопросам, направленным на развитие отрасли
- Отражение основных трендов и обсуждение последних тенденций использования микроэлектронных разработок и конечных продуктов в смежных отраслях
- Конструктивный диалог специалистов различных направлений и разных поколений микроэлектронной отрасли
- Уникальная возможность встретиться «лицом к лицу» и создать более продуктивные алгоритмы взаимодействия всем участникам рынка: от разработчиков до производителей и дистрибьюторов

ЦЕЛЕВАЯ АУДИТОРИЯ

- Эксперты с мировым именем
- Молодые инженеры и разработчики
- Разработчики и потребители продукции ЭКБ
- Интеграторы, поставщики решений
- Представители федеральных и региональных органов государственной власти Российской Федерации
- Представители научных и образовательных учреждений
- Представители смежных секторов направлений науки и бизнеса

Подробная информация размещена на официальном сайте Форума: <http://microelectronica.pro>

ОРГАНИЗАТОРЫ:



НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 19. № 6 ♦ 2017

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в международные базы данных на платформе Web of Science: Chemical Abstracts Service (CAS), которая входит в Medline, и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и включен в международную базу INSPEC и в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по техническим, физико-математическим и химическим наукам.

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

Статьи имеют DOI и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

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:

Агеев О. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

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

Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН

Каляев И. А., д.т.н., проф., акад. 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

Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН

Лабунов В. А., д.ф.-м.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь)

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

Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН

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

Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. 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.

Астахов М. В., д.х.н., проф.

Быков В. А., д.т.н., проф.

Викулин В. В., к.х.н., 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.

Леонович Г. И., д.т.н., проф.

Панич А. Е., 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.

Рыжий М. В., к.ф.-м.н., проф. (Япония)

Телец В. А., д.т.н., проф.

Тимошенко С. П., д.т.н., проф.

Тодуа П. А., д.т.н., проф.

Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н.

Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф.

Шептунов С. А., д.т.н., проф.

Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва)

Лысенко А. В. (отв. секретарь)

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)

Шетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Ларионов Ю. В. Сканирование поверхности кремния в высоко-
вольтном РЭМ без контаминации 323

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Гусев Е. Э., Дедкова А. А., Дюжев Н. А., Ковалёв А. С., Онуфриен-
ко А. П. Исследование влияния операционных параметров процесса
PECVD на характеристики пленок диоксида кремния 331

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Деспотули А. Л., Андреева А. В. Размерные факторы и нелинейные
процессы в структурно-динамическом подходе наноионики 338

Рубцов Ю. В., Алексеева А. В. Разработка IBIS-модели микросхем
концентраторов сетей, применяемых для проектирования телекомму-
никационной аппаратуры 352

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Драгунов В. П., Киселев Д. Е., Синицкий Р. Е. Особенности электро-
механических взаимодействий в МЭМС с непараллельными электро-
дами 360

Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. Современное состоя-
ние и перспективы развития микросистемной электромеханики . . . 370

Садков В. Д., Фомина К. С. Расчет сопротивления пленочного эле-
мента произвольной формы 380

Аннотации и статьи на русском и английском языках доступны на сайте
журнала (<http://microsystems.ru>; <http://novtex.ru/nmst/>) в разделе "Архив
статей с 1999 г."

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,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586



Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. — **CHIEF EDITOR**
Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA) —
DEPUTY CHIEF EDITOR

Editorial council:

Ageev O. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
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., Acad. RAS
Gaponov S. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS
Kaljaev I. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. 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
Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Labunov V. A., (Belorussia), Sci. (Phys.-Math.), Acad. NASB
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Nikitov S. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. 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.
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.
Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Leonovich G. I., 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.
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryzhii M. V., (Japan), PhD (Phys.), Prof.
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Sheptunov S. 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.
Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial staff:

Antonov B. I. (Director Publ.)
Lysenko A. V. (Executive secretary)
Chugunova A. V.
Grigorin-Ryabova E. V.
Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.)
Shchetinkin D. A. (site)

The Journal is included in the international databases of the chemical sciences – Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences – INSPEC, and it is also indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform.

The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia.

Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages.

The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

CONTENTS

NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

Larionov Yu. V. Scanning of Silicon Surface in a High Voltage SEM without Contamination 327

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Gusev E. E., Dedkova A. A., Djuzhev N. A., Kovalev A. S., Onufrienko A. P. Research of the Influence of the Operational Parameters of PECVD Process on Characteristics of Silicon Dioxide Films . . . 335

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Despotuli A. L., Andreeva A. V. Dimensional Factors and Non-Linear Processes in Structure-Dynamic Approach of Nanoionics 346

Rubtsov Yu. V., Alekseeva A. V. Development of an IBIS Model of Microcircuits of the Network Concentrators Applied for Designing of Telecommunication Equipment 357

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Dragunov V. P., Kiselev D. E., Sinitkiy R. E. Specific Features of the Electromechanical Interactions in MEMS with Nonparallel Electrodes 365

Karayan H. S., Gandilyan S. V., Gandilyan V. V. Current State and Prospects of Development of Microsystems Electromechanics 376

Sadkov V. D., Fomina K. S. Calculation of Resistance Film Element of Arbitrary Shape 383

Our:	To subscribe, please contact with:
Web: www.microsystems.ru/eng ;	JSC "MK-Periodica":
e-mail: nmst@novtex.ru	Tel: +7 (495) 672-7012
	Fax: +7 (495) 306-3757
	E-mail: import@periodicals.ru

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ NANOTECHNOLOGY AND SCANNING PROBE MICROSCOPY

УДК 537.533.35

DOI: 10.17587/nmst.19.323-330

Ю. В. Ларионов, ст. науч. сотр., e-mail: luv@kapella.gpi.ru, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

СКАНИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ РЭМ БЕЗ КОНТАМИНАЦИИ

Поступила в редакцию 17.02.2017

Выступы на поверхности кремниевой пластины, покрытой естественным окислом, сканировали в высоковольтном растровом электронном микроскопе (РЭМ) в непрерывном режиме и с паузами в несколько минут. Оказалось, что смена режима сканирования существенно влияет на динамику формирования контаминационной пленки на поверхности выступов. Выявилось, в частности, что непрерываемое сканирование приводит к практически полному отсутствию контаминации. Установлена связь между динамикой формирования пленки и эмиссией вторичных электронов из поверхности выступа. Вариация эмиссии связана, предположительно, с вариацией электрического заряда под поверхностью выступа вследствие смены режима сканирования.

Ключевые слова: нанометрология, растровый электронный микроскоп (РЭМ), рельефная структура, контаминация, наведенный электрический заряд, диаметр электронного пучка

Введение

Даже в высоковакуумном РЭМ на поверхности кремниевой пластины, сканируемой электронным пучком, часто формируется углеводородная контаминационная пленка [1]. Покрывая рельефную структуру на этой пластине, пленка изменяет ее линейные размеры (ширина выступов увеличивается). Контаминация особенно вредоносна для меры ширины. Если при контроле линейных размеров ИС в РЭМ ширина выступа измеряется однократно, то аттестованный участок выступа меры сканируется, как правило, много раз при каждой проверке (для измерения среднего значения и случайной погрешности) и обычно с множеством проверок до окончания срока аттестации меры. Многократное сканирование одного участка способно вывести значение его ширины за пределы допустимой погрешности измерения. Оценка вредоносности контаминации для меры МШПС-2К была проверена в работе [2]. Там выявилось, что допустимое число измерений до достижения пределов погрешности может достигать 360. Однако эти выводы основаны на малой выборке: всего для нескольких выступов лишь на одном РЭМ в одном режиме сканирования. Выводы эти сделаны в организации, которая аттестует меры и поэтому потенциально заинтересована в оптимистичной оценке влияния контаминации.

Недопустимое уширение выступа вследствие контаминации можно исключить при замене участка сканирования выступа на соседний участок [2]. Однако исходная неравномерность ширины на разных участках выступа может потребовать проведения метрологической аттестации нового участка. Ограничить влияние контаминации на ширину выступа можно очисткой поверхности меры, периодически удаляя с нее пленку. Такая очистка, однако, приводит к искажению исходного профиля выступа и к изменению его ширины [3].

В работе [4] было показано, что в определенных режимах сканирования поверхности в РЭМ возможно почти полное отсутствие контаминационного уширения выступа. Но картина этого явления, условия его возникновения остаются неясными. Цель данной работы — выяснение причин, приводящих к блокировке осаждения контаминационной пленки на поверхности кремния.

Оценка влияния контаминации на ширину выступа

Контаминационное уширение выступа составляет доли нанометра за скан [5]. Необходимо создать методику измерений, которая уменьшает влияние в том числе и систематических ошибок на значение уширения. Уширение выступа в результате его контаминации будем экспериментально определять по изменениям его ширины на кривой

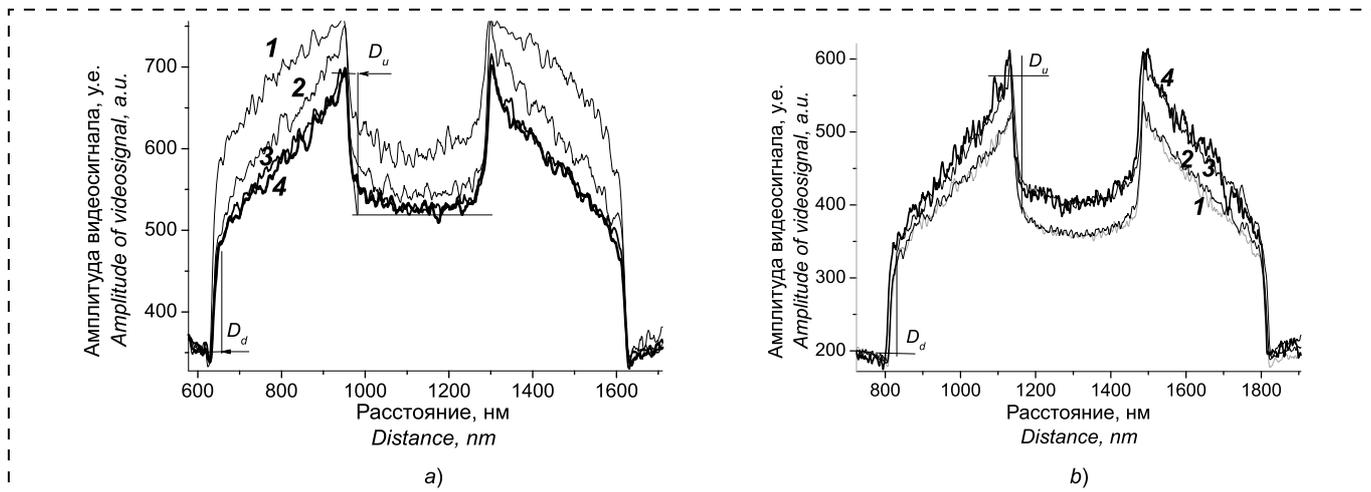


Рис. 1. Кривые видеосигнала 1–4 для соответственно 1-, 6-, 60- (сразу за пробной паузой) и 66-го сканов (символами D_u и D_d помечены значения эффективного диаметра, соответствующие измерениям по верхнему и нижнему углам выступа): а — при сканировании в режиме без пауз (видно почти одинаковое уменьшение амплитуды для всех участков кривых с увеличением числа сканов); б — то же, но при сканировании с паузами. Заметно неравномерное увеличение амплитуды ВС на боковых участках профиля от числа сканов

Fig. 1. Curves of the video signal (VS) 1–4 for accordingly 1st, 6th, 60th (right after a trial pause) and 66th scans (symbols D_u and D_d — effective diameter, corresponding to the measurements at the top and bottom angles of the protrusion): а — during scanning in the mode without pauses (almost identical reduction of the amplitude for all sites of the curves with an increase of the number of scans is visible); б — the same, but during scanning with pauses. A nonuniform increase of VS amplitude is visible on the lateral sites of the profile from the number of scans

видеосигнала (ВС) (полученной из РЭМ-изображения этого выступа) при последовательных его сканированиях (как и в работе [5]). Ширина выступа W определяется в работе [6] как

$$W = L - D, \quad (1)$$

где L — расстояние между пиками амплитуды на кривой ВС; D — значение эффективного диаметра пучка, ошибка в котором способна внести вклад в значение уширения.

Отметим, что измерение эффективного диаметра пучка D является, по-видимому, наиболее сложной задачей в РЭМ-метрологии, так как пучок, выходящий из выступа и формирующий его изображение, не совпадает ни по размеру, ни по форме с падающим пучком РЭМ [7]. Но в стандарте РФ [8] значение диаметра пучка РЭМ определяется в соответствии с упрощенной моделью формирования РЭМ-изображения [6]. В этой модели для измерения диаметра выделяются отдельные участки кривой ВС, соответствующие углам выступа. Линейный размер этих участков определяется лишь диаметром эмитированного пучка (в модели априорно равного падающему) и увеличением РЭМ. Ширина этих участков определяет эффективное значение диаметра пучка D .

В согласии с [9] существует принципиальная возможность измерять D по участкам кривой ВС, соответствующим и верхним, и нижним углам выступа (рис. 1, а, б). Однако авторы модели априорно определяют эффективный диаметр по участкам, соотношенным только с нижними углами, что и реализовано в работе [8]. Далее эта величина обозначается как D_d (рис. 1, а). Эффективный диаметр, оп-

ределенный по участкам кривой соответствующим верхнему основанию D_u (рис. 1), измерять сложнее и менее надежно. Это особенно значимо для случая, когда диаметр пучка около или менее 10 нм и ширина верхнего основания выступа близка к значению диаметра (для МШПС — от 30 нм [8]). Отметим, что моделью рельефной структуры в работе [9] является идеальная равнобедренная трапеция без ограничений на ширину верхнего основания.

В работе [7] выяснилось, что выступ меры МШПС идеальной трапецией не является, а его контаминационное уширение неравномерно: у верхнего основания оно происходит активнее, чем у нижнего. В результате при многократных сканированиях D_d изменяется слабее D_u [5]. Использование слабо меняющейся D_d для определения ширины W в работе [8] методически надежнее, но ведет к результату, который не связан с реальным профилем контаминированного угла выступа у верхнего основания и его изображением. В работе [5] была оценена разница между D_d и D_u для выступа тест-объекта меры МШПС-2К. Оказалось, что она может составить 5...10 нм уже при первых сканах (до формирования пленки с подобной толщиной). С ростом толщины контаминационной пленки эта разность может и увеличиваться, и уменьшаться.

Таким образом, динамика изменения величин D_d и D_u способна внести существенный вклад в погрешность измерения контаминационного уширения. В частности, обнаруженное явление отсутствия контаминации в ходе сканирования выступа может быть результатом одновременного роста L и D в формуле (1).

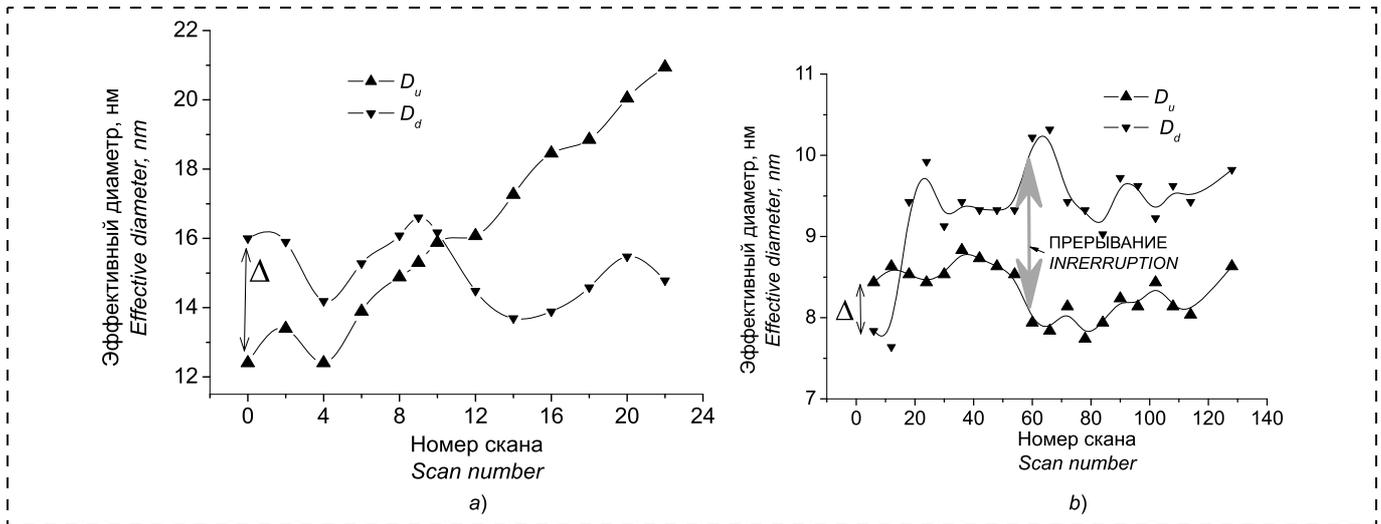


Рис. 2. Изменение значений эффективных диаметров пучка D_d и D_u при многократном сканировании выступа: a — в режиме с паузами; b — то же, но без пауз. Стрелкой обозначена тестовая пауза на 5 мин. Видно, что в режиме без пауз тренды в значениях величин отсутствуют

Fig. 2. Variation of the values of the effective diameters of beam D_d and D_u during repeated scanning of the protrusion: a — in the mode with pauses; b — the same, but without pauses. Arrow points up to a test 5-min. pause. It is visible that in the mode without pauses the trends in the values are absent

Отметим, что D_d и D_u , соответствуя размеру пучка электронов, выходящего из угловых участков поверхности выступа с размером несколько нанометров, могут послужить другой цели. Они способны стать величинами, которые регистрируют изменения профиля трапеции на этих участках вследствие осаждения контаминационной пленки.

Условия эксперимента

Для экспериментов использовались тест-объекты меры ширины МШПС-2К [7]. Высота ступеньки равнялась ~ 460 нм, ширина верхнего основания ~ 330 нм. Сканирование выступа проводили в высоковакуумном РЭМ S4800 (*Hitachi*) при энергии электронов 20 кэВ и увеличении $30.000\times$. Разрешение по паспорту составляет ~ 1 нм при энергии пучка 15 кэВ. Размер пикселя составил $\sim 1,65$ нм при размере кадра 2560×1920 пикселей. Продолжительность одного сканирования была около 10 с, а паузы — 2 мин.

Изображения выступов после каждого сканирования фиксировались в оцифрованном виде в компьютере, после чего обрабатывались с помощью программы анализа изображений на основе программной платформы NDPL [10]. Работа программы начинается с формирования кривых видеосигнала по строкам изображения выступа. Далее проводится усреднение кривых ВС по всем строкам одного изображения. Усредненная кривая ВС использовалась для получения значений эффективных диаметров.

Результаты эксперимента

Сканирование без контаминации. В работе [4] было обнаружено, что контаминационное ушире-

ние отсутствует при сканировании без пауз. Постоянство профиля вблизи углов выступа (изменяемого осаждением пленки) можно установить не только по неизменности ширины выступа, но и по постоянству значений D_d и D_u . На рис. 2, a и b показано, как изменяются D_d и D_u от числа сканирований с паузами и без них. Как видно, в режиме сканирования с паузами значение D_u монотонно растет с увеличением числа сканов, значение D_d — слабо изменяется в пределах 2 нм, причем это изменение коррелировано с D_u на начальном этапе из 10 сканов. Наличие тренда в значениях D_u указывает на рост контаминации у верхнего основания выступа, а его отсутствие для значений D_d свидетельствует об отсутствии контаминации у нижнего основания. В режиме сканирования без пауз (см. рис. 2, b) D_d и D_u изменяются без заметного тренда, что свидетельствует об отсутствии пленки у обоих углов выступа. Вариация значений D_d и D_u в сканах $30 \div 60$ и $80 \div 140$ (следующих за начальными сканами и сканами после тестового прерывания) составляет несколько ангстрем и связана, вероятно, со случайной погрешностью измерения этих величин.

Вариация кривой ВС при многократных сканированиях. Изменения, происходящие в кривых ВС при многократных сканированиях выступа, отражаются наиболее полно на их форме. Формы кривых ВС, полученных в режиме без пауз после первого, шестого, 60-го и 66-го сканов, показаны на рис. 2, a . Значения амплитуды в разных сканах нормированы по видеосигналу, соответствующему нижнему плато трапеции. Видно, что последовательность сканирований приводит к уменьшению амплитуды ВС, причем оно примерно одинаково на участках

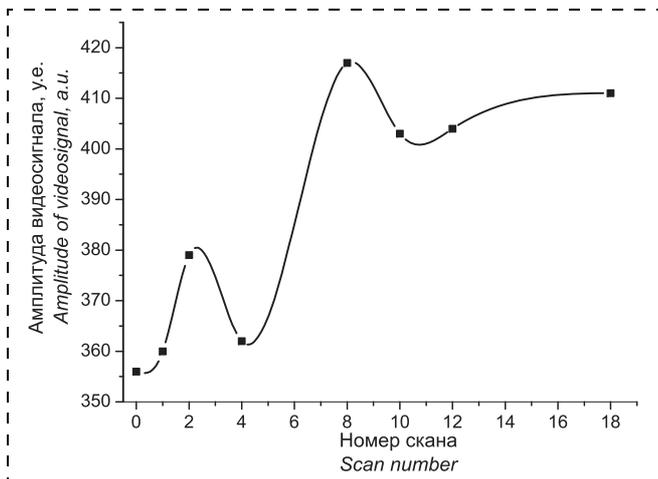


Рис. 3. Изменение амплитуды видеосигнала для участка в середине выступа с увеличением числа сканов при сканировании с паузами. Видно, что изменение в сканах 0–10 находится в корреляции с вариацией D_d и D_u в соответствующих сканах на рис. 2, а

Fig. 3. Variation of the amplitude of the video signal for the site in the middle of the protrusion with an increase of the number of scans during the regime of scanning with pauses. It is visible, that the variation in scans 0–10 is in correlation with variation of D_d and D_u in the corresponding scans in fig. 2, a

кривой, соответствующих верхнему основанию и боковым стенкам. Эта особенность сохраняется даже после 140 сканов. Однако при сканировании с паузами характер вариации формы кривой ВС изменяется (см. рис. 1, b). В этом случае с каждым сканированием происходит не уменьшение, а увеличение амплитуды ВС, причем неравномерное на разных участках профиля выступа.

Изменение амплитуды оказывается не только пространственно неоднородным, но и неравномерным и немонотонным по времени (по номеру скана) в одной точке профиля. Из рис. 3 видно, что амплитуда ВС в середине выступа при сканировании его с паузами вначале увеличивается, достигая локального максимума при втором скане, затем уменьшается до минимума при четвертом скане. Такой характер вариации амплитуды на соседних участках профиля вблизи верхних углов выступа способен изменить их ширину и значения D_u . Свидетельство этому — корреляция между вариацией амплитуды ВС в середине выступа на рис. 3 и изменением значений эффективного диаметра D_u на рис. 2, а. Видно, что амплитуды значений D_d и D_u в первых 10 сканах изменяются коррелированно не только между собой, но и с кривой на рис. 3.

Обсуждение результатов

В данной работе показано, что систематические ошибки в измерении эффективного диаметра пучка могут существенно влиять на оценку контаминационного уширения выступа. Представлены экспериментальные доказательства того, что такие

ошибки отсутствуют при многократном сканировании выступа без пауз. Это означает, что геометрический профиль такого выступа остается практически неизменным. В режиме сканирования с паузами происходит осаждение пленки преимущественно на участки верхнего основания и боковые стенки около него, что вызывает искажение верхней части профиля выступа.

Эти выводы сделаны в результате фиксации изменений величин — регистраторов изменений профиля у верхнего и нижнего оснований D_d и D_u и одновременно эффективных диаметров в ходе сканирования выступа. Отметим любопытную и очень важную особенность вариации величин D_d и D_u на рис. 2, b: однократное прерывание сканирования на ~4 мин перед сканом № 60, которое не прерывалось в остальное время, привело лишь к непродолжительной вариации значений указанных величин, не вызвав устойчивого увеличения значения диаметра (как в случае сканирования с многократными паузами). Это означает, что сканирование без контаминации возможно и при наличии пауз, но после длительного непрерываемого периода. При сканировании с регулярными паузами, превосходящими время одиночного скана, контаминация возникает.

Отметим еще одну особенность кривых на рис. 2, a и b. Видно, что разница Δ между значениями D_d и D_u существует даже при первых сканах (до заметной контаминации). Значение Δ на рис. 2, a достигает ~4 нм (относительное значение около 30 %). Из рис. 2, a также видно, что с увеличением числа сканов разница Δ вначале несколько уменьшается, но затем растет и становится равной ~7 нм при скане № 22 (более 40 % диаметра). Такое значение заметно превышает случайную погрешность измерений, составляющую единицы ангстрем. В рамках модели формирования РЭМ-изображения [6] разница должна отсутствовать и ее наличие свидетельствует о несовершенстве этой модели.

Оказалось, что вариация во времени амплитуды ВС на рис. 3 (измеренной на одном из участков профиля выступа) коррелирует с временной вариацией ширины этого выступа (см. рис. 2, a). Это означает, что немонотонные изменения ширины не являются случайной погрешностью, они определяются не только контаминацией выступа, вызывающей только увеличение ширины. Эти вариации ширины выступа и амплитуды ВС можно объяснить немонотонным изменением электрического заряда, изменяющим, в свою очередь, эмиссию электронов из приповерхностного слоя выступа. Наведенный заряд способен формироваться в ходе сканирования в слое естественного окисла и в слое контаминационной пленки и фиксироваться в них на время паузы.

Как видно из рис. 1, а, предполагаемое уменьшение эмиссии почти одинаково на разных участках поверхности выступа при сканировании в режиме без пауз. По-видимому, наводимый в этом случае отрицательный заряд в приповерхностном слое увеличивается, что и приводит к уменьшению эмиссии электронов пучка. Возможно, что в ходе паузы после 60 непрерываемых сканов полной релаксации этого заряда не происходит, в результате и контаминации выступа также не возникает.

При сканировании с паузами эмиссия МВЭ увеличивается с каждым сканом, причем неравномерно по профилю выступа. По-видимому, в этом случае формируется положительный наведенный заряд — вначале на верхнем основании выступа, затем и на боковых стенках. Предположительно этот заряд и приводит к осаждению на поверхность пленки, которая и сама приобретает такой же заряд. Неравномерное накопление заряда на верхнем основании и боковых поверхностях выступа приводит к неравномерному росту пленки.

Заключение

Характер роста контаминационной пленки на поверхности выступа зависит от режима сканирования в РЭМ. Экспериментально доказано ее отсутствие на верхних углах выступа при сканировании его в РЭМ в непрерываемом режиме продолжительностью несколько десятков сканов. При сканировании с паузами пленка на углах выступа осаждается после каждого скана.

Предположительно осаждение пленки вызывается или блокируется наводимым в ней или в слое естественного окисла электрическим зарядом (в зависимости от знака заряда). В разных режимах

сканирования формируются приповерхностные заряды разного знака. Зарядение контаминационной пленки на верхнем основании вызывает, по-видимому, более активный ее рост и на этом участке, и на боковых стенках вблизи от него.

Список литературы

1. Amman M., Sleight J. W., Lombardi D. R. Atomic force microscopy study of electron beam written contamination structures // J. Vac. Sci. Technol. В. 1996. № 14 (1). P. 54—64.
2. Гавриленко В. П., Митюхляев В. Б., Раков А. В., Тодуа П. А. и др. Влияние контаминации в РЭМ на профиль рельефных элементов нанометрового диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 2. С. 2—6.
3. Гавриленко В. П., Кузин А. И., Митюхляев В. Б., Раков А. В. и др. Трехмерная реконструкция поверхностных рельефных структур АО стереоизображению в РЭМ // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 15—17.
4. Ларионов Ю. В. Зависимость контаминации рельефной структуры от режима сканирования РЭМ // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 8. С. 467—472.
5. Ларионов Ю. В. Измерение диаметра пучка РЭМ с помощью рельефной структуры. Влияние контаминации / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 11. С. 51—60.
6. Новиков Ю. А., Раков А. В., Стеколин И. Ю. Механизмы вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела // Труды ИОФАН. 1998. Т. 55. С. 109—122.
7. Ларионов Ю. В. Оценка диаметра пучка РЭМ по кривым видеосигнала от трапецеидальной структуры. Ч. 1. Модельный эксперимент // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 3. С. 87—97.
8. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Национальный стандарт РФ, ГОСТ Р 8.628.2007. М.: Стандартинформ, 2007.
9. Phillipov M. N., Gavrilenko V. P., Kuzin A. A., Rakov A. V. et al. Natural oxide thickness measurements on the test silicon relief pitch structure // Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8700. 8700OU. P. 1—6.
10. Программа анализа изображений микроскопов, программная платформа NDPL. URL: <https://yadi.sk/i/YtOL8GEid9nK4>, 2009.

Yu. V. Larionov, Senior Researcher, e-mail: luv@kapella.gpi.ru, A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian academy of Science, 119991, Moscow, Vavilova 38,

Corresponding author:

Larionov Yuriy V., Senior Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian academy of Science, 119991, Moscow, Vavilova 38, e-mail: luv@kapella.gpi.ru

Scanning of Silicon Surface in a High Voltage SEM without Contamination

Received on February 17, 2017

Accepted on March 01, 2017

Formation of contamination film on an object surface in a high voltage scanning electron microscope (SEM) is investigated. Protrusions on a silicon plate covered by a layer of natural silica scanned in a SEM in regimes without interrupts and with pauses with duration of some minutes. The change of a scanning regime is occurred to affect essentially the dynamics of formation of contamination film on a protrusion surface. It was revealed that uninterrupted regime of scanning leads to almost total absence of contamination on the protrusion surface. A relation between the dynamics of a contamination film formation and variation of the emission of slow secondary electrons is established. The emission variation is supposed to link with variation of electric charges under the surface of protrusion due to the change of a scanning regime.

Keywords: nanometrology, SEM, relief structure, contamination, induce electric charge, electron beam diameter

For citation:

Larionov Yu. V. Scanning of Silicon Surface in a High Voltage SEM without Contamination, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 323–330.

DOI: 10.17587/nmst.19.323-330

Introduction

Even in a high-vacuum SEM a hydrocarbonic contamination film [1] is often formed on the surface of a silicon plate scanned by an electron beam. By covering the relief structure on a plate, the film changes its linear sizes (the widths of the protrusions increase). Contamination is especially harmful for the linewidth measure. If during control of the linear sizes of IC in SEM the width of a protrusion is measured only once, the certified site of a protrusion in a measure ledge is scanned, as a rule, many times at each calibration (for measurement of the average value and an accidental error) and usually with numerous calibrations before termination of the certification period of a measure.

Repeated scanning of one protrusion can move the value of its width beyond the limits of an admissible error of measurement. The estimation of injuriousness of the contamination for MShPS-2K measure was checked in [2]. It turned out, that the admissible number of measurements before achievement of an error limit can reach 360. However, these conclusions are based on a small sample collection: only for several protrusions, only in one SEM, and in one mode of scanning. The conclusions are made in the organization, which certifies measures and is potentially interested in an optimistic estimation of the influence of the contamination.

Inadmissible broadening of a protrusion due to contamination can be excluded as a result of replacement of the site of a scanned protrusion for the neighboring site [2]. However, the initial nonuniformity of the width on of different sites of the protrusion can demand a metrological certification of a new site. It is possible to limit the influence of the contamination of the protrusion width by cleaning the surface of a measure, periodically removing the film from it. However, such cleaning leads to a distortion of the initial profile of the protrusion and to changing its width [3].

In [4] it was demonstrated, that in certain modes of scanning of the surface in SEM an almost complete absence of the contamination broadening of a protrusion is possible. But the pattern of the phenomenon and conditions for its occurrence remain unclear. The aim of the given work is clarification of the reasons leading to blocking of the deposition of the contamination film on the silicon surface.

Estimation of the influence of contamination on the protrusion width

Contamination broadening of a protrusion equals to parts of a nanometer per a scan [5]. It is necessary to create a measurement technique, which reduces the in-

fluence of errors, including systematic errors also, on the value of broadening. We will determine broadening of a protrusion experimentally by evaluation changing in the curves of a video signal (VS) which results from consecutive scanings of this protrusion (as in [5]). The width of protrusion W is determined in [6] as

$$W = L - D, \quad (1)$$

where L — distances between the amplitude peaks on VS curve; D — value of the effective diameter of a beam, an error in which can bring a contribution to the value of broadening.

We should point out, that measurement of the effective diameter of beam D is obviously the most challenging task in SEM metrology, because the beam leaving the protrusion surface and forming its image does not coincide by the size and the profile with the falling beam of SEM [7]. But in a standard of the Russian Federation [8] the value of the diameter of a SEM beam is determined in accordance with the simplified model of formation of a SEM image [6]. In this model, some separate sites of VS curve are singled out, corresponding to the protrusion profile angles. The linear size of those sites is determined only by the diameter of the emitted beam (in the model it is a priori equal to the falling one) and magnification of SEM. The width of those sites is labeled as the *effective value* of the diameter of beam D .

In accordance with [9], in principle, there is a possibility to measure D by the sites of VS curve, corresponding to the top and bottom angles of the protrusions (fig. 1, *a, b*). However, the authors of the model a priori determine the effective diameter by the sites associated only with the bottom angles, exactly as it was realized in [8]. Further this value is designated as D_d (fig. 1, *a*). The effective diameter D_u associated with the top base of protrusion (fig. 1) is more difficult to measure and these measurement results are less reliable. This is especially significant, when the diameter of a beam is about 10 nm or less, and the width of the top base of the protrusion is close to the value of the diameter (for MShPS — from 30 nm [8]). We should point out, that the model of the protrusion profile in [9] is the ideal isosceles trapeze without restrictions concerning the width of the top base.

In [7] it turned out that the protrusion profile of MShPS measure was not an ideal trapeze, and its contamination broadening was not even: it was more active at the top base than at the bottom one. As a result, in case of the repeated scanings D_d would change less than D_u [5]. The use of less varying quantity D_d for determination of width W in [8] is methodically more re-

liable, but it leads to a systematic error due to the replacement of a the real profile image at the top the upper protrusion base to the profile image at the down protrusion base. In [5] the difference between D_d and D_u for the protrusion of a test object of MShPS-2K measure was estimated. It appeared, that it could be 5...10 nm already at the first scans (before formation of a film). With the growth of the thickness of the contaminated film this difference can increase or decrease.

Thus, the dynamics of variation of values D_d and D_u can bring an essential contribution to the measurement error of contamination broadening. In particular, the discovered phenomenon of absence of contamination on a protrusion can be a result of the simultaneous growth of both L and D in the formula (1).

We should point out that D_d and D_u , corresponding to the size of the beam of electrons, coming out from the protrusion surface angle sites of several nanometers, can also serve to another aim. They can become the quantities, which record the changes of the trapeze profile on those sites as a result of deposition of the contaminated film.

Experiment conditions

For the experiments the test-objects of MSHPS-2K linewidth measure [7] were used. The step height was equal to ~460 nm, the width of the top base ~330 nm. Scanning of the protrusion was done in high-vacuum SEM S4800 (Hitachi) at the energy of electrons of 20 keV and magnification of 30.000 \times . According to the SEM passport its resolution was ~1 nm at the beam energy of 15 keV. The size of a pixel was ~1,65 nm, and the size of a frame — 2560 \times 1920 pixels. Duration of one scanning was about 10 s, of a pause — 2 min.

Images of the protrusions after each scanning were fixed in a digital form in a computer, then they were processed by means of a program for image analysis on the basis of NDPL software platform [10]. Program operation began with formation of the curves of the video signal (VS) for the each line of a protrusion image. Then, the curves of VS of all lines of one image were averaged. The averaged curve of VS was used for obtaining of the values of the effective diameters.

Results of the experiment

Scanning without contamination. In [4] it is discovered, that the contamination broadening is absent during scanning without pauses. But the constancy of a profile near the protrusion angles (changed by the film deposition) can be determined not only by the invariance of the protrusion width, but also by constancy of D_d and D_u . Fig. 2, *a* and *b*, demonstrate, how D_d and D_u vary from the number of scans with pauses and without them. Apparently, in the mode of scanning with pauses D_u grows monotonously with an increase of the number of scans, D_d — changes slightly within 2 nm,

and this change is correlated with D_u at the initial stage of 10 scans. Presence of a trend in D_u points to the growth of contamination at the top base of the protrusion, and its absence for D_d testifies to the absence of contamination at the bottom-base. In the mode of scanning without pauses (see fig. 2, *b*) D_d and D_u change its values without any appreciable trend, which testifies to the absence of a film at both angles of the protrusion. Variation of D_d and D_u in scans 30...60 and 80...140 (coming after the initial scans and the scans after a test interruption) equals to several angstrom and is possibly connected with a random error of measurement of those values.

Variation of the VS curve in case of repeated scanings. The changes occurring in VS curves during repeated scanings of the protrusion, tell most fully on their form. The form of VS curves received in the mode without pauses after the first, 6th, 60th and 66th scans are presented in fig. 2, *a*. The values of the amplitude in different scans are normalized by the video signal corresponding to the bottom plateau of the trapeze. It is visible, that the sequence of scans leads to reduction of the amplitude of VS curve, and it is approximately identical on the sites of the curve, corresponding to the top base and the lateral walls. This feature remains after 140 scans. However, during scanning with pauses the character of the form variation of VS curve changes (see fig. 1, *b*). In this case each scanning provokes not a reduction, but an increase of the amplitude of VS curve, at that, it is nonuniform on the different sites of the protrusion profile. The amplitude change appears to be not only spatially nonuniform, but also nonmonotonic by time (by the number of a scan) in one point of the profile. In fig. 3 it is visible, that the amplitude of VS curve in the middle of the protrusion during the scanning of it with pauses, at first, increases, reaching the local maximum at the second scan, and then decreases to a minimum at the fourth scan. Such a character of a variation of the amplitude on the neighboring sites of the profile near to the top angles of the protrusion can change their width and D_u . This is proved by the correlation between the variation of the VS amplitude in the middle of the protrusion in fig. 3 and the change of the effective diameter D_u in fig. 2, *a*. It is visible, that in the first 10 scans the amplitudes D_d and D_u change in a correlated way not only in relation to each other, but also to the curve in fig. 3.

Discussion of the results

The given work demonstrated that systematic errors in measurement of the effective diameter of a beam can influence the estimation of the contaminated broadening of the protrusion. It presents experimental proof that such errors are absent in case of repeated scanings of the protrusion without pauses. That means that the geometrical profile of such protrusion remains practi-

cally invariable. In the mode of scanning with pauses the film deposition occurs mainly on the sites of the top base and the lateral walls near it, which causes distortion of the top part of the protrusion profile.

These conclusions were made as a result of fixation of variation of the values-registrars of the changes of the profile at the top and bottom bases of D_d and D_u (and, simultaneously, effective diameters) during the protrusion scanning. We should point out a curious and important feature of the variation of D_d and D_u in fig. 2, *b*: a one-time interruption of scanning for ~4 min. before scan № 60 (which was not interrupted during the rest of the time) led only to a brief variation of the specified values, not causing a steady increase of the diameter (like in case of scanning with multiple pauses). That means that scanning without a contamination is possible and even with pauses, but after a long uninterrupted period. During scanning with regular pauses, exceeding the time of a single scan, the contamination arises.

We should point out one more feature of the curves in fig. 2, *a* and *b*. It is visible, that the difference Δ between D_d and D_u exists even at the first scans (up to an appreciable contamination). Value of Δ in fig. 2, *a* reaches ~4 nm (the relative value is about 30 %). Also it is visible, that with an increase of the number of scans the difference Δ somewhat decreases at the beginning, but then grows and becomes equal to ~7 nm at scan No. 22 (over 40 % of the diameter value). This value of Δ considerably exceeds a random error of measurements, equal to units of angstrom. Within the framework of a model formation of SEM images [6] the difference must be absent and its presence testifies to imperfection of this model.

It turned out that the variation in time of VS amplitude in fig. 3 (measured on one of the sites of the protrusion profile) correlates with a temporary variation of the width of this protrusion (see fig. 2, *a*). That means that the nonmonotonic changes of the width are not a random error and they are determined not only by the protrusion contamination, which causes only an increase of the width. It is possible to explain these variations of the protrusion width and VS amplitude by a nonmonotonic change of the electric charge, which in its turn, changes emission of electrons from the near-surface layer of the protrusion. The induced charge can be formed during scanning in the layer of the natural oxide and in the layer of the contaminated film and be fixed in them for the period of a pause.

As one can see in fig. 1, *a*, the expected reduction of the emission is almost identical in various sites of the protrusion surface during scanning in the mode without pauses. Apparently, the induced negative charge in the near-surface layer increases, which leads to a smaller emission of the beam electrons. It is possible, that during a pause after 60 uninterrupted scans a full relaxation of this charge does not occur, and, as a result, a contamination of the protrusion also does not arise.

During scanning with pauses the emission of slow secondary electrons increases with every scan, nonuniformly on the protrusion profile. Apparently, a positive induced charge is formed, at the beginning — on the top of the protrusion base, then — on the lateral walls. Presumably, this charge leads to the deposition on the surface of the film, which acquires the same charge. A nonuniform accumulation of the charge on the top base and the lateral ledge surfaces leads to a nonuniform growth of the film.

Conclusion

The character of growth of the contaminated film on the protrusion surface depends on the scanning mode of SEM. It was experimentally proved that contamination was absent in sites at the top angles of the protrusion during its scanning in SEM at an uninterrupted mode with duration of several tens of scans. During scanning with pauses the film on the protrusion angles was deposited after every scan.

Presumably, the film deposition is caused or blocked by an electric charge induced in the film volume or in the layer of the natural oxide on a protrusion top (depending on the sign of the charge). In different modes of scanning the near-surface charges of different signs are formed. Charging of a contaminated film on the top base, apparently, causes its more active growth, both on this site and on the lateral walls near it.

References

1. Amman M., Sleight J. W., Lombardi D. R. Atomic force microscopy study of electron beam written contamination structures, *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 1996, no. 14 (1), pp. 54–64.
2. Gavrilenko V. P., Mit'ukhlyayev V. B., Rakov A. V. et al. Vliyaniye kontaminatsii v REM na profil rel'efnoi strukturi v nanometrovom diapazone, *Nano- I mikrosistemnaya tekhnika*, 2011, no. 2, pp. 2–6 (in Russian).
3. Gavrilenko V. P., Kuzin A. I., Mit'ukhlyayev V. B., Rakov A. V. et al. Trekhmernaya rekonstruktsiya rel'efnykh struktur po stereoizobrajeniyu v REM, *Izmeritel'naya tekhnika*, 2015, no. 3, pp. 15–17 (in Russian).
4. Larionov Yu. V. Zavisimost kontaminatsii rel'efnoyi strukturi ot regima scanirovaniya REM, *Nano- I mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 8, no. 8, pp. 467–471 (in Russian).
5. Larionov Yu. V. Izmerenie diametra puchka REM s pomosh'yu rel'efnoi strukturi. Vliyaniye kontaminatsii, *Poverkhnost'*, 2014, no. 11, pp. 51–60 (in Russian).
6. Novikov Yu. A., Rakov A. V., Stekolin I. Yu. // Mehanizmi vtorichnoi elektronnoi emissii rel'efnoi poverkhnosti tverdogo tela, *Trudi IOFAN*, 1998, vol. 55, pp. 109–122 (in Russian).
7. Larionov Yu. V. Otsenka diametra puchka REM po krivim videosignala ot trapetseidal'noi strukturi 1. Model'nii eksperiment, *Poverkhnost'*, 2016, no. 3, pp. 87–97 (in Russian).
8. Meri rel'efnie nanometrovogo diapazona iz monokristallicheskogo kremniya, Natsional'nii standart RF, *GOST R8.628.2007*, Moscow, Standatrinform, 2007 (in Russian).
9. Fillipov M. N., Gavrilenko V. P., Kuzin A. A., Rakov A. V. et al. Natural oxide thickness measurements on the test silicon relief pitch structure, *Proc. of SPIE*, 2012, vol. 8700, 8700U, pp. 1–6.
10. Programma obrabotki i analiza izobrazhenii mikroskopov, programnaya platforma NDPL. URL: <https://yadi.sk/i/YtOL8GEid9nK4>. 2009.

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

УДК 53.08

DOI: 10.17587/nmst.19.331-337

Е. Э. Гусев, аспирант, инженер, e-mail: bubbledouble@mail.ru, **А. А. Дедкова**, инженер, e-mail: my_name9999@mail.ru, **Н. А. Дюжев**, канд. физ.-мат. наук, директор, e-mail: djuzhev@unicm.ru, Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва, **А. С. Ковалёв**, канд. тех. наук, нач. лаб., АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург, **А. П. Онуфриенко**, начальник участка диффузии и осаждения слоев, e-mail: onufrienko@unicm.ru, АО "Зеленоградский нанотехнологический центр", Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА PECVD НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Поступила в редакцию 06.02.2017

Исследованы ключевые параметры пленки оксида кремния: скорость роста, механические напряжения и показатель преломления. Влияние операционных параметров на скорость роста пленки оценивалось по толщине пленки, которая определялась с помощью эллисометра. Механические напряжения рассчитывали по разработанной авторами ранее методике на основании изгиба пластины. Определены оптимальные операционные параметры для формирования пленок плазмохимического оксида кремния, позволяющие изготавливать малонапряженные структуры материала.

Ключевые слова: механические напряжения, плазмохимическое осаждение из газовой фазы, оксид кремния

Введение

Для электрической изоляции уровней металлизации используется слой оксида кремния. Эта пленка обеспечивает такие свойства, как хорошая адгезия и конформность, поэтому ее можно использовать как межслойный диэлектрик [1]. Механические напряжения в SiO₂ влияют на планарность поверхности. Проведение технологических операций реактивно-ионного травления и термообработки позволяет изменить поверхность пластины, сделав ее более ровной [2]. Однако, управляя механическими напряжениями в процессе формирования пленки, можно сократить число операций для подготовки поверхности с требуемым рельефом. Для достижения результирующего значения механических напряжений, стремящихся к нулю, можно провести операцию осаждения пленки с напряжениями сжатия на образец с растягивающими напряжениями (с лицевой стороны). В некоторых случаях операция пассивации поверхности на лицевой стороне пластины связана с технологическими сложностями либо отсутствует материал с необходимым знаком напряжений. Один из способов решения проблемы — осаждение слоя на обратную сторону образца.

Для получения пленок SiO₂ используются разные методы:

- термическое окисление кремния в атмосфере кислорода при атмосферном давлении;
- термическое окисление кремния в парах деионизованной воды при атмосферном и повышенном давлении;
- химическое осаждение из газовой фазы при пониженном давлении (LPCVD);
- плазмохимическое осаждение из газовой фазы (PECVD).

Для осаждения диоксида кремния обычно используется реакция силана с закисью азота в плазме [1, 3, 4]:



При осаждении необходимо очень тщательно контролировать многие параметры процесса: частоту и мощность разряда, общее давление газовой смеси и парциальное давление реагентов, температуру подложки и скорость откачки, а также оптимизировать геометрию реактора и внимательно подбирать материал электродов. Следует отметить, что от конструкции реактора сильно зависят параметры процесса, так что режим осаждения должен подбираться для каждого реактора индивидуально, что затрудняет сравнение свойств пленок, полу-

ченных на различных реакторах [3]. Однако тенденция зависимостей должна быть идентичной, что и будет представлено в данной работе.

Целью работы было оптимизировать операционные параметры технологического процесса для PECVD оксида кремния, получаемого на установке Novellus, для формирования малонапряженной пленки материала.

Эксперимент

Пленки плазмохимического оксида кремния SiO_2 получали методом стимулированного плазмой химического осаждения из газовой фазы (PECVD), из газовой смеси закиси азота N_2O , азота N_2 и моносилана SiH_4 на установке Novellus. Закись азота препятствует зародышеобразованию в газовой фазе, что повышает чистоту осаждаемой пленки. Во всех экспериментах температура осаждения составляла 350°C . В работе использовался ВЧ генератор частотой 13,57 МГц с максимальной мощностью 5 кВт.

При проведении процессов варьировались мощность разряда в плазме (400...1450 Вт), давление в реакционной камере (1000...3000 мТорр), расход силана SiH_4 (100...400 $\text{см}^3/\text{мин}$), расход закиси азота N_2O (3000...12 000 $\text{см}^3/\text{мин}$), расход азота N_2 (0...3000 $\text{см}^3/\text{мин}$), общий расход газов (5650...13 560 $\text{см}^3/\text{мин}$), время осаждения (50...300 с).

Осаждение проводили на лицевую сторону кремниевых пластин КДБ12(100), диаметром 150 мм и толщиной 670 мкм. Толщины осажденных пленок и показатель преломления определяли с помощью эллипсометра Horiba Auto SE. Ранее авторами были разработаны методики измерения механических напряжений σ с помощью профилометра [5] и с использованием растрового электронного микроскопа [6]. В данной работе использовался метод контроля по изгибу пластины посредством оптического профилометра Veeco Wyko NT9300. Методика включает в себя программу, реализующую алгоритм анализа рельефа для вычисления радиуса кривизны поверхности в локальной области [7]. Значения радиусов кривизны поверхности подставляются в формулу Стони для вычисления величины σ . В графиках для каждого случая использовалось среднее арифметическое значение σ по всей пластине.

Авторами проводилось исследование скорости осаждения пленки, показателя преломления, механических напряжений σ осаждаемой пленки путем изменения операционных параметров процесса.

Исследование влияния мощности разряда в плазме

Вначале было исследовано влияние мощности разряда в плазме на параметры осаждаемой пленки. Мощность изменяли от 400 до 1450 Вт при давлении в реакционной камере 2400 мТорр, расходах силана SiH_4 300 $\text{см}^3/\text{мин}$, закиси азота N_2O 9500 $\text{см}^3/\text{мин}$, азота N_2 1500 $\text{см}^3/\text{мин}$, времени осаждения 100 с и температуре подложки 350°C .

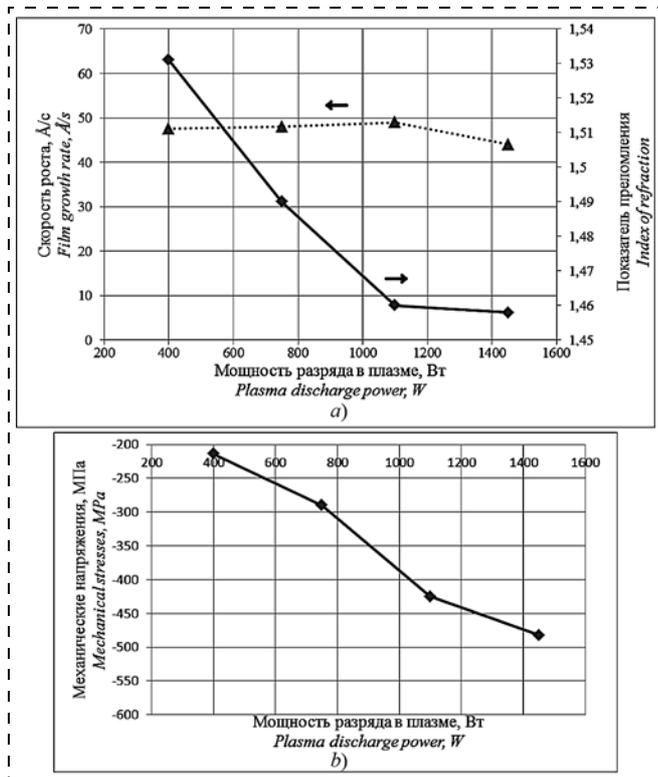


Рис. 1. Зависимость характеристик пленки от мощности плазмы: а — скорость роста пленки (пунктирная кривая) и показатель преломления; б — механические напряжения

Fig. 1. Dependence of characteristics of film from plasma power: a — film growth rate (dotted curve) and index of refraction; b — mechanical stresses

Из рис. 1, а видно, что изменение мощности разряда в плазме не оказывает существенного влияния на скорость роста пленки (пунктирная кривая). Показатель преломления уменьшается при увеличении мощности плазмы и достигает значения 1,46 при мощности плазмы 1100 Вт. Это свидетельствует о том, что при значениях мощности менее 1100 Вт пленка получается нестехиометрической из-за неполного окисления силана SiH_4 и ее насыщения связями Si—H. Из рис. 1, б можно сделать вывод, что с увеличением мощности плазмы механическое напряжение сжатия пленки σ по модулю возрастает. Эта зависимость имеет линейный характер.

Исследование влияния давления в реакционной камере

Далее было проведено исследование влияния давления в реакционной камере на параметры пленки. Давление изменяли от 1000 до 3000 мТорр, мощность плазмы — 1100 Вт. Остальные параметры процесса остались прежними.

Из рис. 2 видно, что изменение давления оказывает большое влияние на скорость осаждения, показатель преломления и механические напряжения осаждаемой пленки. С ростом давления увеличивается скорость роста пленки (пунктирная кривая), достигая максимума при давлении 2400 мТорр. Зависимость показателя преломления от давления

аналогична зависимости показателя преломления от мощности плазмы: при повышении давления показатель преломления плавно уменьшается с 1,55 до 1,46. Следовательно, при значениях давления менее 2400 мТорр происходит неполное окисление силана SiH_4 и насыщение осаждаемой пленки связями $\text{Si}-\text{H}$, что аналогично при осаждении при низкой мощности разряда в плазме.

Значение механических напряжений (по модулю) возрастает с увеличением давления в камере. Можно предположить, что повышение давления в камере приводит к увеличению вероятности столкновения реагентов в камере с подложкой с некоторой энергией. Причем величина энергии будет достаточна для проведения химической реакции, следовательно, на выходе пленка формируется за меньшее время (возрастает скорость осаждения), но более напряженная.

Исследование влияния скорости расхода силана SiH_4

Было проведено исследование влияния скорости расхода силана SiH_4 (рис. 3). Скорость расхода менялась от 100 до 400 $\text{см}^3/\text{мин}$, давление в реакционной камере было постоянным 2400 мТорр, мощность плазмы — 1100 Вт. Остальные параметры процесса остались прежними.

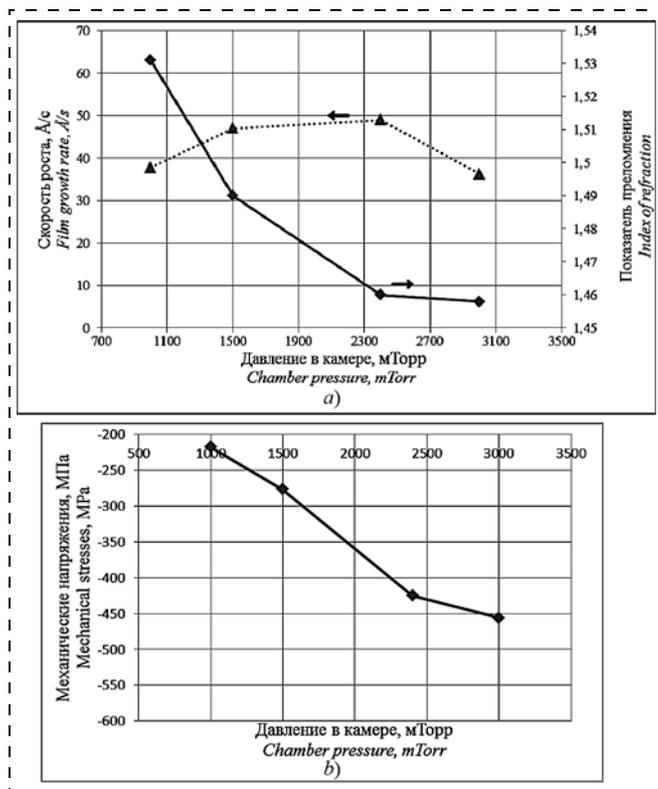


Рис. 2. Зависимость характеристик пленки от давления в камере: *a* — скорость роста (пунктирная кривая) и показатель преломления; *b* — зависимость механических напряжений
 Fig. 2. Dependence of film characteristics from pressure in chamber: *a* — film growth rate (dotted curve) and index of refraction; *b* — mechanical stresses

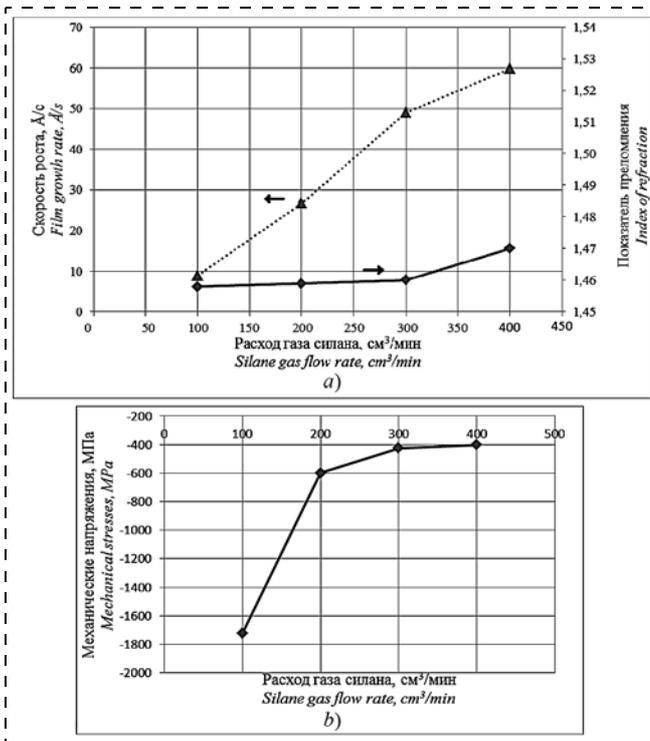


Рис. 3. Зависимость характеристик пленки от скорости расхода силана SiH_4 : *a* — зависимости скорости роста пленки (пунктирная кривая) и показателя преломления; *b* — зависимость механических напряжений
 Fig. 3. Dependence of characteristics of film from silane flow rate: *a* — film growth rate (dotted curve) and index of refraction; *b* — mechanical stresses

Из рис. 3, *a* можно заключить, что скорость роста пленки (пунктирная линия) прямо пропорциональна скорости расхода силана. Однако при расходах силана более 300 $\text{см}^3/\text{мин}$ начинает увеличиваться показатель преломления (сплошная линия). Это свидетельствует о неполном окислении силана в осаждаемой пленке. На рис. 3, *b* заметно, что при уменьшении расхода силана осаждаемая пленка становится более сжатой, причем значение напряжений резко увеличивается при расходах силана менее 200 $\text{см}^3/\text{мин}$.

Исследование влияния соотношения расходов газов $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$

Следующим шагом было проведено исследование влияния соотношения расходов газов R азота и силана ($\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$). Соотношение R менялось от 10 до 40, расход N_2O менялся от 3000 до 12 000 $\text{см}^3/\text{мин}$ при постоянном расходе SiH_4 300 $\text{см}^3/\text{мин}$.

На рис. 4, *a* продемонстрировано, что на скорость осаждения и показатель преломления соотношение расходов газов R влияет незначительно. При значениях R менее 25 наблюдается повышение показателя преломления, что свидетельствует о формировании пленки, обогащенной кремнием. В работе [8] Hussein и др. зафиксировали аналогичную зависимость показателя преломления от соотношения расхода газов. Результаты, представ-

ленные на рис. 4, *b*, хорошо согласуются с данными в работах [9, 10], где величина механических напряжений по модулю возрастает с увеличением R . На рис. 4, *c* заметно, что соотношение расходов газов R оказывает влияние на равномерность распределения толщины пленки по пластине. При значениях R менее 25 среднее квадратичное отклонение толщины пленки оказывается больше 3 % и резко увеличивается до 11 % при значении $R = 10$.

Исследование влияния скорости расхода азота N_2

Было проведено исследование зависимости параметров осаждаемой пленки от скорости расхода азота N_2 . Расход азота меняли от 0 до 3000 $см^3/мин$.

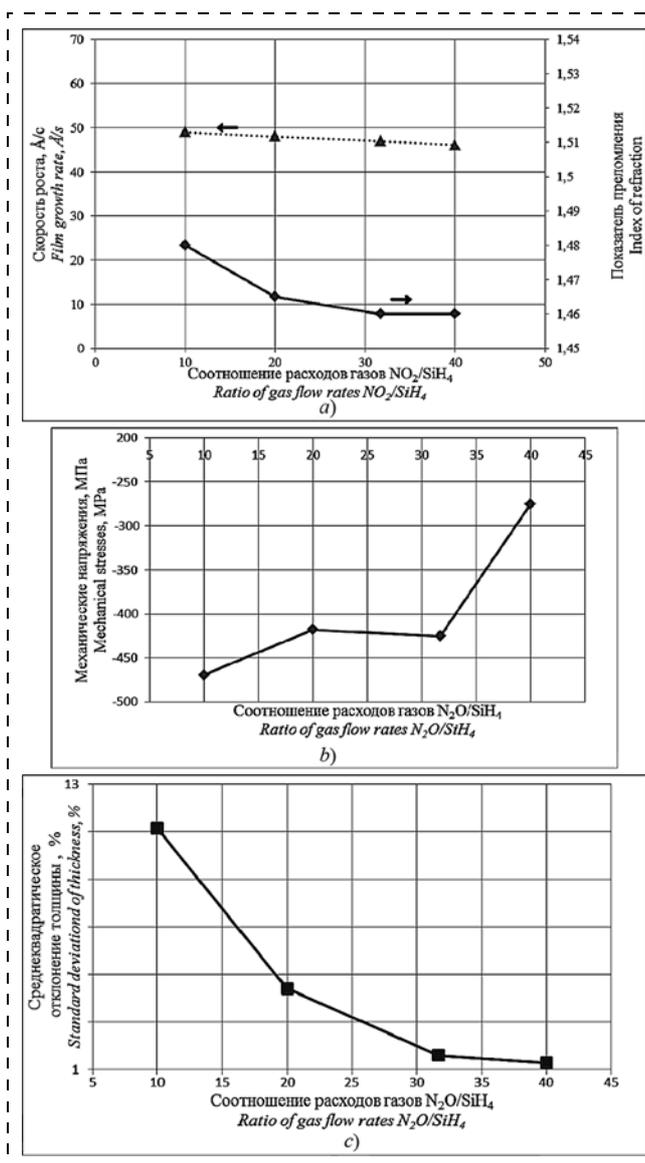


Рис. 4. Зависимость характеристик пленки от соотношения расходов газов N_2O/SiH_4 : *a* — зависимости скорости роста пленки (пунктирная линия) и показателя преломления; *b* — зависимость механических напряжений; *c* — зависимость среднее квадратичного отклонения толщины пленки

Fig. 4. Dependence of characteristics of film from ratio of gas flow rates N_2O/SiH_4 : *a* — film growth rate (dotted curve) and index of refraction; *b* — mechanical stresses; *c* — standard deviation of film thickness

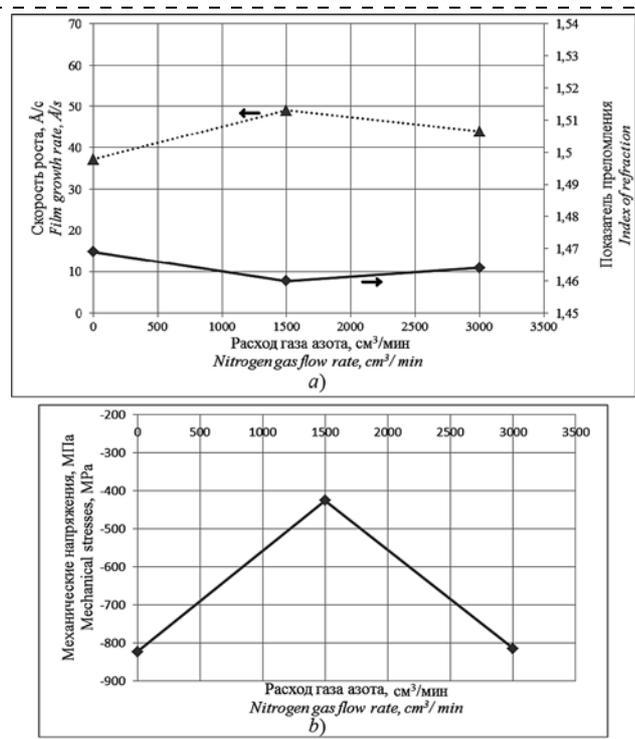


Рис. 5. Зависимость характеристик пленки от расхода азота: *a* — зависимости скорости роста пленки (пунктирная линия) и показателя преломления; *b* — зависимость механических напряжений

Все остальные параметры процесса оставались без изменений.

На рис. 5, *a* видно, что расход азота N_2 оказывает незначительное влияние на такие параметры осаждаемой пленки, как скорость осаждения, показатель преломления. Из рис. 5, *b* можно заключить, что оптимальное значение расхода азота составляет 1500 $см^3/мин$.

Заключение

В процессе формирования мембран по групповой кремниевой технологии используются несколько слоев диэлектрических материалов. Контролируя механические напряжения в каждой пленке мембраны, можно повысить вероятность выхода годных кристаллов. В данной работе экспериментально показано влияние операционных параметров осаждения на скорость роста пленки SiO_2 , показатель преломления и механические напряжения. Определены оптимальные параметры для формирования пленки PECVD SiO_2 на установке Novellus, позволяющие создать малонапряженную структуру материала: мощность разряда в плазме 400 Вт, давление в камере 1500 мТорр, соотношение расхода газов закиси азота и силана 40, расход газа азота 1500 $см^3/мин$.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по договору № 02.G25.31.0200 от 27 апреля 2016 года, шифр договора 2015-218-07-052.

Список литературы

1. Рубцевич И. И., Соловьев Я. А., Высоцкий В. Б. и др. Исследование свойств пленок нитрида и оксида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения на кремниевую подложку // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2011. № 4. С. 29–32.

2. Дюжев Н. А., Махиборода М. А., Гусев Е. Э., Катеев М. В. Формирование планарной поверхности пластин для проведения технологических операций контактной литографии и бондинга // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 1. С. 30–33. DOI: 10.17587/nmst.19.30-33

3. Королёв М. А., Крупкина Т. Ю., Ревелева М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. М.: БИНОМ, 2007. Часть 1. 397 с.

4. Pi C.-H. and Turner K. T. Design, analysis and characterization stress-engineered 3D microstructures comprised of PECVD silicon oxide and nitride // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2016. Vol. 26, N. 6. DOI:10.1088/0960-1317/26/6/065010

5. Дюжев Н. А., Дедкова А. А., Гусев Е. Э., Новак А. В. Методика измерения механических напряжений в тонких пленках на пластине с помощью оптического профилометра // Известия вузов. Электроника. 2016. № 4. С. 367–372.

6. Djuzhev N. A., Gusev E. E., Dedkova A. A., Patiukov N. Determination of mechanical stress in the silicon nitride films with a scanning electron microscope // Proceedings SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016. DOI: 10.1117/12.2250118.

7. Дюжев Н. А., Гусев Е. Э., Дедкова А. А., Чиненков М. Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611518. Программа анализа рельефа с целью расчета величины кривизны поверхности в выбранном направлении на кремниевой пластине. Действует с 04.02.2016.

8. Hussein M. G., Worhoff K., Sengo G., Driessen A. Optimization of plasma-enhanced chemical vapor deposition silicon oxynitride layers for integrated optics applications // Thin Solid Films. 2007. Vol. 515. P. 3779–3786.

9. Mackenzie K. D., Johnson D. J., DeVre M. W. et. al. Stress control of Si-based PECVD dielectrics // Proc. Symp. Silicon Nitride and Silicon Dioxide Thin Insulating Films & Other Emerging Dielectrics VIII. 2005. P. 148–159, Electrochemical Society, Pennington, NJ (2005).

10. Ануфриев Л., Ковальчук Н., Ланин В. Совершенствование технологии мембранных МЭМС // Компоненты и технологии, 2013. Вып. 6 (143).

E. E. Gusev, Postgraduate Student, Engineer, bubbledouble@mail.ru, **A. A. Dedkova**, Engineer, my_name9999@mail.ru, **N. A. Djuzhev**, Ph. D., Director, djuzhev@unicm.ru, National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow, **A. S. Kovalev**, Ph. D., Head of Laboratory, JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, **A. P. Onufrienko**, Section chief of diffusion and deposition of layers, onufrienko@unicm.ru, JSC "Zelenograd Nanotechnology Center", Moscow

Corresponding author:

Gusev Evgeniy E., Postgraduate Student, Engineer, National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow, 124498, Russian Federation, e-mail: bubbledouble@mail.ru

Research of the Influence of the Operational Parameters of PECVD Process on Characteristics of Silicon Dioxide Films

*Received on February 6, 2017
Accepted on February 20, 2017*

The authors investigated the key parameters of the silicon oxide films: growth rate, mechanical stresses and refraction index. The influence of the operational parameters on the growth rate of a film was estimated by the thickness of the film, which was determined with help of an ellipsometer. The mechanical stresses were calculated by the method developed earlier by the authors and based on a plate bend. The optimal operational parameters were determined for formation of the films of plasma-chemical silicon oxide, allowing one to manufacture the understressed material structures.

Keywords: mechanical stresses, plasma enhanced chemical vapor deposition, silicon oxide

For citation:

Gusev E. E., Dedkova A. A., Djuzhev N. A. Research of the Influence of the Operational Parameters of PECVD Process on the Characteristics of Silicon Dioxide Films, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 331–337.

DOI: 10.17587/nmst.19.331-337

Introduction

For electric insulation of the metallization levels a layer of silicon oxide is used. It ensures good adhesion and conformity, therefore, it can be used as an interlaminar dielectric [1]. Mechanical stresses in SiO₂ influence the planar character of a surface. Technological operations of reactive-ionic etching and heat treatment allow us to change a plate surface and make it more even [2]. However, control of the mechanical stresses during a film formation makes it possible to reduce the

number of operations for preparation of a surface with the demanded relief. For achievement of the mechanical stresses aspiring to zero, it is possible to implement a deposition of a film with a compression stress on a sample with the stretching stresses (on the face side). In some cases a surface passivation on a plate's face is connected with technological difficulties or absence of a material with the necessary sign of stresses. One of the ways to solve the problem is to deposit a layer on the reverse side of a sample.

For obtaining of SiO₂ films different methods are used:

- thermal oxidation of the silicon in the oxygen atmosphere at the atmospheric pressure;
- thermal oxidation of the silicon in the vapors of deionized water at the atmospheric or higher pressure;
- chemical deposition from a gas phase at a lower pressure (LPCVD);
- plasma-chemical deposition from a gas phase (PECVD).

Usually for deposition of the silicon dioxide a reaction of silane with nitrogen monoxide in plasma [1, 3, 4] is used:



It is necessary to control carefully many parameters of the process: frequency and power of a discharge, total pressure of a gas mix and partial pressure of the reagents, temperature of a substrate and speed of pumping out, and also to optimize the geometry of a reactor and select carefully a material for the electrodes. It is necessary to point out that the process parameters depend on a reactor design, so, the deposition mode should be selected for each reactor individually, which complicates comparison of the films received in various reactors [3]. However, the trend of the dependences should be identical, as it is presented in the given work.

The aim of the work was to optimize the operational parameters of the technological process for PECVD of silicon oxide received on Novellus installation, for formation of an understressed film of a material.

Experiment

The films of the plasma-chemical silicon oxide were received by the method of the plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD), from a mix of nitrogen monoxide N₂O, nitrogen N₂ and monosilane SiH₄ on Novellus installation. N₂O prevents nucleation in the gas phase, which improves cleanliness of a deposited film. In the experiments the deposition temperature was 350 °C. In the work a high frequency generator was used with frequency of 13.57 MHz and maximal power of 5 kW.

The power of the discharge in plasma varied (400...1450 W), just like the pressure in the reactionary chamber (1000...3000 mTorr), the consumption of SiH₄ (100...400 cm³/min), N₂O (3000...12 000), N₂ (0...3000 cm³/min), total consumption of gases (5650...13 560 cm³/min), and deposition time (50...300 s).

The deposition was done on the face side of SHB12(100) silicon plates with diameter of 150 mm and thickness of 670 μm. The thickness of the deposited films and the refraction index were determined with the help of Horiba Auto SE ellipsometer. Earlier the authors developed techniques for measurement of the mechanical stresses σ with the help of a profilometer [5] and use of a scanning electron microscope [6]. In their work the authors used a method of a plate bend control by means of optical Veeco Wyko NT9300 profilometer. The method included a program realizing an algorithm for analysis of a relief and calculation of the radius of curvature of the

surface in a local area [7]. The values of the surface curvature radiuses were used in the Stoney formula for calculation of σ. In the diagrams for each case the arithmetic mean value of σ was used for the whole of the plate.

The authors carried out a research of speed of a film deposition (film growth rate), refraction index and mechanical stresses σ of the deposited film by changing the operational parameters of the process.

Research of the influence of the power of a discharge in plasma

First, the influence of the power of discharge in plasma on the parameters of a deposited film was investigated. The power was varied from 400 up to 1450 W in a reactionary chamber: pressure — 2400 mTorr, consumption of SiH₄ — 300 cm³/min, of N₂O — 9500 cm³/min, of N₂ — 1500 cm³/min, time of deposition — 100 s and substrate temperature of 350 °C.

In fig. 1, *a* it is visible, that a change of power of discharge in plasma does not render an essential influence on the growth rate of a film (dotted curve). The refraction index decreases with an increase of the power of plasma and reaches 1.46 at the level of plasma power of 1100 W.

This testifies to the fact that at a power less than 1100 W a film turns out to be nonstoichiometric because of an incomplete oxidation of the silane and its saturation by Si—H bonds. From fig. 1, *b* it is possible to draw a conclusion, that with an increase of the power of plasma the mechanical stresses of a film compression σ by modulus increases. This dependence has a linear character.

Research of the influence of pressure in the reactionary chamber

Then a research was done in the reactionary chamber of the influence of pressure on the film parameters. The pressure was varied from 1000 up to 3000 mTorr, the power of plasma was 1100 W. The other parameters of the process remained unchanged.

In fig. 2 it is visible, that a change of pressure has the biggest impact on the speed of deposition, the refraction index and the mechanical stresses of the deposited film. With increasing of pressure the film's growth rate also increases (dotted curve), reaching the maximal level at 2400 mTorr. Dependence of the refraction index on pressure is similar to the dependence of the refraction index on the power of plasma: with an increase of pressure the refraction index smoothly decreases from 1.55 down to 1.46. Hence, at the values of pressure less than 2400 mTorr we have an incomplete oxidation of SiH₄ and saturation of the deposited film by Si—H bonds, similar to those of deposition at a low power of discharge in plasma.

The values of the mechanical stresses (by modulus) increases with a pressure increase in the chamber. It is possible to assume, that a pressure increase leads to a higher probability of collision of the reagents in the chamber with a substrate with certain energy. At that, the energy would be sufficient for a chemical reaction,

hence, as a result, a film is formed during a shorter period of time (the speed of deposition increases), but it comes out more intense.

Research of the influence of the speed of consumption of the silane

A research of the influence of the speed of consumption of silane (fig. 3) was carried out. The speed of consumption varied from 100 up to 400 cm³/min, the pressure in the reactionary chamber was constant (2400 mTorr), the power of plasma — 1100 W. The other parameters of the process remained the same.

From fig. 3, *a* it is possible to conclude, that films' speed of growth (dotted line) is directly proportional to the speed of consumption of the silane. However, when consumption of the silane exceeds 300 cm³/min, the refraction index (continuous line) begins to increase. This testifies to an incomplete oxidation of the silane in the deposited film. In fig. 3, *b* it is visible, that, when the consumption of the silane is smaller, the deposited film becomes more compressed, at that, the value of the stresses increases sharply, when consumption of the silane is below 200 cm³/min.

Research of the influence of correlation of consumption of N₂O/SiH₄ gases

The next step is the research of the influence of correlation of consumption of gases *R* of nitrogen monoxide and silane (N₂O/SiH₄). The correlation *R* varied from 10 up to 40, the consumption of N₂O varied from 3000 up to 12 000 cm³/min at the constant consumption of SiH₄ of 300 cm³/min.

Fig. 4, *a* demonstrates that the influence of the consumption of gases *R* on the speed of deposition and the refraction index is negligible. At *R* less than 25 we witness higher refraction index, which testifies to formation of a film, enriched by silicon. In [8] a similar dependence of the refraction index on the correlation of the consumption of gases is recorded. Results of fig. 4, *b* agree well with the data of [9, 10], where the value of the mechanical stresses by modulus increase alongside with the increase of *R*. In fig. 4, *c* one can see, that the correlation of the consumption of gases *R* influences the uniformity of distribution of the film's thickness on a plate. At *R* less than 25 the standard deviation of the film's thickness is more than 3 % and it increases sharply up to 11 % at *R* = 10.

Research of the influence of the speed of consumption of nitrogen

A research of the dependence of the parameters of a deposited film on the speed of the consumption of nitrogen was carried out. The consumption of nitrogen was changed from 0 up to 3000 cm³/min. All the other parameters remained without changes.

In fig. 5, *a* it is visible, that the consumption of nitrogen has an insignificant impact on such parameters of a deposited film, as the speed of deposition and the refraction index. From fig. 5, *b* it is possible to con-

clude, that the optimal value of the consumption of nitrogen is 1500 cm³/min.

Conclusion

In the process of formation of the membranes by a group silicon technology several layers of the dielectric materials are used. By controlling the mechanical stresses in each film of a membrane it is possible to improve likelihood yield crystals. This work demonstrated experimentally the influence of deposition parameters on the growth rate of SiO₂ film, refraction index and mechanical stresses. The optimal parameters were determined for formation of PECVD of SiO₂ film on Novellus installation, allowing us to create an understressed structure of a material: the power of a discharge in plasma — 400 W, the pressure in the chamber — 1500 mTorr, the correlation of the consumption of nitrogen monoxide and silane — 40, the consumption of nitrogen — 1500 cm³/min.

The work was done with support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the contract № 02.G25.31.0200 of April, 27th, 2016, the code number of the contract: 2015-218-07-052.

References

1. Rubcevich I. I., Solov'ev Ja. A., Vysockij V. B. i dr. Issledovanie svojstv plenok nitrida i oksida kremnija, poluchennyh metodom plazmohimicheskogo osazhdenija na kremnievuj podlozhku, *Tehnologija i konstruirovanie v jelektronnoj apparature*, 2011, no. 4, pp. 29–32 (in Russian).
2. Djuzhev N. A., Makhiborda M. A., Gusev E. E., Kakteev M. V. Formation of Plates' Planar Surfaces for Carrying out of the Technological Operations of Contact Lithography and Bonding, *Nano- i Mikrosistemnaya Tehnika*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 30–33, DOI: 10.17587/nmst.19.30-33 (in Russian).
3. Koroljov M. A., Krupkina T. Ju., Reveleva M. A. *Tehnologija, konstrukcii i metody modelirovanija kremnievyh intergal'nyh mikroshem*. Moscow, BINOM, 2007, chast; 1, 397 p. (in Russian).
4. Pi C.-H. and Turner K. T. Design, analysis and characterization stress-engineered 3D microstructures comprised of PECVD silicon oxide and nitride, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, vol. 26, no. 6, DOI:10.1088/0960-1317/26/6/065010
5. Djuzhev N. A., Dedkova A. A., Gusev E. E., Novak A. V. Metodika izmerenija mehanicheskikh naprazhenij v tonkih pljontkah na plastine s pomoshh'ju opticheskogo profilometra, *Izvestija Vuzov. Jelektronika*, 2016, no. 4, pp. 367–372 (in Russian).
6. Djuzhev N. A., Gusev E. E., Dedkova A. A., Patiukov N. Determination of mechanical stress in the silicon nitride films with a scanning electron microscope, *Proceedings SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016*, DOI:10.1117/12.2250118.
7. Djuzhev N. A., Gusev E. E., Dedkova A. A., Chinenkov M. Ju. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2016611518. Programma analiza rel'efa s cel'ju rascheta velichiny krivizny poverhnosti v vybrannom napravlenii na kremnievoj plastine. Dejstvuet s 04.02.2016 (in Russian).
8. Hussein M. G., Worhoff K., Sengo G., Driessen A. Optimization of plasma-enhanced chemical vapor deposition silicon oxynitride layers for integrated optics applications, *Thin Solid Films*, 2007, vol. 515, pp. 3779–3786.
9. Mackenzie K. D., Johnson D. J., DeVre M. W. et. al. Stress control of Si-based PECVD dielectrics, *Proc. Symp. Silicon Nitride and Silicon Dioxide Thin Insulating Films & Other Emerging Dielectrics VIII*, 2005, pp. 148–159, Electrochemical Society, Pennington, NJ (2005).
10. Anufriev L., Koval'chuk N., Lanin V. Sovershenstvovanie tehnologii membrannyh MJeMS, *Komponenty i tehnologii*, 2013, is. 6 (143) (in Russian).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.38

DOI: 10.17587/nmst.19.338-352

А. Л. Деспотули, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru,
А. В. Андреева, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. профессор, e-mail: andreeva@ipmt-hpm.ac.ru,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии
микроэлектроники и особочистых материалов Российской Академии наук (ИПТМ РАН)

РАЗМЕРНЫЕ ФАКТОРЫ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ НАНОИОНИКИ

Поступила в редакцию 16.02.2017

Ставится проблема распространения положений нелинейной динамики на структурно-динамический подход (СДП) наноионики. Дано качественное объяснение размерного фактора, обнаруженного нами ранее в вычислительных экспериментах для реалистичных по геометрии моделей наноструктур с ионной проводимостью. Знание размерного фактора важно, так как позволяет использовать на наномасштабе понятие "эффективное однородное поле" и приближение однородного электростатического поля Гаусса. Показано, что r_i — размерный фактор, который определяется малостью среднего расстояния r_i между ионами подвижного сорта в материалах с прыжковой проводимостью. Полученный результат сформулирован в СДП как теорема взаимности для избыточных зарядов и полевых добавок к высотам потенциальных барьеров. Установлено, что объекты наноионики следует рассматривать как динамические нелинейные системы, у которых основные параметры зависят от внешнего воздействия. Показано, что нелинейность уравнений СДП проявляется в некоммутативности операторов генератора тока.

Ключевые слова: наноионика, структурно-динамический подход, эффективное однородное электростатическое поле, размерный фактор, твердые электролиты, нелинейные процессы, компьютерное моделирование

Введение

На протяжении почти 15 лет журнал "Нано-и микросистемная техника" (НМСТ) публикует систематические исследования авторов в области теоретической и прикладной наноионики — науки, термин и концепция которой впервые были введены в России в 1992 г. [1]. Предмет наноионики — быстрый ионный транспорт (БИТ) на наномасштабе (<https://en.wikipedia.org/wiki/Nanoionics>). По публикациям в журнале, например [2–7], можно проследить основные направления развития наноионики в нашей стране за прошедшие годы. Полученные авторами результаты в области основ наноионики отвечают потребностям развития наноэлектроники (глубоко субвольтовая наноэлектроника [4, 8–10]), микросистемной техники (эффективные автономные гибридные источники энергии и мощности для питания микророботов и узлов беспроводных сенсорных сетей [3]) и других критических и прорывных технологий [11]. В их

число входят космическая техника и радиационно-стойкая электроника [12, 13].

В настоящее время наноионика признана в мире, термин "наноионика" широко используют в научной литературе, с ним ассоциируют расширяющийся круг новых понятий. В новом университетском учебнике по ионике твердого тела [14] впервые появилась отдельная глава 10 "Nanoionics" и указан приоритет ИПТМ РАН на приборы с БИТ на наномасштабе ("nanoionic devices" [15]). С наноионикой связывают создание нового типа высокоплотной энергонезависимой перезаписываемой матричной резистивной памяти (RRAM-resistive random access memory) для наноэлектроники. Интегрированная с логикой высокоплотная RRAM (memristor-based memory networks) [16] рассматривается как материальная основа искусственного интеллекта [17]. Пример пересечения прикладной наноионики и наноэлектроники (микросистемной техники) дают импульсные суперконденсаторы микронных размеров с рекордно высокой плотностью заряда и энергии на когерентных поляризуе-

мых гетеропереходах электронный проводник/твердотельный ионный проводник [3, 18—20]. Формируемые на обратной стороне панелей солнечных элементов импульсные пленочные суперконденсаторы с БИТ могут улучшить энергоэффективные характеристики силовых блоков космических аппаратов.

Несмотря на важность наноионных импульсных приборов с БИТ, их разработка на современном уровне (т. е. с использованием методов численного моделирования) в настоящее время невозможна. Причиной является проблема отсутствия базовой (общепринятой) теории прыжкового ионного транспорта на наномасштабе. Поэтому данные измерений и диагностики, несущие информацию о механизмах ион-транспортных процессов и степени атомарного совершенства гетеропереходов с БИТ (например, данные импедансной спектроскопии [21]), не могут быть интерпретированы однозначно и, более того, ведут к противоречивым выводам о перспективах создания наноионных приборов для новой элементной базы наноэлектроники и нано(микро)системной техники.

В целях решения проблемы в ИПТМ РАН была сформулирована и выполняется программа по созданию теоретических средств описания динамического поведения модельных наноструктур на основе твердых электролитов (ТЭ), т. е. твердых веществ с зонной структурой диэлектриков, в которых прыжковая ионная проводимость может в 10^{10} и более раз превышать электронную проводимость [3, 18]. Выполнение программы потребовало разработки физических моделей, поиска методов, алгоритмов и вычислительных схем. В результате была создана теоретическая система "*структурно-динамический подход наноионики*" (СДП) [5—7, 22, 23], что позволило проводить вычислительные эксперименты и описывать взаимосвязь между прыжковым ионным транспортом, диэлектрической поляризацией и диссипацией энергии в модельных ТЭ-наноструктурах при малых отклонениях от равновесия. Характерная черта СДП — представление модельной наноструктуры неоднородным на наномасштабе потенциальным рельефом, в котором под действием слабого внешнего электрического воздействия по прыжковому механизму передвигаются подвижные ионы.

Вычислительные эксперименты показали прогностическую эффективность СДП. Впервые были выявлены физические основы появления универсального динамического отклика (закон А. К. Джоншера [24]) $\text{Re}\sigma^* \propto \omega^n$ ($n \approx < 1$) в ТЭ-наноструктурах, т. е. действительная часть комплексной проводимости $\text{Re}\sigma^*$ является степенной функцией частоты ω внешнего воздействия [22, 25]. В материаловедении твердотельных ионных проводников экспериментальные данные всегда про-

веряют на соответствие с законом Джоншера. Однако общепринятой теории динамического отклика не было.

СДП по-новому ставит проблему описания динамического отклика ТЭ-наносистем, вводя новую величину — ток смещения Максвелла на потенциальном барьере [22, 25]. Показано, что с увеличением частоты внешнего воздействия ω в образцах с неоднородным потенциальным рельефом не исчезают области, в которых токи ионной проводимости и токи смещения Максвелла на барьерах имеют сопоставимые значения. Это приводит к примерно постоянному углу сдвига фаз между током и напряжением на электродах образца. Полученный результат объясняет методологию импедансной спектроскопии, использующей понятие "элемент с постоянным сдвигом фаз" [26]. Такие "элементы" (с неизвестным физическим содержанием) включают формально в эквивалентные электрические схемы для подгонки их динамического отклика к экспериментальным данным частотного поведения ТЭ-образцов.

В недавних работах [7, 23] методом численного моделирования была обоснована правомерность применения в СДП понятия "однородное эффективное электростатическое поле" ($F_{\text{эфф}}$) на наномасштабе, хотя индуцированные слабым внешним воздействием точечные заряды создают в ТЭ-наноструктуре сильно неоднородные электрические поля. Вычислительные эксперименты [7, 23], выполненные для реалистичных по геометрии распределения зарядов и потенциальных барьеров моделей, показали возможность использовать приближение однородного электростатического поля Гаусса (F_G) при расчетах ион-транспортных процессов в наноструктурах протяженностью более $\sim 3...4$ нм (размерный фактор).

Долговременная цель проводимых в ИПТМ РАН исследований — расширение границ наноионики в новых направлениях и определение перспектив создания новых высокофункциональных твердотельных ионных материалов и импульсных приборов для наноэлектроники и микросистемной техники. Сильная нестационарность процессов, протекающих в импульсных приборах, предполагает включение в теорию БИТ токов смещения Максвелла и описание отклика ТЭ-наноструктур в терминах нелинейной динамики. Идеи, методы, подходы и результаты нелинейной динамики (раздел современной теории колебаний и волн [27]) уже в течение нескольких десятилетий активно используют во многих дисциплинах, усиливая междисциплинарные тенденции в науке. Однако нелинейная динамика оказала слабое влияние на развитие ионики твердого тела, что кумулятивно отражает содержание университетских учебников [14]. Сложившееся положение может быть скорректиро-

вано путем инициирования ряда исследовательских программ по направлению "динамическая нелинейная ионика". Центральное место в этих программах должны занять проекты, посвященные выдвижению, разработке и верификации теоретических моделей, учитывающих в явном виде плотность локальных токов смещения Максвелла $I_D = \partial D/\partial t$.

Цель настоящей работы — представить первые результаты по исследованию основных нелинейных свойств решений уравнений СДП и выявить физическую сущность размерного эффекта, установленного в работах [7, 23] методом численного моделирования.

Основы и проявление нелинейности в структурно-динамическом подходе (СДП) наноионики

СДП включает:

(1) слоевую атомарную модель наноструктуры (рис. 1, см. третью сторону обложки), объединяющую систему $\{X^j\}$ параллельных кристаллографических плоскостей X^j . Подвижные ионы перемещаются с плоскости на плоскость $X^k \leftrightarrow X^{k+1}$ по прыжковому механизму по 1D-туннелям БИТ через потенциальные барьеры. Плоскости X^j соответствуют минимумам потенциального рельефа. При слабом внешнем воздействии (генератор тока $G(t)$) возникает направленное движение ионов в 1D-туннелях. Модель основана на реальной структуре передового суперионного проводника (ПСИП) типа α -AgI (рис. 1, а, б), структура которого близка к оптимальной для БИТ, и представляет связную 3D-сетку кристаллографических позиций (туннели БИТ), разделенных небольшими, ($\approx 0,1$ эВ), потенциальными барьерами. Число позиций на плоскостях X^j в 4...6 раз превышает число подвижных ионов;

(2) метод "скрытых" переменных (избыточные, индуцированные внешним воздействием, неравновесные концентрации $n_j(t)$ ионов подвижного сорта на плоскостях X^j);

(3) физико-математический формализм (система дифференциальных уравнений), который оперирует "скрытыми" переменными $n_j(t)$ и базируется на принципе детального равновесия и кинетических уравнениях, записанных в форме закона сохранения числа частиц. СДП позволяет описывать ион-транспортные и диэлектрик-поляризационные процессы, которые слагаются из термически активированных токов ионов подвижного сорта между минимумами потенциального рельефа ТЭ и токов смещения Максвелла на потенциальных барьерах. Эти процессы связывает дальнедействующее кулоновское взаимодействие, что ведет к коллективным явлениям (формирование и релаксация пространственного заряда, импеданс Вар-

бурга, универсальный динамический отклик Джоншера и др.);

(4) метод однородного эффективного электростатического поля в условиях, когда при слабом воздействии генератора тока $G(t)$ избыточные точечные заряды распределены по плоскостям X^j дискретно-случайно. Показано, что точность расчетов СДП можно увеличить путем корректировки однородного электростатического поля Гаусса, создаваемого заряженной плоскостью X^j .

В СДП объектами являются слоевые наноструктуры, образуемые семейством параллельных плоскостей $\{X^j\}$. Направленный генератором тока $G(t)$ прыжковый транспорт ионов происходит по 1D-каналам БИТ в направлении координатной оси x , перпендикулярной плоскостям $\{X^j\}$. Система обыкновенных дифференциальных уравнений СДП описывает изменение кинетики ионного транспорта $\dots X^{k-1} \leftrightarrow X^k \leftrightarrow X^{k+1} \dots$ ионов через потенциальные барьеры $\dots \eta_{k-1, k}, \eta_{k, k+1} \dots$ в общем случае разной высоты:

$$\frac{dy_j(t)}{dt} = \dot{y}_j(t) = \xi_j(y_1, \dots, y_M),$$

$$j = 1, \dots, M; \quad y_j(t) = \frac{n_j(t) - n_0}{n_0}, \quad (1)$$

где y_j — относительное изменение концентрации в j -м минимуме потенциального рельефа; ξ_j — нелинейные функции, записанные с учетом принципа детального баланса. Взаимосвязанные кинетические уравнения (1) выражают закон сохранения числа частиц, перемещающихся между минимумами потенциального рельефа $\dots X^{k-1} \leftrightarrow X^k \leftrightarrow X^{k+1} \dots$. Величина n_0 — поверхностная концентрация ионов подвижного сорта на любой из M плоскостей модельной наноструктуры $\{X^j\}$ ($j = 1, \dots, M$) в условиях $G(t) \equiv 0$, величина $n_j(t)$ — неравновесная поверхностная концентрация ионов подвижного сорта на плоскости X^j , индуцированная $G(t)$. В СДП множество величин $\{y_j(t)\}$, $1 \leq j \leq M$, названы скрытыми переменными [5, 6, 22], поскольку экспериментальные возможности для определения функций $n_j(t)$ в настоящее время отсутствуют. Слабость внешнего воздействия означает, что скрытые переменные $y_j(t) = \frac{n_j(t) - n_0}{n_0} \ll 1$, а возникающие при внешнем воздействии полевые добавки Ω к высотам барьеров η удовлетворяют неравенствам $\Omega_{k, k+1} \ll k_B T \ll \eta_{k, k+1}$.

Переменные $\{y_k(t)\} \equiv |Y(t)$ влияют двояко (локально и глобально) на кинетику ионного транспорта в наноструктуре $\{X^j\}$. Локальное влияние: каждая пара переменных $n_0 y_k(t)$ и $n_0 y_{k+1}(t)$ опреде-

ляет результирующий поток ионов через потенциальный барьер $\eta_{k, k+1} + \Omega_{k, k+1}(t)$, где $\Omega_{k, k+1}(t)$ — полевая добавка к высоте барьера. Глобальное влияние состоит в том, что избыточный заряд $en_0 y_j(t)$ на плоскости X^j дает свой вклад во все полевые добавки множества $\{\Omega_{k, k+1}(t, y_1, \dots, y_j, \dots, y_M)\}$, непрерывно модифицируя потенциальный рельеф $\{\eta_{k, k+1} + \Omega_{k, k+1}(t, y_1, \dots, y_j, \dots, y_M)\}$ наноструктуры $\{X^j\}$. Отсюда следует нелинейность решений уравнений СДП и возникновение в наноструктуре новых свойств (emergent properties), не сводимых к свойствам ее частей (системный эффект).

Размерные факторы при учете дискретности распределений зарядов на наномасштабе. Соотношение взаимности для зарядов и полевых добавок к высотам потенциальных барьеров в наноэлектронике

В недавних работах [7, 23] методом вычислительного эксперимента обоснована возможность использования в СДП понятия "эффективное однородное электростатическое поле" ($F_{eff}^{j,k}$). Поле $F_{eff}^{j,k}$ используется в СДП вместо неоднородного поля F_{dis} , которое возникает в наноструктурах $\{X^j\}$ при внешнем воздействии $G(t)$. Неоднородное поле F_{dis} создают избыточные точечные заряды Q , дискретно-случайно распределенные по плоскостям X^j . При малых $G(t)$ среднее расстояние r_Q между избыточными зарядами Q на плоскости X^j принимает большие значения ($r_Q > 300$ нм). При этих условиях изменение кинетики ионного транспорта определяет сумма S полевых добавок $\Omega_{k, k+1}$ к высотам потенциальных барьеров $\eta_{k, k+1}$:

$$S = \sum_k \Omega_{k, k+1}. \quad (2)$$

Эффективное поле $F_{eff}^{j,k}$ однородно-непрерывно заряженной плоскости X^j обеспечивает такое же изменение средней частоты перескоков подвижных ионов через барьеры $\eta_{k, k+1}$, как и неоднородное поле F_{dis} . Эффективное поле $F_{eff}^{j,k}$ можно задать путем коррекции полевых добавок Ω_G [7, 23], которые возникают в однородном электростатическом поле Гаусса F_G , создаваемом однородно-непрерывным распределением избыточного заряда по X^j .

В наноструктурах $\{X^j\}$, находящихся под воздействием $G(t)$, расстояния $L^{j,k}$ между плоскостью X^j (с дискретно-случайным распределением избыточных точечных зарядов Q) и плоскостью X^k (с которой ионы совершают переходы $X^k \rightarrow X^{k+1}$ через потенциальные барьеры $\eta_{k, k+1} + \Omega_{k, k+1}$) не превышают нескольких нанометров. Численное моделирование [7, 23] показывает, что для наноструктур $\{X^j\}$ протяженностью более 3...4 нм допустимо использовать в СДП поле Гаусса F_G в ка-

честве эффективного поля $F_{eff}^{j,k} \approx \text{const}$. Однако в работах [7, 23] не обсуждался вопрос о физическом смысле размерного фактора, который позволяет использовать приближение $F_{eff}^{j,k} \approx F_G$ в необычных для F_G геометрических условиях: $L^{j,k} (\sim 1 \text{ нм}) \ll r_Q (> 300 \text{ нм})$. Действительно, расстояние R между плоскостью с избыточными зарядами и точкой наблюдения поля не соответствует приближению F_G , так как $R \ll r_Q$, а не наоборот. Для выяснения причины возникновения размерного фактора рассмотрим две задачи электростатики (рис. 2, а, b и рис. 3, а, b).

На рис. 2, а показана плоскость P с квазиоднородным распределением точечных зарядов Q . Согласно макроскопической электростатике, в области пространства, удаленном от плоскости P на расстояние $R \gg r_Q$, напряженность электрического поля F можно считать постоянной. Это однородное поле Гаусса F_G . В таком поле у всех потенциальных барьеров высоты $\eta_{k, k+1}$ изменяются на одну и ту же величину полевой добавки $\Omega_G = \text{const}(R)$. Характерная длина L в экспоненте $e^{-R/L}$, которую можно использовать для приближенного описания перехода от $F = 0$ (при $R = 0$) к $F_G = \text{const}(R)$, должна быть порядка нескольких r_Q .

Если распространить эту логику на случай кристаллографической плоскости X^j (рис. 2, б) с $r_Q > 300$ нм, то можно сделать неправильный вывод: соотношение $F_{eff}^{j,k} \approx F_G$ используется в СДП некорректно (характерная длина L в экспоненте $e^{-R/L}$ должна быть $L > r_Q > 300$ нм, но в СДП наноэлектроники, где расстояния $L^{j,k} \sim 1$ нм, выполняется иное условие: $L^{j,k} \ll r_Q$).

Однако в работах [7, 23] решается другая задача (рис. 3, а). В СДП изменение кинетики ионного транспорта при внешнем воздействии определяют не сами поля, а сумма S (2) полевых добавок Ω к высотам потенциальных барьеров. Поэтому корректность приближения $F_{eff}^{j,k} \approx \text{const}(L^{j,k}) \approx F_G$ при $r_Q \gg L^{j,k} \sim 1$ нм обеспечивают дополнительные условия. Рис. 3, а демонстрирует эти условия: в окрестности каждого избыточного точечного заряда Q имеется множество подвижных ионов, которые совершают переходы $X^k \rightarrow X^{k+1}$ через потенциальные барьеры $\eta_{k, k+1}$. Среднее расстояние r_i между подвижными ионами на плоскостях X^k , например, в ПСИП α -AgI, составляет $\approx 0,6$ нм. Каждый избыточный заряд Q существенно изменяет полевые добавки Ω только у барьеров тех N подвижных ионов (на плоскости X^k), которые находятся в его ближайшей окрестности. Выделим эту окрестность избыточного заряда Q_j некоторым телесным углом Θ , вершина которого имеет координаты избыточного заряда Q_j . Сумма S (2) полевых

добавок Ω к высотам N барьеров $\eta_k, k+1$, выделенных углом Θ , будет $\approx N\Omega$. При увеличении расстояния $L^{j,k} = (|k-j|\Delta) \ll r_Q$ между зарядом Q и плоскостью X^k каждая полевая добавка Ω в (2) уменьшается как $\sim(|k-j|\Delta)^{-2}$, где Δ — расстояние между плоскостями с индексами k и $k+1$. Одновременно в окрестности угла Θ число N подвижных ионов увеличивается как $\sim(|k-j|\Delta)^2$, а сумма S в (2) становится $N\Omega \approx \text{const}$, хотя $r_Q \gg L^{j,k} \sim 1$ нм. Таким образом, размерный фактор (который обеспечивает в СДП возможность использовать приближение $F_{\text{eff}}^{j,k} \approx F_G$ при $L^{j,k} \ll r_Q$) — это среднее расстояние r_i между ионами подвижного сорта в твердотельном ионном проводниках, которое в ПСИП α -AgI имеют порядок 0,5 нм. Выявленный r_i -размерный фактор является следствием известного положения макроскопической электростатики: для точечного заряда в вакууме поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность, окружающую заряд, равен const .

Рис. 2 и 3 дают качественное обоснование обруженного ранее в СДП (методом численного

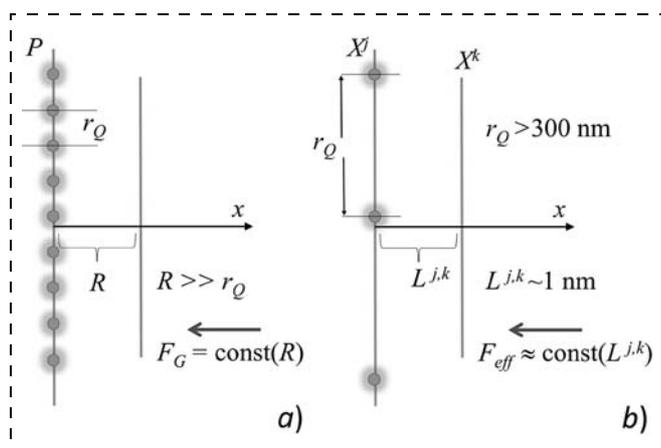


Рис. 2. Два случая геометрии распределения точечных зарядов и расстояний до точки наблюдения поля в классической электростатике: *a* — плоскость с квазиоднородным распределением заряда. Переход от поля $F = 0$ ($R = 0$) к полю Гаусса $F_G = \text{const}(R)$ происходит при $R \gg r_Q$; *b* — в СДП плоскость с избыточными зарядами X^j ($r_Q > 300$ нм) находится близко к любой из плоскостей $\{X^k\}$ ($L^{j,k} \sim 1$ нм), где находятся минимумы потенциального рельефа и подвижные ионы. Переход к эффективному полю $F_{\text{eff}}^{j,k} \approx F_G$ происходит при расстояниях $L^{j,k} \sim 1$ нм ($L^{j,k} \ll r_Q$)

Fig. 2. Two cases of distribution geometry of point charges and distances to the field observation point in classical electrostatics: *a* — a plane with a quasi-uniform charge distribution. Transition from the field $F = 0$ ($R = 0$) to the Gauss field $F_G = \text{const}(R)$ occurs at $R \gg r_Q$; *b* — in SDA plane with excess charges ($r_Q > 300$ нм) is close to any of the $\{X^j\}$ planes ($L^{j,k} \sim 1$ нм), where there are the potential landscape minima and mobile ions are located. Transition to an effective field $F_{\text{eff}}^{j,k} \approx F_G$ occurs at the distances of $L^{j,k} \sim 1$ нм ($L^{j,k} \ll r_Q$)

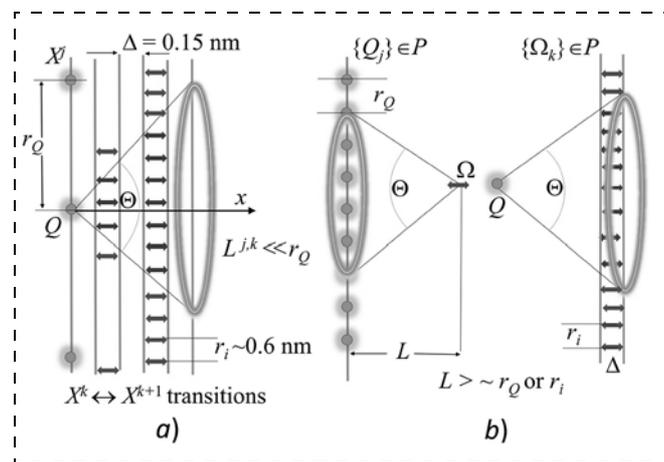


Рис. 3. Размерный фактор и теорема взаимности в СДП для множества избыточных зарядов $\{Q_j\} \in P$ и множества полевых добавок $\{\Omega_j\}$ к высотам потенциальных барьеров на плоскости P , т. е. $\{\Omega_j\} \in P$: *a* — малость среднего расстояния r_i между ионами подвижного сорта обеспечивает корректность приближения $F_{\text{eff}}^{j,k} \approx \text{const}(L^{j,k}) \approx F_G$ в условиях $r_Q \gg L^{j,k} \sim 1$ нм; *b* — замена $\{\{Q_j\}, \Omega\} \leftrightarrow \{\{\Omega_j\}, Q\}$ обеспечивает инвариант $\sum_j \Omega_j \approx \text{const}(R, L^{j,k})$

Fig. 3. The dimensional factor and the reciprocity theorem in SDA for a set of excess charges $\{Q_j\} \in P$ and a set of field additives $\{\Omega_j\}$ to the heights of potential barriers on a plane P , i.e. $\{\Omega_j\} \in P$: *a* — the smallness of an average distance between mobile ions provides the correctness of the $F_{\text{eff}}^{j,k} \approx \text{const}(L^{j,k}) \approx F_G$ approximation at $r_Q \gg L^{j,k} \sim 1$ нм; *b* — replacement $\{\{Q_j\}, \Omega\} \leftrightarrow \{\{\Omega_j\}, Q\}$ provides the invariant $\sum_j \Omega_j \approx \text{const}(R, L^{j,k})$

моделирования на наномасштабе [7, 23]) размерного фактора, выражающегося в слабой зависимости поправок к полю Гаусса F_G при значениях индексов j и k плоскостей, удовлетворяющих неравенству $|k-j| > 3$. Существование в наноионике r_i -размерного фактора позволяет сформулировать в СДП соотношение взаимности для зарядов и полевых добавок к высотам потенциальных барьеров (рис. 3, *b*). Замена пары (множество зарядов $\{Q_j\}$ и полевая добавка Ω к высоте барьера) на пару (множество полевых добавок $\{\Omega_j\}$ и заряд Q) обеспечивает в СДП инвариант относительно R и $L^{j,k}$, т. е. $\sum_j \Omega_j \approx \text{const}(R, L^{j,k})$, где в случае множества зарядов $\{Q_j\}$ под знаком суммы $\sum_j \Omega_j$ стоит один элемент $\Omega \approx \text{const}(L^{j,k})$. Каждую пару обозначим как множество из двух элементов, соответственно, $\{\{Q_j\}, \Omega\}$ и $\{\{\Omega_j\}, Q\}$.

Соотношение между зарядами и полевыми добавками в СДП может быть сформулирована как теорема взаимности. Для пары $\{Q_j\}$ (множество зарядов на плоскости P) и Ω (полевая добавка к вы-

соте потенциального барьера в области, удаленной от P на расстояние L) и пары Q (заряд, удаленный от P на расстояние L) и $\{\Omega_j\}$ (множество полевых добавок к высотам потенциальных барьеров, расположенных на плоскости P) в условиях $L > \sim r_Q$ и $L > \sim r_i$ (r_Q — среднее расстояние между зарядами, r_i — среднее расстояние между потенциальными барьерами, которые преодолевают подвижные ионы) выполняется правило: при замене $\{\{Q_j\}, \Omega\} \leftrightarrow \{\{\Omega_j\}, Q\}$ следует $\Rightarrow \sum_j \Omega_j \approx \text{const}$, где в случае множества зарядов $\{Q_j\}$ под знаком суммы стоит один элемент $\Omega \approx \text{const}$.

**Объекты наноионики как динамические нелинейные системы.
Некоммутативность операторов генератора тока в СДП**

В ионике твердого тела широкое применение находят релаксационные методы исследования и диагностики, линейные в своей основе. Например, метод импедансной спектроскопии базируется на положении, что сложная система (ячейка, образец, гетеропереход, электрохимическая цепь) с БИТ будет проявлять линейные свойства, если зависящее от времени t внешнее воздействие $G(t)$, например, воздействие генератора тока $G(t)$, сделать достаточно малым [21], т. е. $G(t) \ll p$, где параметр p (комбинация величин) определяется условиями задачи.

Неоднородный потенциальный рельеф в туннелях БИТ (т. е. локальные функции пространственного распределения высот $\eta(r)$ барьеров) предопределяет специфику динамического отклика наноструктур с прыжковым ионным транспортом. В СДП реализуется следующая последовательность причинно-следственных связей: импульсное или гармоническое внешнее воздействие $G(t) \rightarrow$ появление в наноструктуре зависящего от t распределения избыточных зарядов $\{en_0 y_i(t)\}$ по системе кристаллографических плоскостей $\{X^j\}$ (минимумы потенциального рельефа) \rightarrow возникновение неоднородного электрического поля $F(r, t)$, индуцированного избыточными зарядами \rightarrow изменение высот барьеров $\eta(r)$ на величину полевых добавок $\Omega(r, t) \rightarrow$ изменение кинетики ионного транспорта, определяемое при $G(t) \ll p$ суммой S полевых добавок $\Omega(r, t) \rightarrow$ зависящий от t нелинейный отклик наноструктуры.

Таким образом, объекты наноионики ведут себя как динамические системы, у которых основные параметры (высоты потенциальных барьеров) зависят от внешнего воздействия $G(t)$. Это означает, что отклик $R(t)$ рассматриваемых объектов на воздействие $G(t)$ не может быть описан достаточно полно в рамках линейного приближения, и общее

решение $R_{NL}(t)$ следует искать в области динамической нелинейной ионики.

Формализованная модель СДП (1) связывает множество компонентов $\{y_k(t)\} \equiv |Y(t)\rangle$ с множеством первых производных по времени $\{\dot{y}_k(t)\} \equiv |\dot{Y}(t)\rangle$ и с функцией $G(t)$, которая моделирует действие генератора тока. Величины $|Y(t)\rangle$ и $|\dot{Y}(t)\rangle$, а также начальные и граничные условия задают траекторию (эволюцию) системы в $2M$ -мерном фазовом пространстве переменных $\{y_k(t)\}$ и $\{\dot{y}_k(t)\}$, $1 \leq k \leq M$, где M — общее число плоскостей X^k в модельной наноструктуре. СДП дает "внутреннее описание" (в терминах [28]) поведения наноструктур $\{X^j\}$, в которых все $M \sim 10 \dots 30$ компонент величины $|Y(t)\rangle$ связаны дальнедействующим кулоновским взаимодействием. Общее число таких внутренних связей имеет порядок $M(M-1) \sim M^2$, т. е. велико. Известно [28, 29], что высокая "структурная связность" с неизбежностью приводит к нелинейности динамических моделей. Теоретический анализ их поведения является трудной задачей даже при малом числе компонент $\{y_k(t)\} \equiv |Y(t)\rangle$, а при больших значениях k становится вообще неэффективным. Отсюда следует, что численные методы и компьютерные эксперименты должны играть важную роль в динамической нелинейной ионике.

Нелинейность решений уравнений СДП (1) наглядно проявляется в отклике модельных наноструктур $\{X^j\}$ на последовательность импульсов генератора тока $G(t)$. Пусть генератор G создает в $\{X^j\}$ с неоднородным, но симметричным относительно центра масс потенциальным рельефом, два последовательных прямоугольных импульса тока (операторы G^+ и G^-) разной полярности. Длительность Δt каждого из импульсов удовлетворяет условию $\Delta t \ll \tau$, где τ — характерное время релаксации наноструктуры $\{X^j\}$, которое определяется высотой самого высокого барьера. При любом G^+ в $\{X^j\}$ происходит перераспределение избыточных зарядов между минимумами потенциального рельефа. Возникающие электрические поля модифицируют высоты барьеров $\dots \eta_{k-1, k}, \eta_{k, k+1} \dots$, поэтому второй импульс противоположной полярности G^- воздействует уже на другую, модифицированную наноструктуру, имеющую потенциальный рельеф $\dots \eta_{k+1, k} + \Omega_{k, k-1}, \eta_{k, k+1} + \Omega_{k, k+1} \dots$.

Пусть начальное равновесное распределение избыточных зарядов в $\{X^j\}$ описывает величина $|Y_0\rangle = |0, \dots, 0\rangle$. Воздействие оператора G^+ на $|Y_0\rangle$ можно записать в виде

$$|Y^+\rangle = G^+|Y_0\rangle, \quad (3)$$

т. е. оператор G^+ переводит множество $|Y_0\rangle$ в новое множество — отклик $|Y^+\rangle$ наноструктуры. Величина $|Y^+\rangle$ описывает неравновесное (нерелаксированное) состояние $\{X^j\}$. Воздействие импульса тока

отрицательной полярности $G^- = -|G^+|$ на $|Y_0\rangle$ запишем аналогично:

$$|Y^-\rangle = G^-|Y_0\rangle. \quad (4)$$

Последовательное применение операторов G^+ и G^- (G^- и G^+) дает:

$$|Y^{+-}\rangle = G^-|Y^+\rangle = G^-G^+|Y_0\rangle; \quad (5)$$

$$|Y^{-+}\rangle = G^+|Y^-\rangle = G^+G^-|Y_0\rangle. \quad (6)$$

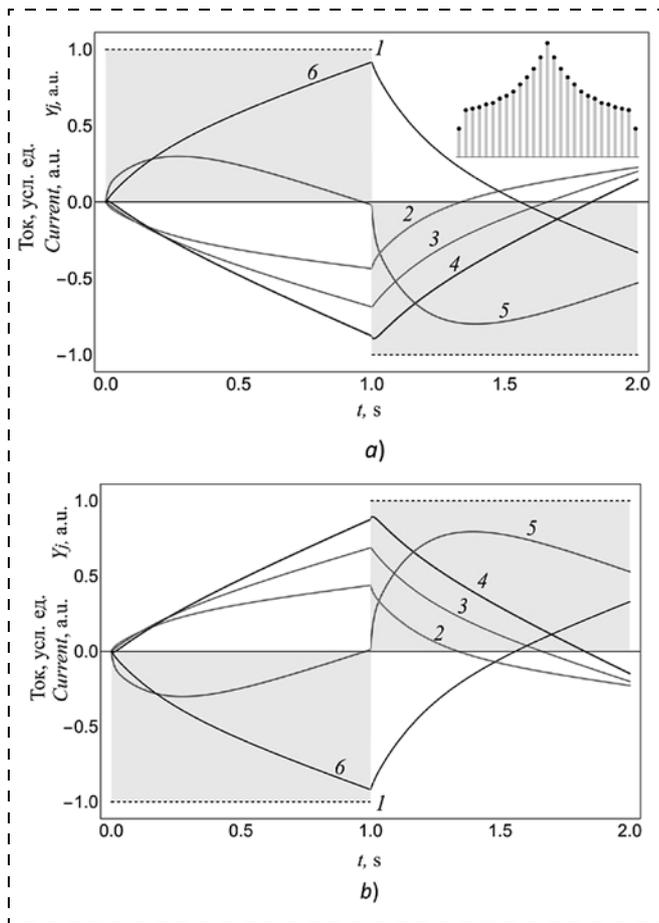


Рис. 4. Воздействие двух разных последовательностей импульсов тока разной полярности (G^+ , G^-) на наноструктуру $\{X^j\}$ с исходным состоянием $|Y_0\rangle = |0, \dots, 0\rangle$ создает разные неравновесные состояния $|Y^{+-}\rangle$ и $|Y^{-+}\rangle$. На вставке показан потенциальный рельеф в наноструктуре: $a - 1$ — последовательность импульсов $G^+ \rightarrow G^-$; $2 - y_1(t)$, переход от $|Y_0\rangle = |0, \dots, 0\rangle$ к $|Y^{+-}\rangle$; $3 - y_2(t)$; $4 - y_3(t)$; $5 - y_4(t)$; $6 - y_5(t)$; $b - 1$ — последовательность импульсов $G^- \rightarrow G^+$; $2 - y_1(t)$, переход от $|Y_0\rangle = |0, \dots, 0\rangle$ к $|Y^{-+}\rangle$; $3 - y_2(t)$; $4 - y_3(t)$; $5 - y_4(t)$; $6 - y_5(t)$

Fig. 4. An influence of two different sequences of impulses of a current of different polarity (G^+ , G^-) on the nanostructure $\{X^j\}$ with an initial state $|Y_0\rangle = |0, \dots, 0\rangle$ creates different non-equilibrium states $|Y^{+-}\rangle$ and $|Y^{-+}\rangle$. The insert shows the potential landscape in the nanostructure: $a - 1$ is a sequence of impulses $G^+ \rightarrow G^-$; 2 is $y_1(t)$, the transition from $|Y_0\rangle = |0, \dots, 0\rangle$ to $|Y^{+-}\rangle$; $3 - y_2(t)$; $4 - y_3(t)$; $5 - y_4(t)$; $6 - y_5(t)$; $b - 1$ is a sequence of impulses $G^- \rightarrow G^+$; 2 is $y_1(t)$, the transition from $|Y_0\rangle = |0, \dots, 0\rangle$ to $|Y^{-+}\rangle$; $3 - y_2(t)$; $4 - y_3(t)$; $5 - y_4(t)$; $6 - y_5(t)$

На рис. 4 представлен результат расчетов по формулам (5), (6) для симметричной наноструктуры $\{X^j\}$, где $1 \leq j \leq M = 28$ (вставка на рисунке). Расчеты в рамках СДП выполнены с в среде пакета программ Wolfram Mathematica [30] для параметров модели $\{X^j\}$, таких же как в [7, 23]: температура 300 К, $n_0 = 10^{18} \text{ м}^{-2}$, распределение высот барьеров $\dots \eta_{k-1}, \eta_k, \eta_{k+1} \dots$ в $\{X^j\}$ представлено на вставке к рис. 4, a : 0,23, 0,33, 0,34, 0,35, 0,37, 0,38, 0,41, 0,43, 0,46, 0,51, 0,56, 0,62, 0,73, 0,80, 0,73, 0,62, 0,56, 0,51, 0,46, 0,43, 0,41, 0,38, 0,37, 0,35, 0,34, 0,33, 0,23 эВ. На рис. 4 показано, что последовательные импульсы тока $G^+ \rightarrow G^-$ ($G^- \rightarrow G^+$) создают в момент $t = 2$ с неравновесное состояние $|Y^{+-}\rangle$ ($|Y^{-+}\rangle$). Показан переход к неравновесному состоянию относительных концентраций $\{y_j(t)\}$ только для пяти минимумов потенциального рельефа, т. е. компонент $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$ и $y_5(t)$ вектора $\{y_k(t)\} \equiv |Y(t)\rangle$, $1 \leq j \leq M = 28$. Из полученных данных следует, что достигнутые неравновесные состояния $|Y^{+-}\rangle$ и $|Y^{-+}\rangle$ нельзя назвать близкими, так как у $|Y^{+-}\rangle$ и $|Y^{-+}\rangle$ все компоненты отличаются знаком. Таким образом,

$$|Y^{+-}\rangle \neq |Y^{-+}\rangle, \quad |Y^{+-}\rangle = -|Y^{-+}\rangle, \quad (7)$$

т. е. операторы G^+ и G^- ($G^- = -|G^+|$) не коммутируют даже в условиях $\Delta t \ll \tau$, когда только небольшая часть вводимой в наноструктуру $\{X^j\}$ энергии преобразуется в теплоту.

Экспериментальные методы ионики имеют пространственно-временные ограничения по детектированию процессов, что ведет к потере информации из-за физического пространственно-временного усреднения элементарных процессов $\{y_k(t)\}$, которые протекают в области отдельных потенциальных барьеров. Поэтому ряд динамических явлений не фиксируется в эксперименте. Можно ожидать, что в динамической нелинейной ионике, учитывающей неоднородность потенциального рельефа на наномасштабе, будут обнаружены (первоначально методом численного моделирования) новые, принципиально возможные процессы и явления (маскируемые усреднениями), интерпретируемые в современных работах как присутствие шума в экспериментальных данных.

Заключение

Для развития структурно-динамического подхода (СДП) наноионики впервые применен метод проецирования положений нелинейной динамики на СДП. Показано, что объекты наноионики относятся к классу динамических нелинейных систем, у которых основные параметры (высоты потенциальных барьеров) зависят от внешнего воздействия. *Нелинейный динамический отклик $R_{NL}(t)$ проводников с прыжковой ионной проводимостью*

предопределен наномасштабной неоднородностью потенциального рельефа.

В работе дано качественное объяснение обнаруженного ранее в вычислительных экспериментах размерного фактора, который позволяет использовать на наномасштабе понятие "эффективное однородное поле". Показано, что r_i — размерный фактор — определяется малостью среднего расстояния r_i между ионами подвижного сорта в материалах с прыжковой проводимостью. Полученный результат сформулирован в работе как теорема взаимности зарядов Q_j и полевых добавок Ω_j к высотам потенциальных барьеров:

$$\{\{Q_j\}, \Omega\} \leftrightarrow \{\{\Omega_j\}, Q\} \Rightarrow \sum_j \Omega_j \approx \text{const.}$$

Выявлено фундаментальное нелинейное свойство решений уравнений СДП — некоммутативность операторов генератора тока $G(t)$. Оно проявляется даже в условиях, когда можно пренебречь преобразованием электрической энергии в тепловую в процессах релаксации.

Распространение идей, подходов и результатов нелинейной динамики на наноионику представлено в статье как актуальная и важная проблема.

Список литературы

1. **Despotuli A. L., Nikolaichik V. I.** A step towards nanoionics // *Solid State Ionics*. 1993. Vol. 60, N. 4. P. 275—278.
2. **Деспотули А. Л., Андреева А. В.** Создание новых типов тонкопленочных твердоэлектролитных суперконденсаторов для микросистемной техники и микро(нано)электроники // *Микросистемная техника*. 2003. № 11. С. 2—9.
3. **Деспотули А. Л., Андреева А. В., Рамбабу Б.** Наноионика суперионных проводников — основа создания новых приборов для МСТ // *Нано- и микросистемная техника*. 2005. № 2. С. 5—13.
4. **Деспотули А. Л., Андреева А. В.** Перспективы развития в России глубоко субвольтовой наноэлектроники и связанных с ней технологий // *Нано- и микросистемная техника*. 2008. № 10. С. 2—11.
5. **Деспотули А. Л., Андреева А. В.** Модель, метод и формализм нового подхода к описанию процессов ионного транспорта на блокирующих гетеропереходах твердый электролит/электронный проводник // *Нано- и микросистемная техника*. 2012. № 9. С. 16—21.
6. **Деспотули А. Л., Андреева А. В.** Ток смещения Максвелла в наноионике и собственные ион-транспортные свойства модельных наноструктур // *Нано- и микросистемная техника*. 2013. № 8. С. 2—9.
7. **Деспотули А. Л., Андреева А. В.** Эффективное электростатическое поле в структурно-динамическом походе наноионики // *Нано- и микросистемная техника*. 2016. Т. 18, № 1. С. 14—19.
8. **Деспотули А. Л., Андреева А. В.** Высокоемкие конденсаторы для 0,5-вольтовой наноэлектроники будущего // *Современная электроника*. 2007. № 7. С. 24—29.
9. **Деспотули А. Л.** Глубоко субвольтовая наноэлектроника: новые результаты 2007—2008 гг. // *Интеграл*. 2008. № 4. С. 10—11.

10. **Despotuli A.L., Andreeva A. V.** Nanoionic supercapacitors for energy accumulation in deep-sub-voltage regime // *Перспективные материалы. Специальный выпуск*. 2011. (13) Т. 1. С. 277—284.

11. **Деспотули А. Л., Андреева А. В., Веденев В. В., Аристов В. В., Мальцев П. П.** Высокоемкие конденсаторы для ультраплотного поверхностного монтажа // *Нано- и микросистемная техника*. 2006. № 3. С. 30—37.

12. **Романько В., Кравченко С., Нестеров С., Христич В., Мальцев П.** Применение вакуумной техники и технологии в космической отрасли // *Наноиндустрия*. 2012. № 2. С. 16—19.

13. **Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричович Я. Я.** Радиационно-стойкие элементы памяти для нанометровых КМОП СФ-блоков и СБИС // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. 2015. Т. 157, вып. 1. С. 10—16.

14. **Sunandana C. S.** Introduction to Solid State Ionics. Phenomenology and Application Taylor & Francis Group. 2015. 529 p.

15. **Nanoionic device.** URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nanoionic_device

16. **Wan T., Zhang L., Du H., Lin X., Qu B., Xu H., Li S., Chu D.** Recent Developments in Oxide-Based Ionic Conductors: Bulk Materials, Nanoionics, and Their Memory Applications // *Critical reviews in solid state and materials sciences*. 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/10408436.2016.1244657>.

17. **Thomas A.** Memristor-based neural networks // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. Vol. 46. P. 093001.

18. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** A short review on deep-sub-voltage nanoelectronics and related technologies // *Int. Journal of Nanoscience*. 2009. Vol. 8, N. 4 & 5. P. 389—402.

19. **Деспотули А. Л., Андреева А. В.** Наноионика: новые материалы и суперконденсаторы // *Российские нанотехнологии*. 2010. Т. 5, вып. 7—8. С. 89—100.

20. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Electrode nanostructures for advanced supercapacitors. *Acta Physica Polonica A* 2011. Vol. 120, N. 2. P. 260—265.

21. **Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment, and Applications /** Edited by Barsoukov E. Macdonald J. R. Wiley-Interscience. 2005. 606 p.

22. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Maxwell displacement current and nature of Jonscher's "universal" dynamic response in nanoionics // *Ionics*. 2015. Vol. 21, N. 2. P. 459—469.

23. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Method of uniform effective field in structure-dynamic approach of nanoionics // *Ionics*. 2016. Vol. 22, N. 8. P. 1291—1298.

24. **Jonscher A. K.** The universal dielectric response // *Nature*. 1977. Vol. 267, N. 6. P. 673—679.

25. **Деспотули А. Л., Андреева А. В.** Ток смещения Максвелла и "универсальный" динамический отклик в наноионике // *Нано- и микросистемная техника*. 2014. № 5. С. 2—10.

26. **Uchaikin V. V., Sibatov R. T., Ambrozevich A. S.** On impedance spectroscopy of supercapacitors // *Russian Physics Journal*. 2016. Vol. 59, N. 6. P. 845—855.

27. **Ланда П. С.** Нелинейные колебания и волны. М.: URSS. 2015. 552 с.

28. **Кастри Дж.** Большие системы. Связность, сложность и катастрофы. М.: Мир, 1982. 216 с.

29. **Анищенко В. С.** Сложные колебания в простых системах: Механизмы возникновения, структура и свойства динамического хаоса в радиофизических системах. М.: Наука, 1990. 312 с.

30. **Wolfram Mathematica.** URL: <https://www.wolfram.com/mathematica/>

A. L. Despotuli, Ph. D., Senior Researcher, despot@ipmt-hpm.ac.ru,
A. V. Andreeva, D. Sc., Leading Researcher, Professor, andreeva@ipmt-hpm.ac.ru,
Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, RAS, Chernogolovka, Russia

Dimensional Factors and Non-Linear Processes in Structure-Dynamic Approach of Nanoionics

Corresponding author:

Despotuli Aleksandr L., Ph. D., Senior Researcher, Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, RAS, Chernogolovka, 142432, Russian Federation, e-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru

Received on February 16, 2017

Accepted on March 10, 2017

An extension of non-linear dynamic fundamentals to the structure-dynamic approach of nanoionics (SDA) is formulated. A qualitative explanation of the dimensional factor is presented. Earlier, this factor was discovered by us in computer experiments for realistic (by geometry) models of nanostructures with ionic conductivity. The knowledge on the dimensional factor is important because it allows using on nanoscale the concept of "effective uniform field" and approach of the electrostatic Gauss field. It is shown that the r_i -dimensional factor is determined by the smallness of an average distance r_i between ions of mobile type in materials with hopping conductivity. The obtained result is formulated as a reciprocity theorem (in SDA) between excess charges and field additives to the heights of potential barriers. It is found that objects of nanoionics should be considered as dynamical non-linear systems, which key parameters depend on external influence. The nonlinearity of SDA-equations is shown to manifest itself in noncommutativity of operators of a current generator.

Keywords: nanoionics, structure-dynamic approach, effective uniform electrostatic field, dimensional factor, solid electrolytes, nonlinear processes, computer modelling

For citation:

Despotuli A. L., Andreeva A. V. Dimensional Factors and Non-Linear Processes in Structure-Dynamic Approach of Nanoionics, *Nano- i Mikrosistemnaya Tehnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 338–352.

DOI: 10.17587/nmst.19.338-352

Introduction

Throughout almost 15 years the Journal of Nano and Microsystem Technique publishes regular researches of authors in the field of theoretical and applied nanoionics — the science, which term and concept have been introduced for the first time in Russia in 1992 [1]. A subject of nanoionics is a fast ion transport (FIT) on nanoscale (<https://en.wikipedia.org/wiki/Nanoionics>). Under journal's publications, for example [2–7], it is possible trace the basic direction of nanoionics development in our country for the last years. The authors findings in the field of nanoionics basis meet requirements of nanoelectronics development (deep-sub-voltage nanoelectronics [4, 8–10]), microsystem technics (effective autonomous hybrid energy & power sources for supply of microrobots and nodes of wireless sensor networks of [3]) and others critical and disruptive technologies [11]. The space technics and radiation-resistant electronics are among them [12, 13].

Currently nanoionics is recognized in the world, the term "nanoionics" is widely used in the scientific literature, with it associated an extending range of new conceptions. In the new university textbook on solid state ionics [14], the separate chapter 10 "Nanoionics" was included for the first time and the priority of Institute of Microelectronics Technology of Russian Academy of

Sciences on devices with FIT on nanoscale was endorsed ("nanoionic devices" [15]). The creation of new type of high-density non-volatile rewriteable matrix resistive memory (RRAM-resistive random access memory) for nanoelectronics is connected with nanoionics. Integrated with logic high density RRAM (memristor-based memory networks) [16] is considered as a material basis of artificial intelligence [17]. An example of intersection of applied nanoionics and nanoelectronics (microsystem technics) is micron size impulse supercapacitors with record-high charge and energy density on coherent polarizable heterojunctions (electronic conductor /solid-state ionic conductor) [3, 18–20]. The impulse film supercapacitors with FIT formed in underside of solar cell panels can improve energy-power characteristics of power facilities of spacecrafts.

Despite the importance of nanoionic impulse devices with FIT, their development at modern level (i.e., by using numerical simulation methods) is currently not possible. The reason is the absence of basic (conventional) theory of ionic hopping transport on nanoscale. Therefore, data of measurements and diagnostics (carrying information about the mechanisms of ionic transport processes and the degree of atomic perfection of heterojunction with FIT), for example, impedance spectroscopy data [21], can not be interpreted unam-

biguously. Moreover, these data can lead to contradictory conclusions about the prospects for creation of nanoionic devices for new element base of nanoelectronics and nano (micro) system technology.

In order to solve this problem in IMT RAS was formulated and executed research program to create the theoretical tools to describe the dynamic behavior of the model nanostructures based on solid electrolytes (SE), i.e., solids with dielectric band structure in which ionic conductivity may be in 10^{10} and more times higher than electronic conductivity [3, 18]. Implementation of the program required the development of physical models, research methods, algorithms and computing schemes. As a result, a theoretical system-"structure-dynamic approach of nanoionics" (SDA) [5–7, 22, 23] was created. It allowed carrying out the computer experiments and describing the relationship between the ion hopping transport, dielectric polarization and energy dissipation in model SE-nanostructures (for the conditions of small deviations from equilibrium). A characteristic feature of SDA is a presentation of model nanostructure by non-uniform on nanoscale potential landscape, in which under action of a weak external electric influence the mobile ions migrate by the hopping mechanism.

Computer experiments have shown the prognostic efficiency of SDA. For the first time the physical basis of the emergence of "universal" dynamic response (Jonsher's law [24]) $\text{Re}\sigma^* \propto \omega^n$ ($n \approx < 1$) was revealed in SE-nanostructures, i.e. the real part of the complex conductivity $\text{Re}\sigma^*$ is a power function of the frequency ω of external action [22, 25]. Experimental data in materials science of solid-state ionic conductors are always checked by agreement with Jonsher's law. However, there was no generally accepted theory of dynamic response.

SDA considers the problem of description of the dynamic response in SE-nanosystems from new viewpoint, introducing a new notion — Maxwell displacement current on potential barrier [22, 25]. It is shown that with increasing frequency ω of the external influence the areas with comparable values of ionic conductivity and Maxwell displacement currents are not disappear in the samples with non-uniform potential landscape. This leads to about constant angle of phase shift between current and voltage on the sample electrodes. The obtained result explains the methodology of impedance spectroscopy, which uses the term "element with a constant phase shift" [26]. These "elements" (with unknown physical content) include formally in equivalent electrical circuits for the fitting of their dynamic response to experimental data of ω -behavior of SE-samples.

In recent papers [7, 23] numerical simulation method has proved the validity of the application of concept "uniform effective electrostatic field" (F_{eff}) in SDA on

nanoscale, although the point charges induced by weak external action create in SE-nanostructure greatly non-uniform electric fields. Computational experiments (made for models with realistic geometry of distributions of charges and potential barriers [7, 23]) have shown the ability to use the approximation of the uniform electrostatic Gauss field (F_G) in the calculations of ion-transport processes in nanostructures with length more than $\sim 3\text{--}4$ nm (dimensional factor).

The long-term aim of ongoing research in IMT RAS is an expansion of nanoionics boundaries in new directions and determining the prospects of creating new highly functional solid-state ionic materials and impulse devices for nanoelectronics and microsystem technology. A strong non-stationarity of processes proceeding in pulsed devices implies the inclusion of Maxwell displacement currents in the FIT-theory as well as the description of SE-nanostructure response in terms of nonlinear dynamics. Ideas, methods, approaches and results of nonlinear dynamics (section of the modern theory of oscillations and waves [27]) for several decades actively use in many disciplines, enhancing the interdisciplinary trends in science. However, non-linear dynamics has made little effect on the development of solid state ionics that cumulatively reflects the content of university textbooks [14]. The situation can be corrected by initiating a number of research programs towards "dynamic nonlinear ionics". The central place of these programs should take projects devoted to advancement, development and verification of the theoretical models taking into account directly the densities of local Maxwell displacement currents $I_D = \partial D / \partial t$.

The purpose of this work is a presentation of first results under study of basic nonlinear properties of the SDA-equations solutions and revealing of physical nature of the dimensional factor discovered in [7, 23] by computer simulation method.

Fundamentals and manifestation of nonlinearity in structure-dynamic approach (SDA) of nanoionics

SDA includes:

(1) a layered atomic model of a nanostructure (fig. 1, *a, b, c*), which unites a set of the parallel crystallographic planes $\{X^j\}$. The mobile ions move from one plane to another $X^{k-1} \leftrightarrow X^{k+1}$ by hopping in 1D-FIT tunnels over the potential barriers. The planes X^j correspond to minima of the potential landscape. Under a weak external influence (current generator $G(t)$), a directed ions movement in 1D-tunnels arises. The model is based on the real structure of advanced superionic conductor (AdSIC) such as α -AgI (fig. 1, see the 3-rd side of cover), the structure of which is close to optimal for FIT and constitutes the connected 3D-net of crystallographic positions (FIT-tunnels), separated from each other by small potential barriers (≈ 0.1 eV).

The number of such positions in the planes X^j of more in 4–6 times than the number of mobile ions;

(2) a method of "hidden" variables (the excess, non-equilibrium concentrations $n_j(t)$ of the mobile ions on the planes X^j , induced by external influence);

(3) a physical-mathematical formalism (the system of differential equations), that operates by "hidden" variables $y_j(t)$, and based on the principle of detailed balance and kinetic equations written in the form of the conservation law of the mobile particles. SDA allows to describe ionic transport and dielectric-polarization processes, which include the thermally activated currents of the mobile ions between the minima of SE-potential landscape and Maxwell displacement currents on potential barriers. These processes are connected by the long-range Coulomb interaction which leads to collective phenomena (the formation and relaxation of space charge, the Warburg impedance, the Jonscher's "universal" dynamic response etc.).

(4) a method of the uniform effective electrostatic field in conditions of a weak action of the current generator $G(t)$ when excess point charges in the X^j planes have discrete—random distributions. It is shown that the accuracy of the SDA-calculations can be increased by correction of the uniform electrostatic Gauss field, created by the X^j plane with uniform-continuous distribution of excess charge.

In SDA the objects are layered nanostructures formed by a family of the parallel planes $\{X^j\}$. A hopping ion transport guided by the current generator $G(t)$ occurs within 1D-FIT tunnels in the direction of a coordinate axis x , perpendicular to the $\{X^j\}$ planes. The system of ordinary differential equations of SDA (1) describes a change in the kinetics of ions transport $\dots X^{k-1} \leftrightarrow X^k \leftrightarrow X^{k+1} \dots$ over the potential barriers $\dots \eta_{k-1, k}, \eta_{k, k+1} \dots$ in general case of different heights:

$$\frac{dy_j(t)}{dt} \equiv \dot{y}_j(t) = \xi_j(y_1, \dots, y_M),$$

$$j = 1, \dots, M; \quad y_j(t) = \frac{n_j(t) - n_0}{n_0}, \quad (1)$$

where y_j is a relative change of concentration in the j -th minimum of the potential landscape; ξ_j — are non-linear functions written with considering the principle of detailed balance. Interrelated kinetic equations (1) express the conservation law of the number of particles moving $\dots X^{k-1} \leftrightarrow X^k \leftrightarrow X^{k+1} \dots$ between the minima of the potential landscape. The quantity n_0 is a surface concentration of the mobile ions on any of the planes M of model nanostructure $\{X^j\}$ ($j = 1, \dots, M$) in the conditions $G(t) \equiv 0$; the quantity $n_j(t)$ is a non-equilibrium surface concentration of mobile ions on the plane X^j in-

duced by $G(t)$. In SDA the variables $\{y_j(t)\}$, $1 \leq j \leq M$ are called "hidden variables" [5, 6, 22], because the experimental possibilities for definition of the functions $n_j(t)$ currently not available. The weakness of external influence means that the hidden variables

$$y_j(t) = \frac{n_j(t) - n_0}{n_0} \ll 1, \text{ and arising field additives } \Omega \text{ to}$$

the heights of the barriers η satisfy to the inequalities $\Omega_{k, k+1} \ll k_B T \ll \eta_{k, k+1}$.

The variables $\{y_k(t)\} \equiv |Y(t)\rangle$ influence in two ways (locally and globally) on the kinetics of ion transport in the nanostructure $\{X^j\}$. The local effect is that each pair of variables $n_0 y_k(t)$ and $n_0 y_{k+1}(t)$ determines the resulting flow of ions through the potential barrier $\eta_{k, k+1} + \Omega_{k, k+1}(t)$ where $\Omega_{k, k+1}(t)$ is the field additive to the barrier height $\eta_{k, k+1}$. The global effect is that the excess charge $en_0 y_j(t)$ on the plane X^j gives own contribution to all field additives of the set $\{\Omega_{k, k+1}(t, y_1, \dots, y_j, \dots, y_M)\}$, continuously modifying the potential landscape $\{\eta_{k, k+1} + \Omega_{k, k+1}(t, y_1, \dots, y_j, \dots, y_M)\}$ of the nanostructure $\{X^j\}$. From here the nonlinearity of the solutions of the SDA equations follows and new nanostructure properties (emergent properties), which are not reducible to the properties of its parts (the system effect appears).

Dimensional factors accounting discreteness of charges distribution on nanoscale.

Ratio of reciprocity between charges and field additives to heights of potential barriers in nanoionics

In recent papers [7, 23], a possibility of using in SDA notion of "uniform effective electrostatic field" ($F_{eff}^{j, k}$) is proved by a method of computational modeling. The field $F_{eff}^{j, k}$ is used in SDA instead of a non-uniform field F_{dis} which arise in nanostructures $\{X^j\}$ under external action $G(t)$. The non-uniform field F_{dis} is created by excess point charges Q , discrete randomly distributed on the planes X^j . Under small $G(t)$ the average distance r_Q between excess charges Q on the plane X^j is large length ($r_Q > 300$ nm). Under these conditions, the change of the ion transport kinetics is determined by a sum of the field additives $\Omega_{k, k+1}$ to the heights of potential barriers $\eta_{k, k+1}$

$$S = \sum_k \Omega_{k, k+1}. \quad (2)$$

The effective field $F_{eff}^{j, k}$ of the uniform-continuous charged plane X^j provides the same change of average frequency of the mobile ions hopping through the barriers $\eta_{k, k+1}$ as nonuniform field F_{dis} . The effective field $F_{eff}^{j, k}$ can be defined by correction of the field additives Ω_G [7, 23], which arise in the uniform electrostatic Gauss field F_G , created by uniform-continuous distribution of the excess charges on X^j .

In nanostructures $\{X^j\}$ under influence of $G(t)$, a distance $L^{j,k}$ between the plane X^j (with discrete-random distribution of the excess point charges Q) and the plane X^k (from which the ions make transitions $X^k \rightarrow X^{k+1}$ over the potential barriers $\eta_{k,k+1} + \Omega_{k,k+1}$) does not exceed a few nanometers. The computational modeling [7, 23] shows that for nanostructures $\{X^j\}$ with a length of more than 3–4 nm acceptable to use the Gauss field F_G in SDA as the effective field $F_{eff}^{j,k} \approx \text{const}$. However, in [7, 23] the question of physical sense of the dimensional factor which allows to use the approach $F_{eff}^{j,k} \approx F_G$ in unusual geometric conditions $L^{j,k}$ (~ 1 nm) $\ll r_Q$ (> 300 nm) has not been discussed. Indeed, the distance R between the plane with excess charges and the observation point of the field does not correspond to the approach F_G because $R \ll r_Q$, not vice versa. To clarify cause of appearance of the dimensional factor, we will consider two tasks in electrostatics (fig. 2, *a, b* and fig. 3, *a, b*).

Fig. 2, *a* shows a plane P with a quasi-uniform distribution of point charges Q . According to macroscopic electrostatics, in a space region distant from the plane P by a distance $R \gg r_Q$, the electric field strength F can be considered as constant. This is the uniform Gauss field. In this field the heights $\eta_{k,k+1}$ of all potential barriers change on the same value of field additive, i.e., $\Omega_G = \text{const}(R)$. The characteristic length L in the exponent $e^{-R/L}$, which can be used for an approximate description of the transition from $F = 0$ (at $R = 0$) to $F_G = \text{const}(R)$ should be about several r_Q . If this logic will be extended to the case of the crystallographic plane X^j (fig. 2, *b*) with $r_Q > 300$ nm, then the wrong conclusion is possible: in SDA, the using relation $F_{eff}^{j,k} \approx F_G$ is incorrect. Indeed, the characteristic length L in the exponent $e^{-R/L}$ should be $L > r_Q > 300$ nm, but in SDA of nanoionics (where distances $L^{j,k} \sim 1$ nm) another condition $L^{j,k} \ll r_Q$ holds.

However, in [7, 23] another problem is solved (fig. 3, *a*). In SDA, not fields, but the sum $S(2)$ of the field additives Ω to the heights of potential barriers determines the change of the ion transport kinetics under external influence. Therefore, additional conditions provide the correctness of approximation $F_{eff}^{j,k} \approx \text{const}(L^{j,k}) \approx F_G$ at $r_Q \gg L^{j,k} \sim 1$ nm. Fig. 3, *a* shows these conditions: in a vicinity of each excess point charge Q_j , there are many mobile ions, which make the transitions $X^k \leftrightarrow X^{k+1}$ through the potential barriers $\eta_{k,k+1}$. The average distance between mobile ions on the planes X^k , for example, in AdSIC α -AgI, is $r_i \approx 0.6$ nm. Every excess charge Q_j significantly changes the field additives Ω only for those barriers of N mobile ions (in the plane X^k) which are in its nearest vicinity. Let's limit this vicinity of the excess charge Q_j by some space solid angle Θ which vertex has co-ordinates of excess charge Q_j . The sum (2) of the

field additives Ω to the heights of the N barriers $\eta_{k,k+1}$, confined in the angle Θ , is $\approx N\Omega$. Each field additive Ω in (2) decreases as $(|k-j|\Delta)^{-2}$ with increasing distance ($L^{j,k} = (|k-j|\Delta) \ll r_Q$) between the charge Q_j and the plane X^k , where Δ is the distance between the planes with indices k and $k+1$. Simultaneously, in a vicinity of the angle Θ the number of mobile ions N increases as: $\sim (|k-j|\Delta)^2$, so the sum (2) becomes $N\Omega \approx \text{const}$, though $r_Q \gg L^{j,k} \sim 1$ nm. Thus, the dimensional factor (which provides in SDA possibility to use the approximation $F_{eff}^{j,k} \approx F_G$ at $L^{j,k} \ll r_Q$) is an average distance r_i between mobile ions in solid-state ionic conductors, which in α -AgI — AdSIC has an order of 0.5 nm. Revealed r_i -dimensional factor is a consequence of the well-known condition of a macroscopic electrostatics: for a point charge in vacuum the flux of a vector of electric field strength through the closed surface surrounding a charge is equal const.

Figs. 2 and 3 give a qualitative basis of previously discovered in SDA (by the method of computational modeling on the nanoscale [7, 23]) the dimensional factor, which is expressed in a weak dependence of corrections to the Gauss field F_G for planes with indices j and k satisfying the inequality $|k-j| > 3$. The existence of r_i -dimensional factor in nanoionics allows us to formulate in SDA the reciprocity ratio for the charges and the field additives to the heights of potential barriers (fig. 3, *b*). Pair replacement (set of charges $\{Q_j\}$ and a field additive Ω to the barrier height) on pair (set of field additives $\{\Omega_j\}$ and a charge Q) in SDA provides an invariant with respect to R and $L^{j,k}$, i.e. $\sum_j \Omega_j \approx \text{const}(R, L^{j,k})$, where in the case of set of charges $\{Q_j\}$ the sum $\sum_j \Omega_j$ contains one element, i.e., $\Omega \approx \text{const}(L^{j,k})$. We will designate each pair as $\{\{Q_j\}, \Omega\}$ and $\{\{\Omega_j\}, Q\}$.

The ratio between charges and field additives in SDA can be formulated as the theorem of reciprocity. For pair $\{Q_j\}$ (set of charges on the plane P) and Ω (a field additive to height of potential barrier in area removed from P on distance L) and pair Q (the charge removed from P on distance L) and $\{\Omega_j\}$ (set of field additives to heights of potential barriers located on the plane P) in conditions of $L > \sim r_Q$ and $L > \sim r_i$ (r_Q — is the average distance between excess charges, r_i is the average distance between potential barriers, which overcome mobile ions) the rule is carried out: from replacement $\{\{Q_j\}, \Omega\} \leftrightarrow \{\{\Omega_j\}, Q\}$ follows $\Rightarrow \sum_j \Omega_j \approx \text{const}$, where in the case of set of charges $\{Q_j\}$ the sum contains one element $\Omega \approx \text{const}$.

Objects of nanoionics as dynamic non-linear systems. Non-commutative character of current generator operators in SDA

The relaxation methods of research and diagnostics, which are linear in the basis, find wide application in solid state ionics. For example, the method of impedance spectroscopy is based on suggestion that a complex system (a cell, a sample, a heterojunction, an electrochemical circuit) with FIT will exhibit linear properties if time-dependent t external influence $G(t)$, for example, influence of the current generator $G(t)$, is sufficiently small [21], i.e., $G(t) \ll p$, where the parameter p (a combination of values) is defined by conditions of the problem.

The non-uniform potential landscape in the FIT-tunnels (i.e., local functions of the spatial distribution of the barriers heights) predetermines the specificity of the dynamic response of nanostructures with hopping ionic transport. In SDA, the sequence of cause-consequence relations is the following: impulsed or harmonic external action $G(t) \rightarrow$ appearance of t -dependent distribution of excess charges on the system of the crystallographic planes $\{X^j\}$ (minima of potential landscape) in the nanostructure \rightarrow appearance of non-uniform electric field $F(r, t)$ which is induced by excess charges \rightarrow changes in the $\eta(r)$ barrier heights on the value of field additives $\Omega(r, t) \rightarrow$ the change of ionic transport kinetics determined at $G(t) \ll p$ by the sum of $\Omega(r, t)$ field additives $\rightarrow t$ -dependent non-linear response of nanostructure.

Thus, in nanoionics, the objects behave as dynamic systems with key parameters (heights of potential barriers) which depend on the external action $G(t)$. It means that the response $R(t)$ of the considered objects to the $G(t)$ action cannot be described full enough within the framework of linear approximation and it is necessary to search for common solution $R_{NL}(t)$ in area of dynamic nonlinear ionics.

The formalized model of SDA (1) connects set of components $\{y_k(t)\} \equiv |Y(t)\rangle$ with set of time dependent first derivatives $\{\dot{y}_k(t)\} \equiv |\dot{Y}(t)\rangle$ and with $G(t)$ function which simulates the action of the current generator. The quantities $|Y(t)\rangle$ and $|\dot{Y}(t)\rangle$ as well as initial and boundary conditions, define the trajectory (evolution) of the system in $2M$ -dimensional phase space of variables $\{y_k(t)\}$ and $\{\dot{y}_k(t)\}$, $1 \leq k \leq M$, where M is the total number of the planes X^k in the model nanostructure. SDA gives the "internal description" (in terms of [28]) of behavior of nanostructures $\{X^j\}$, in which all $M \sim 10 \dots 30$ component quantities $|Y(t)\rangle$ are interconnected by long-range Coulomb interaction. Total number of such internal relations has an order $M(M-1) \sim M^2$, i.e., large value. It is known [28, 29] that large "structural connectivity" inevitably leads to nonlinearity of dynamic models. The theoretical analysis of their be-

havior is a difficult task even for small number of the $\{y_k(t)\} \equiv |Y(t)\rangle$ components, and for large M it becomes ineffective in general. Hence, numerical methods and computer experiments should play an important role in dynamic nonlinear ionics.

Nonlinearity of solutions of the SDA equations (1) is evident in the response of the model nanostructures $\{X^j\}$ on a sequence of impulses of the current generator $G(t)$. Let's the generator G creates two successive rectangular current impulses (G^+ and G^- operators) of different polarity in the nanostructure $\{X^j\}$ with non-uniform (but symmetric relatively the center of mass) potential landscape. The duration Δt of each of impulses satisfies the condition $\Delta t \ll \tau$, where τ is characteristic relaxation time of the $\{X^j\}$ nanostructure, which is determined by the height of the highest barrier of nanostructure. At any G^+ a redistribution of excess charges between the minima of the potential landscape occurs in $\{X^j\}$. Arising electric fields modify the barrier heights $\dots \eta_{k-1, k}, \eta_{k, k+1} \dots$, therefore, the second impulse of opposite polarity G^- influences another, modified already nanostructure with potential landscape $\dots \eta_{k-1, k} + \Omega_{k, k-1}, \eta_{k, k+1} + \Omega_{k, k+1} \dots$.

Let initial equilibrium distribution of excess charges in $\{X^j\}$ is described by quantity $|Y_0\rangle = |0, \dots, 0\rangle$. Action of the operator G^+ on $|Y_0\rangle$ can be written down

$$|Y^+\rangle = G^+|Y_0\rangle, \quad (3)$$

i.e., the operator G^+ converts set $|Y_0\rangle$ to a new set, i.e., the response $|Y^+\rangle$ of nanostructure. The quantity $|Y^+\rangle$ describes non-equilibrium (non-relaxation) state of $\{X^j\}$. Action of the current impulse of negative polarity $G^- = -|G^+|$ on $|Y_0\rangle$ can be written in a similar manner.

$$|Y^-\rangle = G^-|Y_0\rangle. \quad (4)$$

Consecutive application of the operators G^+ and G^- (or G^- and G^+) gives

$$|Y^{+-}\rangle = G^-|Y^+\rangle = G^-G^+|Y_0\rangle; \quad (5)$$

$$|Y^{-+}\rangle = G^+|Y^-\rangle = G^+G^-|Y_0\rangle. \quad (6)$$

In fig. 4 (a, b) the result of calculations by (5)–(6) for symmetric nanostructure $\{X^j\}$, where $1 \leq j \leq M = 28$ (the insert) is presented. Calculations within the SDA framework were performed in the software package Wolfram Mathematica [30] for the model parameters such as in [7, 23]: temperature is 300 K, $n_0 = 10^{18} \text{ m}^{-2}$. The distribution of the barriers heights $\dots \eta_{k-1, k}, \eta_{k, k+1} \dots$ in $\{X^j\}$ is presented in the insert of fig. 4, a: 0.23, 0.33, 0.34, 0.35, 0.37, 0.38, 0.41, 0.43, 0.46, 0.51, 0.56, 0.62, 0.73, 0.80, 0.73, 0.62, 0.56, 0.51, 0.46, 0.43, 0.41, 0.38, 0.37, 0.35, 0.34, 0.33, 0.23 eV. It is shown (fig. 4, a, b) that consecutive current impulses $G^+ \rightarrow G^-$ (or $G^+ \rightarrow G^-$) create during the moment $t = 2 \text{ s}$ a non-equilibrium state $|Y^{+-}\rangle$ (or $|Y^{-+}\rangle$). Transition to a non-equilibrium state of the relative concentrations $\{y_j(t)\}$

only for five minima of the potential landscape, i.e., for components $y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t)$ and $y_5(t)$ of the vector $\{y_k(t)\} \equiv |Y(t)\rangle$, $1 \leq j \leq M = 28$ is shown. The findings indicate that the achieved non-equilibrium states $|Y^{+-}\rangle$ and $|Y^{-+}\rangle$ cannot be called similar, since for $|Y^{+-}\rangle$ and $|Y^{-+}\rangle$ all components differ in a sign. Thus,

$$|Y^{+-}\rangle \neq |Y^{-+}\rangle, \quad |Y^{+-}\rangle = -|Y^{-+}\rangle, \quad (7)$$

i.e., operators G^+ and G^- ($G^- = -|G^+|$) do not commute even in conditions $\Delta t \ll \tau$ when only the small part of the input energy in the nanostructure $\{X^j\}$ is converted into heat.

Experimental methods of ionics have spatial and temporal restrictions on detecting of processes, that leads to loss of the information because of physical space-time averaging of elementary processes $\{y_k(t)\}$, which pass in area of individual potential barriers. Therefore, a set of the dynamic phenomena is not fixed in experiment. It is possible to expect that in dynamic nonlinear ionics (taking into account non-uniformity of potential landscape on nanoscale) will be discovered (initially by a method of numerical simulation) new (in principle possible) processes and phenomena (masked by averages), interpreted in modern works, as the presence of noise in experimental data.

Conclusion

Projection of nonlinear dynamic fundamentals on SDA is applied for the first time for development of structural-dynamic approach (SDA) of nanoionics. It is shown that objects of nanoionics belong to a class of dynamic nonlinear systems in which the basic parameters (the heights of potential barriers) depend on external actions. Nonlinear dynamic response $R_{NL}(t)$ of conductors with hopping ionic conductivity is predefined by non-uniformity of potential landscape on nanoscale.

In this work, the qualitative explanation of the dimensional factor (observed earlier in computational experiments), which allows to use on nanoscale the concept "effective uniform field", is offered. It is shown that the r_f -dimensional factor is defined by a small average distance between mobile ions in materials with hopping conductivity. The received result is formulated as the theorem of reciprocity of charges Q_j and field additives Ω_j to the heights of potential barriers

$$\{\{Q_j\}, \Omega\} \leftrightarrow \{\{\Omega_j\}, Q\} \Rightarrow \sum_j \Omega_j \approx \text{const.}$$

Fundamental nonlinear property of solutions of the SDA-equations — noncommutativity of operators of the current generator $G(t)$ is revealed. This property reveals itself even in conditions when it is possible to neglect transformation of electric energy in thermal one in relaxation processes.

The dissemination of ideas, approaches and results of nonlinear dynamics in nanoionic presented in the article as relevant and important problem.

References

1. **Despotuli A. L., Nikolaichik V. I.** A step towards nanoionics, *Solid State Ionics*, 1993, vol. 60, no. 4, pp. 275—278.
2. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Sozdanie novykh tipov tonkoplenochnykh tverdoelektrolitnykh superkondensatorov dlya mikrosistemnoj tekhniki i mikro(nano)elektroniki, *Mikrosistemnaya tekhnika*, 2003, no. 11, pp. 2—9 (in Russian).
3. **Despotuli A. L., Andreeva A. V., Rambabu B.** Nanoionika superionnykh provodnikov — osnova sozdaniya novykh priborov dlya MST, *Nano- I mikrosistemnaya tekhnika*, 2005, no. 2. pp. 5—13 (in Russian).
4. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Perspektivy razvitiya v Rossii gluboko subvol'tovoj nanoehlektroniki i svyazannykh s nej tekhnologij, *Nano- I mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, no. 10, pp. 2—11 (in Russian).
5. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Model, metod i formalizm novogo podhoda k opisaniyu processov ionnogo transporta na blokiryuyushchih geteroperekhodah tverdoy ehlektrolit/ehlektronnyj provodnik, *Nano- I mikrosistemnaya tekhnika*, 2012, no. 9, pp. 16—21 (in Russian).
6. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Tok smeshcheniya Maksvela v nanoionike i sobstvennye ion-transportnye svoystva model'nykh nanostruktur, *Nano- I mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 8, pp. 2—9 (in Russian).
7. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Effektivnoe ehlektrostaticheskoe pole v strukturno-dinamicheskom podhode nanoioniki, *Nano- I mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 14—19 (in Russian).
8. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Vysokoemkie kondensatory dlya 0,5-vol'tovoj nanoelektroniki budushchego, *Sovremennaya elektronika*, 2007, no. 7, pp. 24—29 (in Russian).
9. **Despotuli A. L.** Gluboko sybvol'tovaya nanoelektronika: novyye rezultaty 2007—2008 gg, *Integral*. 2008, no. 4 (42), pp. 10—11 (in Russian).
10. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Nanoionic supercapacitors for energy accumulation in deep-sub-voltage regime, *Perspektivnye materialy. Special'nyj vypusk*, 2011, (13), vol. 1, pp. 277—284.
11. **Despotuli A. L., Andreeva A. V., Vedenev V. V., Arisov V. V., Mal'cev P. P.** Vysokoemkie kondensatory dlya ul'tra plotnogo poverhnostnogo montazha, *Nano- I mikrosistemnaya tekhnika*, 2006, no. 3, pp. 30—37 (in Russian).
12. **Roman'ko V., Kravchenko S., Nesterov S., Hristich V., Mal'cev P.** Primenenie vakuumnoj tekhniki i tekhnologii v kosmicheskoy otrasli, *Nanoindustriya*, 2012, no. 2, pp. 16—19 (in Russian).
13. **Gerasimov Yu. M., Grigor'ev N. G., Kobyl'yackij A. V., Petrichkovich Ya. Ya.** Radiacionno-stojkie ehlementy pamyati dlya nanometrovykh KMOP SF-blokov i SBIS, *Elektronnaya tekhnika, seriya 3, Mikroelektronika*, 2015, vol. 157, no. 1, pp. 10—16 (in Russian).
14. **Sunandana C. S.** *Introduction to Solid State Ionics*. Taylor & Francis Group. 2015. 529 p.
15. **Nanoionic** device. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nanoionic_device
16. **Wan T., Zhang L., Du H., Lin X., Qu B., Xu H., Li S., Chu D.** Recent Developments in Oxide-Based Ionic Conductors: Bulk Materials, Nanoionics, and Their Memory Applications, *Critical reviews in solid state and materials sciences*. 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/10408436.2016.1244657>
17. **Thomas A.** Memristor-based neural networks, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2013, vol. 46, pp. 093001.
18. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** A short review on deep-sub-voltage nanoelectronics and related technologies, *Int. Journal of Nanoscience*. 2009, vol. 8, no. 4 & 5, pp. 389—402.
19. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Nanoionika: novyye materialy i superkondensatory, *Rossijskie nanotekhnologii*, 2010, vol. 5, no. 7—8, pp. 89—100 (in Russian).

20. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Electrode nanostructures for advanced supercapacitors, *Acta Physica Polonica A*, 2011, vol. 120, no. 2, pp. 260–265.

21. **Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment, and Applications** Edited by Barsoukov E. Macdonald J. R. Wiley-Interscience, 2005, 606 p.

22. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Maxwell displacement current and nature of Jonsher's "universal" dynamic response in nanoionics, *Ionics*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 459–469.

23. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Method of uniform effective field in structure-dynamic approach of nanoionics, *Ionics*, 2016, vol. 22, no. 8, pp. 1291–1298.

24. **Jonscher A. K.** The universal dielectric response, *Nature*, 1977, vol. 267, no. 6, pp. 673–679.

25. **Despotuli A. L., Andreeva A. V.** Tok smeshcheniya Maksvela i "universal'nyj" dinamicheskij otklik v nanoionike, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2014, no. 5, pp. 2–10 (in Russian).

27. **Landa P. S.** *Nelinejnye kolebaniya i volny*. Moscow, URSS, 2015. 552 p. (in Russian).

28. **Kasti Dzh.** Bol'shie sistemy. Svyaznost', slozhnost' i katastrofy. Moscow, Mir, 1982. 216 p. (in Russian).

29. **Anishchenko V. S.** Slozhnye kolebaniya v prostykh sistemah: Mekhanizmy vozniknoveniya, struktura i svojstva dinamicheskogo haosa v radiofizicheskikh sistemah. Moscow, Nauka. 1990, 312 p. (in Russian).

30. **Wolfram Mathematica.** URL: <https://www.wolfram.com/mathematica/>

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst19.352-359

Ю. В. Рубцов, генеральный директор АО "ЦКБ "Дейтон", г. Москва, Зеленоград, зам. зав. каф. НИУ МИЭТ, г. Москва, e-mail: Rubtsov@Deyton.ru, **А. В. Алексеева**, студент Национальный исследовательский университет "МИЭТ", техник лаборатории АО "ЦКБ "Дейтон", e-mail: alekseeva@deyton.ru

РАЗРАБОТКА IBIS-МОДЕЛИ МИКРОСХЕМ КОНЦЕНТРАТОРОВ СЕТЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Поступила в редакцию 21.03.2017

Проанализирована существующая номенклатура отечественных микросхем. Обоснован выбор микросхемы для исследования. Представлены параметры микросхемы, обзор стандарта IBIS (Input/Output Buffer Information Specification), хронология создания версий IBIS-моделей, теоретические сведения об IBIS-моделировании. Разработана IBIS-модель.

Ключевые слова: IBIS, аппаратура телекоммуникационная, модель, микросхема, система автоматизированного проектирования, база электронная компонентная, изделие, качество

Введение

Возрастающие требования к параметрам и показателям качества телекоммуникационной аппаратуры заставляют ее разработчиков применять совершенные инструменты проектирования. Они должны хорошо знать номенклатуру изделий электронной компонентной базы (ЭКБ), которая в настоящее время становится все шире, понимать сущность физических процессов, протекающих в изделиях, выполненных по различным технологиям, уметь рассчитывать блоки и узлы различного назначения, применять совершенную измерительную аппаратуру. Выполнение таких задач в настоящее время невозможно без использования САПР, основу которых составляют модели изделий ЭКБ.

Современная практика разработки телекоммуникационной аппаратуры предполагает использование различных САПР. Для каждой существует свой алгоритм функционирования и свой формат представления модели изделий ЭКБ. Основными разработчиками САПР являются зарубежные ком-

пании, которые ориентируются и продвигают модели зарубежных производителей изделий ЭКБ, допускают пополнение библиотек новыми моделями, в том числе на изделия российского производства.

Рост номенклатуры отечественных изделий ЭКБ диктует необходимость в создании библиотеки моделей, которые описывают правила их функционирования в различной аппаратуре, в том числе и телекоммуникационной. Без таких моделей предприятия — изготовители телекоммуникационной аппаратуры и проектировщики несут колоссальные убытки, теряют средства и время на доработку аппаратуры по причине получения неудовлетворительных результатов на этапах ее испытания, при отсутствии модели изделия ЭКБ или при ее наличии, но низкого качества.

Задача моделирования — сделать процесс проектирования аппаратуры более быстрым, выявить проблемы с изделием на этапе проектирования, а также получить отсутствующие в конструкторской документации данные, необходимые для правиль-

ного применения изделий в аппаратуре. Среди широкого спектра исходных данных внимание акцентируется только на нужных параметрах. Эти параметры можно представить с помощью файла описания изделия ЭКБ в различных стандартах, в том числе IBIS (Input/Output Buffer Information Specification) [1].

Выбор версии формата IBIS-модели

Спецификация IBIS появилась в начале 1990-х, когда компания Intel предоставила своим внешним разработчикам стандартизованный формат для описания блоков ввода-вывода (буферов). Это стало толчком для создания общепринятого индустриального стандарта и побудило Intel обратиться к ведущим разработчикам EDA (Electronic Design Automation — автоматизация проектирования электронных приборов и устройств, САПР электроники) для развития и поддержки этого стандарта. Так была создана спецификация IBIS 1.0. В июне 1993 г. IBIS Version 1.0 была представлена в виде текстового ASCII-файла. Работа продолжалась, и в декабре 1995 г. появилась IBIS Version 2.1, которая была официально принята Национальным институтом США (ANSI) под названием ANSI/EIA-656, в эту версию был включен широкий базовый набор характеристик, пригодный для точного моделирования большинства цифровых буферов. IBIS Version 3.2, содержащая некоторые технические расширения, была выпущена в августе 1999 г. и официально была регламентирована ANSI/EIA-656-A (стандарт, заменивший ANSI/EIA-656). В апреле 2001 г. Международная электротехническая комиссия (IEC) утвердила международный стандарт IBIS под номером IEC 62014-1. В августе 2005 г. Версия 3.2 была обновлена, в нее были включены форматы расширенных характеристик моделирования корпусов и описаний электрических характеристик печатных плат. В июле 2002 г. была представлена IBIS Version 4.0 и принята организацией IBIS Open Forum. В январе 2003 г. была выпущена IBIS Version 4.1. В июне 2006 г. была представлена IBIS Version 4.2 и одобрена IBIS Open Forum, а в сентябре 2006 г. версия была регламентирована ANSI/EIA-656-B. В августе 2008 г. была представлена IBIS Version 5.0, в которую были добавлены алгоритмическая модель интерфейса (AMI) и алгоритм проверки электромагнитной совместимости. IBIS Version 5.1 со значительными уточнениями и расширениями к широко используемому формату AMI была принята организацией IBIS Open Forum в августе 2012 г. Дальнейшие уточнения и расширения к формату AMI были реализованы в сентябре 2013 г. (IBIS Version 6.0), а IBIS Version 6.1 по-

лучила одобрение организацией IBIS Open Forum в сентябре 2015 г. [2].

Таким образом, проведенный анализ развития инструментария IBIS показывает целесообразность построения модели в формате версии 6.1.

Выбор микросхемы

Задачей данного исследования является разработка IBIS-модели типовой современной отечественной микросхемы, которая выполняет функции управления потоками данных в телекоммуникационной аппаратуре. Это концентраторы сетей, обеспечивающие ретрансляцию входящих сигналов с одного из портов в сигнал на все остальные (подключенные) порты, реализуя, таким образом, топологию "общая шина", с разделением пропускной способности сети между всеми устройствами и работой в режиме полудуплекса — передача и прием информации происходят поочередно.

Номенклатура отечественных микросхем, обеспечивающих управление потоками данных в телекоммуникационной аппаратуре, была получена из базы данных "Дейтрон" с помощью поисковых процедур и представлена в табл. 1 [3].

Среди изделий, представленных в таблице, имеются коммутаторы сети, которые в отличие от концентраторов передают данные только непосредственно получателю, тем самым повышают производительность и безопасность сети, избавляя остальные сегменты сети от необходимости (и возможности) обрабатывать данные, которые им не предназначались. Однако коммутаторы являются более сложными устройствами и применение их не всегда целесообразно исходя из соображений затрат, если иное не определено в техническом задании.

В результате проведенного анализа определена типовая микросхема — концентратор сети. В табл. 2 представлена номенклатура концентраторов сети [3].

Из табл. 2 выбрана микросхема 5600BV2U. Она выполняет функции четырехпортового концентратора сетей по протоколу IEEE 802.3/Ethernet. Данная микросхема применяется как для специальной техники, так и для общедоступной. Она предназначена для построения на ее основе концентратора Ethernet 10Base-T индустриального исполнения, функционирует как четырехпортовый коммутатор по стандарту IEEE 802.3 10Base-T. Кроме того, в состав микросхемы входит порт расширения для объединения нескольких микросхем в целях увеличения числа каналов и порт светодиодной индикации для отображения состояния сети (подключение канала, передача данных, блокировка канала, коллизии). Микросхема имеет встроенный синтезатор частоты (PLL) [4].

Номенклатура отечественных микросхем, обеспечивающих управление потоками данных в телекоммуникационной аппаратуре
Nomenclature of the domestic microcircuits, which ensure control of the data flows in the telecommunication equipment

Условное обозначение изделия <i>Product designation</i>	Условное обозначение конструкторской документации (КД) <i>Designation of the design documentation (DD)</i>	Дата поступившей конструкторской документации (КД) <i>Date of acquisition of the design documentation (DD)</i>	Категория качества <i>Quality category</i>	Функциональное назначение <i>Functional purpose</i>	Разработчик <i>Developer</i>
1839BV1Ф	АЕЯР.431200.005-04 ТУ	03.03.2006	5	Схема управления вводом-выводом (схема интерфейса) <i>Input-output control circuit (interface circuit)</i>	ОАО "Ангстрем" <i>Angstrom Co.</i>
5600BV1У	АЕЯР.431290.563 ТУ	10.10.2007	5	Четырехпортовый концентратор сетей, соответствующих стандарту IEEE 802.3 <i>Four-port network concentrator corresponding to IEEE 802.3 standard</i>	ОАО "НИИМЭ и Микрон" <i>NIIME and Micron Co.</i>
1875BV1Т	АЕЯР.431290.120 ТУ	14.12.2008	5	Адаптер цифровых каналов ввода-вывода <i>Adapter of the digital input-output channels</i>	ЗАО "Светлана — Полупроводники" <i>Svetlana-semiconductor Co.</i>
5600BV2У	АЕЯР.431290.731 ТУ	03.05.2011	5	Четырехпортовый концентратор сетей по протоколу IEEE 802.3/Ethernet <i>Four-port network concentrator under IEEE 802.3/Ethernet protocol</i>	АО "ПКК Миландр" <i>PKK Milandr Co.</i>
5559BV014	АЕЯР.431230.964 ТУ	15.01.2015	5	Приемопередатчик по стандарту RS-232 <i>RS-232 standard transceiver</i>	ФГУП "ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова" <i>NIIS named after J. E. Sedakov</i>
1825BV1H2AM	АЕЯР.431200.772-14 ТУ	16.03.2015	5	Последовательный интерфейс КОДЕК-2 <i>KODEK-2 serial interface</i>	ОАО "Ангстрем" <i>Angstrom Co.</i>
2011BV014	АЕЯР.431230.880 ТУ	01.04.2015	5	Приемопередатчик с гальванической развязкой <i>Transceiver with a galvanic isolation</i>	АО "ПКК Миландр" <i>PKK Milandr Co.</i>
2011BV024	АЕЯР.431230.880 ТУ	01.04.2015	5	Приемопередатчик по стандарту RS-485 с гальванической развязкой <i>RS-485 standard transceiver with a galvanic isolation</i>	АО "ПКК Миландр" <i>PKK Milandr Co.</i>
2011BV034	АЕЯР.431230.880 ТУ	01.04.2015	5	Приемопередатчик по стандарту CAN с гальванической развязкой <i>CAN standard transceiver with a galvanic isolation</i>	АО "ПКК Миландр" <i>PKK Milandr Co.</i>
1825BV1TAM	АЕНВ.431200.173 ТУ	22.06.2015	5	Последовательный интерфейс КОДЕК-2 <i>KODEK-2 serial interface</i>	ОАО "Ангстрем" <i>Angstrom Co.</i>
K5537BV015	АДКБ.431230.276 ТУ	15.07.2015	1	Четырехканальный передатчик с LVDS-интерфейсом <i>Four-channel transmitter with LVDS interface</i>	ОАО "НИИЭТ НИИЕТ Со." <i>NIJET Co.</i>
K5537BV025	АДКБ.431230.277 ТУ	15.07.2015	1	Четырехканальный передатчик с LVDS-интерфейсом <i>Four-channel transmitter with LVDS interface</i>	ОАО "НИИЭТ НИИЕТ Со." <i>NIJET Co.</i>
5600BV3Т	АЕНВ.431290.084 ТУ	24.12.2015	5	Четырехканальный коммутатор сетей протокола IEEE 802.3/Ethernet 10/100 Мбит/с <i>Four-channel network exchange under IEEE 802.3/Ethernet protocol 10/100 Mbit/s</i>	АО "ПКК Миландр" <i>PKK Milandr Co.</i>
1825BV1TAM	АЕНВ.431200.173 ТУ	02.03.2016	5	Последовательный интерфейс КОДЕК-2 <i>KODEK-2 serial interface</i>	ОАО "Ангстрем" <i>Angstrom Co.</i>
K5537BV015	АДКБ.431230.276 ТУ	24.10.2016	1	Четырехканальный передатчик с LVDS-интерфейсом <i>Four-channel transmitter with LVDS interface</i>	ОАО "НИИЭТ НИИЕТ Со." <i>NIJET Co.</i>

Номенклатура концентраторов сети
Nomenclature of the network concentrators

Условное обозначение изделия <i>Product designation</i>	Условное обозначение конструкторской документации (КД) <i>Designation of the design documentation (DD)</i>	Дата поступившей конструкторской документации (КД) <i>Date of acquisition of the design documentation (DD)</i>	Категория качества <i>Quality category</i>	Функциональное назначение <i>Functional purpose</i>	Разработчик <i>Developer</i>
5600BB1У	АЕЯР.431290.563 ТУ	10.10.2007	5	Четырехпортовый концентратор сетей, соответствующих стандарту IEEE 802.3 Four-port network concentrator corresponding to IEEE 802.3 standard	ОАО "НИИМЭ и Микрон" <i>NIIME and Micron Co.</i>
5600BB2У	АЕЯР.431290.731 ТУ	03.05.2011	5	Четырехпортовый концентратор сетей по протоколу IEEE 802.3/Ethernet Four-port network concentrator under IEEE 802.3/Ethernet protocol	АО "ПКК Миландр" <i>PKK Milandr Co.</i>
1892ХДЗЯ	АЕЯР.431260.821 ТУ	18.07.2012	5	64-канальный концентратор для систем обработки сигналов со встроенными LVDS-каналами 64-channel concentrator for the signals processing systems with embedded LVDS channels	ОАО НПЦ "ЭЛВИС" <i>NPTs ELVIS Co.</i>

Параметры микросхемы:

Напряжение питания U_{CC} , В 4,5–5,5
 Число каналов приема/передачи данных 4
 Температурный диапазон, °С –60...85
 Входное напряжение низкого уровня на цифровых входах U_{IL} , В 0...(0,2* U_{CC})
 Входное напряжение высокого уровня на цифровых входах U_{IH} , В (0,8* U_{CC})... U_{CC}
 Дифференциальное входное напряжение U_{IT} , мВ 500... U_{CC}
 Выходной ток низкого/высокого уровня I_{OH} , I_{OL} , мА не более $|\pm 6|$
 Частота следования импульсов тактовых сигналов в режиме обхода f_C , МГц не более 80
 Частота следования импульсов тактовых сигналов в режиме умножения частоты f_C , МГц не более 80
 Время нарастания и спада входного тактового сигнала t_r , t_f , нс не более 3
 Минимальная длительность сигнала сброса t_{MCLR} , нс не менее 100
 Емкость нагрузки по цифровым и аналоговым выходам C_L , пФ не более 60

Разработка IBIS-модели

В основе разработки были поставлены форматы, описанные зарубежными стандартами IBIS Version 6.1, ANSI/EIA-656, в которых представлены структура IBIS-модели и основные ключевые слова, а также технические условия на микросхему и ее корпус.

Описанные ключевые слова представлены ниже:

[IBIS Ver] — определяет версию IBIS-модели;

[File Name] — определяет имя ibs. файла;

[File Rev] — указывает версию редакции файла, устанавливается по усмотрению разработчика модели;

[Date], [Source] — указывают дату последней редакции и источник информации (необязательные ключевые слова);

[Manufacturer] — указывает наименование производителя микросхемы;

[Package] — определяет диапазон значений сопротивления, индуктивности и емкости корпуса;

[Pin] — описывает выводы микросхемы;

[Package Model] — определяет условное обозначение корпуса;

[Notes] — используется для любых специальных примечаний относительно содержания файла;

[Disclaimer] — дополнительная информация;

[Component] — условное обозначение микросхемы;

[Model] — используется для описания модели и ее характеристик.

В ключевом слове [Model] используются следующие подпараметры:

Model_type — определяет тип модели (Input, Output, I/O и т. д.);

Enable — указывает уровень управляющего сигнала, активирующего буфер;

Cref — емкость нагрузки при изменении временных характеристик;

Temperature Range — определяет температурный диапазон, в котором проводились измерения характеристик модели.

Ниже представлена разработка IBIS-модели на микросхему 5600BB2У:

```

*****
|
|           Central design office "Deyton"
|
*****
[IBIS Ver]      6.1
[File Name]    5600VV2U.ibs
[File Rev]     1.0
[Date]        January 17, 2017
    
```

[Source] Modeled from manufacturer's data book at Deyton

[Notes] The present device — four-port hub for IEEE 802.3/
Ethernet protocol networks

[Disclaimer] This file is only for evaluation purposes.
No express warranty is implied.
Simulation based dependencies contained in this model file are considered preliminary until verified against bench measurements.

Component 5600VV2U

[Component] 5600VV2U
[Manufacturer] MILANDR
[Package]

variable	typ	min	max
R_pkg	0,135Om	0.08Om	0,19Om
L_pkg	7,75nH	5nH	10nH
C_pkg	1,295pF	0,99pF	1,6pF

[Pin] signal_name model_name | Фрагмент
используемых для
разработки
выводов

1	chain_i	NA	
2	Ucc	Icc_Temp, Iocc_Temp, Icc_Ucc, Iocc_Ucc	
3	GND	GND	
62	NC	NC	
63	chain_o	Uoh_KIL_ILnom, Uol_KIL_ILnom, Uoh_Temp, Uol_Temp, Uoh_Ucc, Uol_Ucc	
64	request_n	Uoh_KIL_ILnom, Uol_KIL_ILnom, Uoh_Temp, Uol_Temp, Uoh_Ucc, Uol_Ucc	

[Package Model] ZPP-SMT-64-pin-pkgs
[Model] Uoh_Ucc
[Model_type] I/O
Cref = 60pF
IL = 6mA

[Temperature Range]	25.0	85.0	-60.0
[Voltage]	V(typ)	V(min)	V(max)
4.3	4.07V	NA	NA
4.5	4.31V	NA	NA
4.7	4.54V	NA	NA

4.9	4.77V	NA	NA
5.1	4.85V	NA	NA
5.3	5.15V	NA	NA
5.5	5.38V	NA	NA
[Model]	Iocc_Ucc		
[Model_type]	I/O		
Cref = 60pF			
[Temperature Range]	25.0	85.0	-60.0
[Voltage]	I(typ)	I(min)	I(max)
4.3	115.5mA	NA	NA
4.5	120mA	NA	NA
4.7	124.4mA	NA	NA
4.9	128.8mA	NA	NA
5.1	133.3mA	NA	NA
5.3	137.7mA	NA	NA
5.5	144.4mA	NA	NA
[Model]	Uoh_KIL_ILnom		
[Model_type]	I/O		
Cref = 60pF			
[Temperature Range]	25.0	85.0	-60.0
ILnom = 6mA			
KIL_ILnom = IL/ILnom			
[KIL_ILnom]	V(typ)	V(min)	V(max)
0.3	4.45V	4.45V	4.46V
0.5	4.42V	4.4V	4.44V
0.7	4.38V	4.36V	4.4V
0.9	4.35V	4.33V	4.38V
1.1	4.32V	4.28V	4.35V
1.3	4.27V	4.23V	4.32V
1.5	4.25V	4.2V	4.3V
1.7	4.22V	4.15V	4.27V
1.9	4.17V	4.11V	4.24V
[End]			

Заключение

В ходе исследования были изучены требования к построению модели, нормативная и техническая документация, а также разработана IBIS-модель для четырехпортового концентратора сети. Данную модель предполагается использовать в САПР разработчиками аппаратуры, в том числе при моделировании ее работы средствами "АСОНИКА". Исследования показали — чем больше информации в модели, тем точнее она симулирует конкретное изделие при проектировании.

Список литературы

1. Кечиев Л. Н., Лемешко Н. В. Моделирование цифровых устройств с использованием IBIS-Описания. М.: Изд-во МИЭМ, 2006. 243 с.
2. IBIS, version 6.1, 2015. С. 1—154. URL: <http://ibis.org> (дата обращения: 21.12.2016).
3. Информационная поисковая система "Дейтрон". URL: <http://www.deyton.ru/basedemo.php> (дата обращения: 14.02.2017).
4. Документация на радиационно-стойкий коммутатор SpaceWire 1892КП1Я. URL: <http://multicore.ru/index.php?id=1334> (дата обращения: 14.02.2017).

Yu. V. Rubtsov, General Director of Central design office "Deyton", Head of Chair, Rubtsov@Deyton.ru,
A. V. Alekseeva, Student, Lab Technician of Central design office "Deyton", alekseeva@deyton.ru
National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russian Federation

Development of an IBIS Model of Microcircuits of the Network Concentrators Applied for Designing of Telecommunication Equipment

Corresponding author:

Alekseeva Anastasia V., Student, National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russian Federation,
e-mail: alekseeva@deyton.ru

Received on March 21, 2017

Accepted on April 3, 2017

The existing nomenclature of domestic microcircuits is analyzed. The choice of a microcircuit for research is justified. The parameters of the microcircuit, the review of the IBIS standard, the chronology of creating versions of IBIS models, theoretical information about IBIS modeling are presented. The IBIS model was developed.

Keywords: IBIS, telecommunication equipment, model, microcircuit, computer aided design, electronic component base, product, quality

For citation:

Rubtsov Yu. V., Alekseeva A. V. Development of an IBIS Model of Microcircuits of the Network Concentrators Applied for Designing of Telecommunication Equipment, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 352–359.

DOI: 10.17587/nmst19.352-359

Introduction

The demands to the parameters and quality indicators of the telecommunication equipment compel the developers to apply advanced designing tools. They should know well the nomenclature of products of the electronic component base (ECB), which becomes wider and wider, they should understand the essence of the physical processes in the products made by various technologies, be able to calculate the units and nodes of different functions, and apply the advanced measuring equipment. Implementation of such tasks is impossible without CAD, the basis of which comprises the models of ECB products.

The practice of development of the telecommunication equipment envisages the use of various CADs. For each CAD there is an algorithm of functioning and a format of presentation of models of ECB products. The main developers of CAD are the foreign companies, which are oriented on the models of foreign manufacturers of ECB products and advance them, admit replenishment of the libraries with new models, including the products of the Russian manufactures.

Growth of the nomenclature of the domestic ECB products dictates a necessity for creation of a library of the models, which describe the rules of their functioning in equipment, including telecommunication equipment. Without such models the manufacturers and the designers of the telecommunication equipment bear losses, lose the means and the time for finalization of the equipment because of the unsatisfactory results at the stages of its tests due to the absence of a model of ECB product or its poor quality.

The task of modeling is to make the process of equipment designing faster, to reveal problems with a product at the stage of designing, and also to obtain the data unavailable in the design documentation, but necessary for a correct application of the products in equip-

ment. Among the wide spectrum of the initial data the emphasis is made only on the necessary parameters. It is possible to present these parameters by means of a file describing an ECB product in various standards, including IBIS (Input/Output Buffer Information Specification) [1].

Selection of a version of an IBIS-model format

IBIS specification appeared in early 1990s, when Intel provided to the external developers a standardized format for description of the input-output units (buffers). It gave an impetus to development of a generally accepted industrial standard and encouraged Intel to address the leading developers of EDA (Electronic Design Automation — automation of designing of the electronic instruments and devices, CAD of electronics) with an appeal to develop and support this standard. Thus IBIS 1.0 specification was created. In June, 1993, IBIS Version 1.0 was presented in the form of a text ASCII file. The work was continued, and in December, 1995, IBIS Version 2.1 appeared, which was officially accepted by the National Institute of the USA (ANSI) under the name ANSI/EIA-656. This version included a wide basic set of characteristics, suitable for an accurate modeling of most of the digital buffers. IBIS Version 3.2, containing certain technical extensions, was introduced in August, 1999, and ANSI/EIA-656-A (the standard, which has replaced ANSI/EIA-656) was officially regulated. In April, 2001, the International Electrotechnical Commission (IEC) approved IBIS international standard under the number of IEC 62014-1. In August, 2005, Version 3.2 was updated and it included formats of the expanded characteristics of modeling of the cases and descriptions of the electric characteristics of the printed-circuit boards. In July, 2002, IBIS Version 4.0 was presented and accepted by the organ-

ization of IBIS Open Forum. In January, 2003, IBIS Version 4.1 was introduced. In June, 2006, IBIS Version 4.2 was presented and approved by IBIS Open Forum, while in September, 2006, ANSI/EIA-656-B version was regulated. In August, 2008, IBIS Version 5.0 was presented, to which the algorithmic model of interface (AMI) and the algorithm for checking of electromagnetic compatibility were added. IBIS Version 5.1 with considerable amendments and extensions to the widely used AMI format was accepted by IBIS Open Forum in August, 2012. The further amendments and extensions to AMI format were realized in September, 2013 (IBIS Version 6.0), while IBIS Version 6.1 was approved by IBIS Open Forum in September, 2015 [2].

Thus, an analysis of the development of IBIS instruments shows expediency of construction of a model in 6.1 format version.

Microcircuit selection

The task of the research is development of IBIS model of a typical domestic microcircuit, which performs the functions of control of the data flows in the telecommunication equipment. These are the concentrators of the networks, which ensure relaying of the incoming signals from one of the ports into a signal to all the connected ports, realizing the "common bus" topology with division of the transmission capacity of a network between all the devices and operation in a semiduplex mode — the transmission and reception of information are implemented in turn.

The nomenclature of the domestic microcircuits, which ensure control of the data flows in the telecommunication equipment, was obtained from Deitron database by means of the search procedures and is presented in table 1 [3].

Among the products presented in table 1 there are network exchanges, which, unlike the concentrators, transfer data only directly to an addressee, thereby they raise productivity and security of a network, relieving other segments of the network from the necessity (and possibility) to process the data, not intended for them. However, the exchanges are more complex devices and their application is not always expedient proceeding from the cost reasons, if the specification requirements do not define it otherwise.

As a result of the implemented analysis a typical microcircuit—network concentrator was determined. The nomenclature of the network concentrators is presented in table 2 [3].

The 5600BB2Y microcircuit was chosen from table 2. It performs the functions of a four-port network concentrator under IEEE 802.3/Ethernet protocol. The given microcircuit is applied for the special and accessible technologies. It is intended for the industrial version of Ethernet 10Base-T concentrator, and it functions as a four-port exchange complying with the IEEE 802.3 10Base standard. Besides, the microcircuit structure includes an extension port for integration of several

microcircuits and increasing the number of channels, and a port for a light-emitting diode indication for displaying of the state of a network (channel connection, data transmission, blocking of a channel, collision). The microcircuit has an embedded frequency synthesizer (PLL) [4].

Microcircuit parameters:

Voltage of power supply U_{CC} , V	4.5—5.5 V
Number of channels for data reception/transmission	4
Temperature range, °C	–60...85
Input voltage of low level at digital inputs U_{IL} , V	$0—(0.2*U_{CC})$
Input voltage of high level at digital inputs U_{IH} , V	$(0.8*U_{CC}) - U_{CC}$
Differential input voltage U_{IT} , mV	$500 - U_{CC}$
Output current of low/high level	
I_{OH} , I_{OL} , mA	not more than $ \pm 6 $
Repetition frequency of the impulses of the clock signals in a bypass mode f_C , MHz	not more than 80
Repetition frequency of the impulses of clock signals in the mode of frequency multiplication f_C , MHz	not more than 80
Time of increase and decrease of the input the clock signal t_r , t_f , nanoseconds	not more than 3
Minimal duration of a reset signal t_{MCLR} , nanoseconds	not less than 100
Load capacitance on the digital and analogue outputs C_L , pF	not more than 60

Development of IBIS model

The development is based on the formats, described by foreign standards of IBIS Version 6.1, ANSI/EIA-656, which present the structure of IBIS model and the main keywords, and also the technical requirements for the microcircuit and its package.

The described keywords are presented below:

[IBIS Ver] — Version of an IBIS model;

[File Name] — Name of ibs. file;

[File Rev] — Specifies a version of the edition file, provided at the discretion of the developer of the model;

[Date], [Source] — Date of the latest edition and information source (optional keywords);

[Manufacturer] — Name of the manufacturer of a microcircuit;

[Package] — Specifies the range of resistance, inductance and package capacity;

[Pin] — Describes the microcircuit's lead;

[Package Model] — Specifies the symbol of a package;

[Notes] — Applied for any special notes concerning the file content;

[Disclaimer] — Additional information;

[Component] — Symbol of a microcircuit;

[Model] — Applied for description of a model and its characteristics.

The keyword [Model] uses the following subparameters:

Model_type — Specifies the model type (Input, Output, I/O, etc.);

Enable — Specifies the level of the control signal activating the buffer;

Cref — Load capacitance during a change of the time characteristics;

Temperature Range — The temperature range, within which the measurements of the model characteristics were done.

Below is IBIS model developed for microcircuit 5600VV2U:

```

*****
|
|      Deyton Central Design Office
|
*****
[IBIS Ver]      6.1
[File Name]    5600VV2U.ibs
[File Rev]     1.0
[Date]        January 17, 2017
[Source]      Modeled from manufacturer's data
              book at Deyton
[Notes]       The present device — four-port hub
              for IEEE 802.3/
              Ethernet protocol networks
[Disclaimer]   This file is only for evaluation purposes.
              No express warranty is implied.
              Simulation based dependencies
              contained in this model file are
              considered preliminary until verified
              against bench measurements.
*****
|
|      Component 5600VV2U
|
*****
|[Manufacturer] MILANDR
|[Package]
|variable      type      min      max
|R_pkg         0.135Om    0.08Om    0.19Om
|L_pkg         7,75nH     5nH       10nH
|C_pkg         1.295pF     0.99pF    1.6pF
|[Pin]         signal_name model_name | Fragments
              of the outlets used
              for the development
1      chain_i    NA      |
2      Ucc        Icc_Temp,
              Iocc_Temp,
              Icc_Ucc,
              Iocc_Ucc
3      GND        GND
62     NC         NC
63     chain_o    Uoh_KIL_ILnom,
              Uol_KIL_ILnom,
              Uoh_Temp,
              Uol_Temp,
              Uoh_Ucc,
              Uol_Ucc
64     request_n Uoh_KIL_ILnom,
              Uol_KIL_ILnom,
              Uoh_Temp,
              Uol_Temp,
              Uoh_Ucc,
              Uol_Ucc
|[Package Model] ZPP-SMT-64-pin-pkgs
|[Model]         Uoh_Ucc
|Model_type     I/O
|Cref = 60pF

```

```

IL = 6mA
[Temperature Range] 25.0      85.0      -60.0
[Voltage]           V(typ)    V(min)    V(max)
4.3                 4.07V    NA        NA
4.5                 4.31V    NA        NA
4.7                 4.54V    NA        NA
4.9                 4.77V    NA        NA
5.1                 4.85V    NA        NA
5.3                 5.15V    NA        NA
5.5                 5.38V    NA        NA
[Model]             Iocc_Ucc
|Model_type         I/O
|Cref = 60pF
[Temperature Range] 25.0      85.0      -60.0
[Voltage]           I(typ)    I(min)    I(max)
4.3                 115.5mA  NA        NA
4.5                 120mA    NA        NA
4.7                 124.4mA  NA        NA
4.9                 128.8mA  NA        NA
5.1                 133.3mA  NA        NA
5.3                 137.7mA  NA        NA
5.5                 144.4mA  NA        NA
[Model]             Uoh_KIL_ILnom
|Model_type         I/O
|Cref = 60pF
[Temperature Range] 25.0      85.0      -60.0
|ILnom = 6mA
|KIL_ILnom = IL/ILnom
|[KIL_ILnom]       V(typ)    V(min)    V(max)
0.3                 4.45V    4.45V    4.46V
0.5                 4.42V    4.4V     4.44V
0.7                 4.38V    4.36V    4.4V
0.9                 4.35V    4.33V    4.38V
1.1                 4.32V    4.28V    4.35V
1.3                 4.27V    4.23V    4.32V
1.5                 4.25V    4.2V     4.3V
1.7                 4.22V    4.15V    4.27V
1.9                 4.17V    4.11V    4.24V
|[End]

```

Conclusion

The study explored the requirements for building models, normative and technical documentation developed by the IBIS model for the Quad port network hub. The model is supposed to be used with CAD software developers equipment, including the modeling of its work means of ACONIKA. Studies have shown that the more information in the model, the more accurate it simulates specific product in the design.

References

1. **Kechiev L. N., Lemeshko N. V.** *Modelirovanie cifrovyyh ustrojstv s ispol'zovaniem IBIS-Opisanija*. Moscow, Izd-vo MIEM, 2006. 243 p. (in Russian).
2. **IBIS**, version 6.1, 2015, pp. 1—154. URL: <http://ibis.org> (date of the application: 21.12.2016).
3. **Informacionnaja** poiskovaja sistema "Dejtron". URL: <http://www.deyton.ru/basedemo.php> (date of the application: 14.02.2017) (in Russian).
4. **Dokumentacija** na radiacionno-stojkij kommutator Space-Wire 1892KP1Ja. URL: <http://multicore.ru/index.php?id=1334> (date of the application: 14.02.2017) (in Russian).

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ Micro- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 519.63:621.37:621.3.049.76

DOI: 10.17587/nmst.19.360-369

В. П. Драгунов, д-р техн. наук, проф., e-mail: drag@adm.nstu.ru, **Д. Е. Киселев**, магистрант, e-mail: heroes-00@mail.ru, **Р. Е. Синицкий**, магистрант, e-mail: sinitsky.rodion@yandex.ru, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В МЭМС С НЕПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Поступила в редакцию 17.02.2017

Представлены результаты исследований влияния непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов для двух режимов работы. Получены выражения для расчета электростатических сил, критических напряжений и зарядов при различных наклонах электродов. Обнаружено, что в режиме с контролируемым зарядом в двухэлектродных МЭМС с непараллельными электродами возникает pull-in-эффект. Показано, что в режиме с контролируемым зарядом в МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов при увеличении угла наклона электродов значение критического заряда сначала увеличивается, а затем уменьшается. Найдено, что максимальное значение критического заряда в этом случае достигается при $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, а значение λ в максимуме равно 1,17.

Ключевые слова: МЭМС, конденсатор, непараллельные электроды, электрическая емкость, электрическая сила, статическое равновесие, pull-in-эффект

Введение

Миниатюризация элементов управляющих комплексов и информационных систем привела к появлению микромеханических систем, формируемых на основе интегральных технологий микроэлектроники, и интенсивному расширению области их применения.

Среди различных микромеханических систем существенное место занимают микроэлектромеханические системы (МЭМС), основанные на электростатическом принципе действия. При этом их составляющие (компоненты, узлы, детали) в максимальной степени сочетаются с требованиями планарной технологии, что, в свою очередь, позволяет достичь высоких эксплуатационных и технико-экономических показателей.

Анализируя внутреннюю структуру изделий микросистемной техники, следует отметить, что в них реализуется целая совокупность разнообразных связей и взаимодействий: механических, электрических, оптических и т. д. Особенно ярко это проявляется в случае микроэлектромеханических систем, где именно электромеханические взаимодействия чаще всего ограничивают предельно допустимые параметры и предельно достижимые характеристики системы [1–4].

Современные микроэлектромеханические системы конструктивно и функционально представляют собой достаточно сложные объекты, состоящие из большого числа взаимосвязанных подсистем и элементов. Между тем резкое увеличение стоимости вновь разрабатываемых систем выдвигает требования по снижению числа испытаний и уточнению математических моделей, используемых при проектировании.

Теоретическое исследование процессов, сопровождающих работу МЭМС, связано со значительными математическими трудностями и требует применения эффективных методов решения. В связи с этим большое значение приобретает нахождение аналитических решений, дающих наглядные представления о направлениях поиска оптимальных решений, необходимых для проведения оценок на этапе предварительного проектирования, локализации областей оптимальных решений и отыскания эффективных начальных приближений для последующих более точных, но "неповоротливых" и длительных расчетов с использованием стандартных пакетов программ.

Основным элементом МЭМС, как правило, является переменный конденсатор, изготавливаемый с использованием интегральных технологий. Имен-

но его характеристики в наибольшей степени и определяют характеристики всей МЭМС. В результате при разработке электростатических МЭМС возникает необходимость в оценке электрической емкости и электростатических сил, действующих между различными частями конструкции [5–11].

Анализ показывает, что в большинстве случаев при оценке электрической емкости и электростатических сил используют модели МЭМС с параллельными электродами. Однако реально существующие технологии не позволяют гарантировать параллельность электродов, тем более в условиях серийного производства. При этом непараллельность электродов может появляться вследствие технологических погрешностей при изготовлении и сборке устройства [12, 13], а также в процессе эксплуатации при изменении направления движения системы вследствие появления вращающих моментов.

В данной работе проводится исследование влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов.

МЭМС с двухэлектродной конструкцией электродов

В качестве объекта исследования влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной конструкцией электродов была использована двухэлектродная модель конденсатора, содержащая два плоских непараллельных проводящих электрода (рис. 1), один из которых (подвижный электрод), закрепленный на упругих подвесах, может смещаться относительно другого (неподвижного). В расчетах принимали, что электроды имеют длину a , ширину b , минимальный межэлектродный зазор d , максимальный межэлектродный зазор $(d + \Delta)$ и межэлектродный зазор при параллельных электродах $d_0 = d$. Полагали также, что при смещении подвижного электрода его угол наклона α не изменяется.

Если пренебречь особенностями распределения электрического поля у краев электродов (краевыми эффектами), зависимость емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от геометрических размеров при малых α можно представить в следующем виде:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{\Delta} \ln\left(\frac{d + \Delta}{d}\right), \quad (1)$$

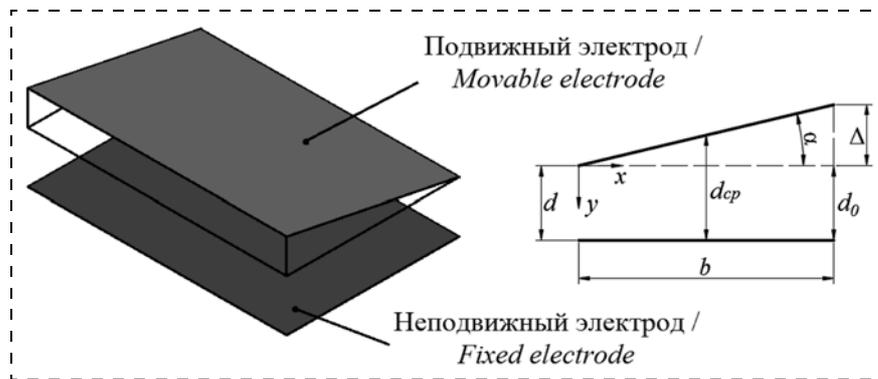


Рис. 1. Модель двухэлектродной МЭМС с непараллельными электродами
Fig. 1. Schematic view of MEMS model with non-parallel two-electrode structure

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами; ε_0 — электрическая постоянная.

Режим с контролируемым напряжением. При изменении межэлектродного зазора и сохранении значения заданного напряжения V между электродами конденсатора с учетом (1) выражение для электростатической силы притяжения, действующей на площадку $a \cdot dx$, при малых α принимает следующий вид:

$$dF = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a V^2 dx}{(\operatorname{tg}(\alpha)x + d)^2}, \quad (2)$$

где x — координата точки приложения силы (x -координата площадки $a \cdot dx$). Таким образом, в конденсаторе с непараллельными электродами электростатическая сила изменяется по ширине электрода b , что необходимо учитывать при проектировании упругих подвесов электродов.

Для анализа поведения подвижных элементов МЭМС с непараллельными электродами в режиме с контролируемым напряжением можно использовать эффективное значение электростатической силы. Без учета краевых эффектов с использованием формулы (2) выражение для эффективной электростатической силы притяжения, действующей на непараллельные электроды, при постоянном напряжении и неизменном угле наклона электродов α принимает вид:

$$F_{eff, V} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon a V^2 \int_0^b \frac{dx}{(\operatorname{tg}(\alpha)x + d - y)^2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b V^2}{2d^2(1-z)(\tilde{\Delta} + 1 - z)} = \frac{F_{0, V}(1-z)}{(1 + \tilde{\Delta} - z)}, \quad (3)$$

где $\tilde{\Delta} = \Delta/d$, $z = y/d$, $F_{0, V} = \varepsilon_0 \varepsilon a b V^2 / [2d_0^2(1-z)^2]$ — электростатическая сила притяжения, действующая в аналогичном конденсаторе, но с параллельными электродами и межэлектродным зазором $d_0 = d$.

Таким образом, в конденсаторе с непараллельными электродами эффективная электростатическая сила будет в $(1 - z)/(1 + \tilde{\Delta} - z)$ раз меньше, чем в конденсаторе с параллельными электродами. С увеличением угла наклона подвижного электрода, а следовательно, и среднего расстояния между электродами d_{cp} электростатическая сила уменьшается.

Непараллельность электродов сказывается не только на оценках значения емкости и электростатической силы, но и на значении диапазона контролируемого смещения подвижного электрода и критического напряжения, при превышении которого подвижный электрод начнет неуправляемо сближаться с неподвижным до их соприкосновения (*pull-in*-эффект).

Полагая, что при очень медленном увеличении приложенного напряжения (квазистатический случай) на электроды действуют только возвращающая сила упругости подвеса, пропорциональная смещению подвижного электрода, и электрическая сила притяжения (3), уравнение равновесия (баланса сил) можно представить в виде:

$$-kdz + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2}{2d^2(1-z)(\tilde{\Delta} + 1 - z)} = 0, \quad (4)$$

где k — жесткость упругого подвеса подвижного электрода.

Согласно (4) максимальное значение управляемого смещения подвижного электрода к неподвижному (критическое значение) от положения, соответствующего отсутствию напряжения, равно

$$y_{cr,V} = \frac{d}{3} \left(2 + \tilde{\Delta} - \sqrt{1 + \tilde{\Delta} + \tilde{\Delta}^2} \right) = y_{cr,0} \left(2 + \tilde{\Delta} - \sqrt{1 + \tilde{\Delta} + \tilde{\Delta}^2} \right), \quad (5)$$

где $y_{cr,0} = d_0/3$ — критическое смещение в МЭМС с параллельными электродами и межэлектродным зазором $d_0 = d$.

С учетом (5) выражение для оценки критического напряжения в данном случае можно представить в виде:

$$V_{pi} = \pm \sqrt{2ky_{cr,V}(d - y_{cr,V})(d + \tilde{\Delta} - y_{cr,V})/(\varepsilon_0 \varepsilon ab)}. \quad (6)$$

При параллельных электродах выражение (6) преобразуется к известному виду:

$$V_{pi,0} = \pm \sqrt{8kd_0^3/(27\varepsilon_0 \varepsilon ab)}.$$

Таким образом, в МЭМС с двумя непараллельными электродами в режиме работы с контролируемым напряжением значения критического напряжения и критического смещения возрастают по

сравнению с соответствующими значениями при параллельных электродах и межэлектродным зазором $d_0 = d$, что вызвано увеличением среднего расстояния между электродами d_{cp} и уменьшением емкости конденсатора и электростатической силы при увеличении угла наклона подвижного электрода.

Режим с контролируемым зарядом. Кроме режима с контролируемым напряжением, в МЭМС используется и режим с контролируемым зарядом.

При изменении межэлектродного зазора и сохранении значения заданного полного заряда Q_{com} на электродах конденсатора с учетом (1) выражение для эффективной электростатической силы притяжения при малых α принимает вид:

$$F_{eff,Q} = F_{0,Q} \frac{\tilde{\Delta}^2}{(1 + \tilde{\Delta} - z)(1 - z) \ln^2 \left(\frac{1 + \tilde{\Delta} - z}{1 - z} \right)}, \quad (7)$$

где $F_{0,Q} = Q_{com}^2 / (2\varepsilon_0 \varepsilon ab)$ — электростатическая сила притяжения, действующая при неизменном заряде в конденсаторе с двумя параллельными электродами и межэлектродным зазором $d_0 = d$. Согласно (7) при увеличении угла наклона электродов электростатическая сила при неизменном заряде увеличивается.

Полагая, как и ранее, что в квазистатическом случае на электроды действуют только возвращающая сила упругости подвеса ky и электрическая сила притяжения (7), можно показать, что при непараллельных электродах в режиме с контролируемым зарядом возникает *pull-in*-эффект в отличие от случая с параллельными электродами, где *pull-in*-эффект не возникает.

На рис. 2 приведена зависимость изменения межэлектродного зазора z от безразмерного заряда λ :

$$\lambda = Q_{com} / \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon abdk} = \pm \frac{1}{\tilde{\Delta}} \ln^2 \left(\frac{1 + \tilde{\Delta} - z}{1 - z} \right) \sqrt{z(1 - z)(1 + \tilde{\Delta} - z)}, \quad (8)$$

рассчитанная с использованием (8) при нескольких значениях $\tilde{\Delta}$.

Согласно (8) и рис. 2, с увеличением относительного наклона электродов значение критического заряда, при превышении которого возникает *pull-in*-эффект, уменьшается, что связано с увеличением электростатической силы. При этом уменьшается и диапазон управляемого смещения подвижного электрода.

Анализ показывает, что при очень медленном увеличении полного заряда для оценки критического значения смещения подвижного электрода

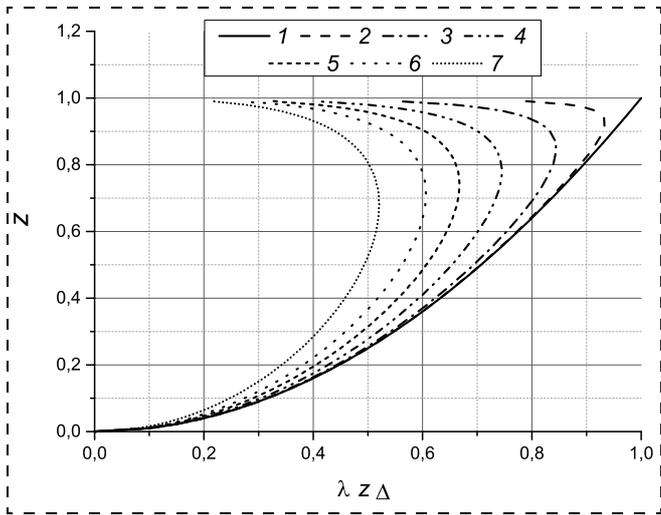


Рис. 2. Зависимость изменения межэлектродного зазора z от безразмерного заряда λ : 1 — $\tilde{\lambda} = 0$; 2 — $\tilde{\lambda} = 0,1$; 3 — $\tilde{\lambda} = 0,5$; 4 — $\tilde{\lambda} = 1,5$; 5 — $\tilde{\lambda} = 3$; 6 — $\tilde{\lambda} = 5$; 7 — $\tilde{\lambda} = 10$

Fig. 2. Relation between variation of electrode gap z and dimensionless charge λ : 1 — $\tilde{\lambda} = 0$; 2 — $\tilde{\lambda} = 0.1$; 3 — $\tilde{\lambda} = 0.5$; 4 — $\tilde{\lambda} = 1.5$; 5 — $\tilde{\lambda} = 3$; 6 — $\tilde{\lambda} = 5$; 7 — $\tilde{\lambda} = 10$

от положения равновесия к неподвижному можно предложить следующее выражение:

$$y_{cr, Q} \approx d \left(1 + 0,0637\tilde{\Delta} - \sqrt{0,0637\tilde{\Delta}(1 + 0,035\tilde{\Delta})} \right),$$

аппроксимирующее зависимость критического смещения от $\tilde{\Delta} = \Delta/d$ для $0 < \tilde{\Delta} \leq 7$ с погрешностью, не превышающей 1 %. В свою очередь, выражение для оценки критического заряда, при превышении которого электроды начнут неуправляемо сближаться до соприкосновения (*pull-in-эффект*), принимает вид:

$$Q_{pi} = \pm \frac{1}{\Delta} \ln \left(\frac{1 + \tilde{\Delta} - \tilde{y}_{cr}}{1 - \tilde{y}_{cr}} \right) \times \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon ab d k \tilde{y}_{cr} (1 - \tilde{y}_{cr}) (1 + \tilde{\Delta} - \tilde{y}_{cr})},$$

где $\tilde{y}_{cr} = y_{cr, Q}/d$.

МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов

Для исследования влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с гребенчатой или встречно-штыревой конструкцией электродов использовалась модель МЭМС-конденсатора, показанная на рис. 3.

В таком конденсаторе средний (подвижный) электрод, закрепленный на упругих подвесах, мо-

жет смещаться по отношению к двум неподвижным. В расчетах принимали, что электроды имеют длину a , высоту b , минимальный межэлектродный зазор d , максимальный межэлектродный зазор $(d + 2\Delta)$ и межэлектродный зазор при параллельных электродах $d_0 = d$ в состоянии, когда подвижный электрод одинаково удален от неподвижных. Полагали также, что при смещении подвижного электрода угол наклона α не изменяется.

В пренебрежении особенностями распределения электрического поля у краев электродов зависимость емкости конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов и непараллельными электродами от геометрических размеров при малых α может быть представлена в следующем виде [14]:

$$C(x) = \varepsilon_0 \varepsilon ab \frac{1}{2\Delta} \ln \left(\frac{(d + 2\Delta)^2 - x^2}{d^2 - x^2} \right). \quad (9)$$

При параллельных электродах формула (9) приводится к известному выражению

$$C_0(x) = \varepsilon_0 \varepsilon ab \frac{2d_0}{d_0^2 - x^2}.$$

Режим с контролируемым напряжением. При изменении межэлектродного зазора и сохранении значения заданного напряжения V между электродами конденсатора с учетом (9) выражение для электростатической силы притяжения, действующей на подвижный электрод, при малых α в данном случае может быть представлено в виде:

$$F_{eff, V} = F_{0, V} \frac{(1 - z^2)(1 + \tilde{\Delta})}{(1 + 2\tilde{\Delta})^2 - z^2}, \quad (10)$$

где $z = x/d$ — относительное смещение подвижного электрода от начального положения, $F_{0, V} = 2\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2 z / [d_0(1 - z^2)]^2$ — сила притяжения в слу-

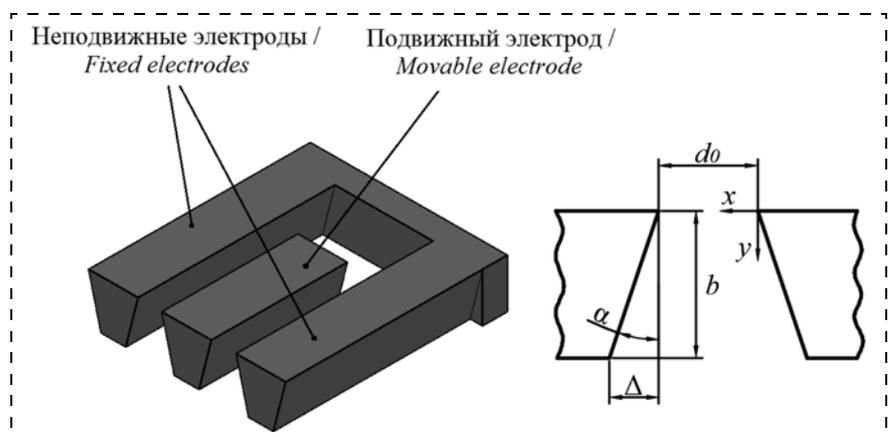


Рис. 3. Схема устройства МЭМС с гребенчатой конструкцией
Fig. 3. Schematic view of MEMS with a comb-shaped design

чае параллельных электродов гребенчатой конструкции. Согласно (10), с увеличением $\tilde{\Delta}$ отношение сил $F_{eff, V}/F_{0, V}$ будет уменьшаться.

Как и в случае конденсаторов с двумя электродами, при гребенчатой конструкции электродов непараллельность электродов сказывается и на значении критического напряжения, при превышении которого электроды начнут неуправляемо сближаться до соприкосновения (*pull-in*-эффект). Исходя из симметрии конструкции при напряжении, равном критическому, подвижный электрод будет иметь в этом случае только одну точку неустойчивого равновесия при $z = 0$.

Полагая, что и с гребенчатой конструкцией электродов при очень медленном увеличении приложенного напряжения на подвижный электрод действуют только возвращающая сила упругого подвеса и электрическая сила, выражение для оценки критического напряжения, при превышении которого произойдет схлопывание электродов (статический *pull-in*-эффект), можно представить в виде

$$V_{pi} = \pm V_{pi,0}(1 + 2\tilde{\Delta})/\sqrt{1 + \tilde{\Delta}}, \quad (11)$$

где $V_{pi,0} = \pm d_0 \sqrt{kd_0/(2\varepsilon_0 \varepsilon ab)}$ — критическое напряжение при параллельных электродах и значении межэлектродного зазора $d_0 = d$.

Таким образом, в МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов и непараллельными электродами в режиме работы с контролируемым напряжением значение критического напряжения возрастает по сравнению с соответствующим значением при параллельных электродах. Согласно (11) с ростом угла наклона электродов значение критического напряжения увеличивается.

Режим с контролируемым зарядом. В случае, когда в процессе работы МЭМС задается общий заряд на электродах конденсатора, уравнение равновесия (баланса сил) принимает вид:

$$-kdz + \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon ab Q_{com}^2}{C^2(z)} \frac{z(1 + \tilde{\Delta})}{((1 + 2\tilde{\Delta})^2 - z^2)(1 - z^2)} = 0. \quad (12)$$

Анализ показывает, что в квазистатическом случае при некотором (критическом) значении заряда подвижный электрод также будет иметь только одну точку неустойчивого равновесия $z = 0$. Это позволяет определить из уравнения (12) значение критического заряда

$$Q_{pi} = \pm \frac{1}{\tilde{\Delta}} (1 + 2\tilde{\Delta}) \ln(1 + 2\tilde{\Delta}) \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab kd_0}{2(1 + \tilde{\Delta})}}. \quad (13)$$

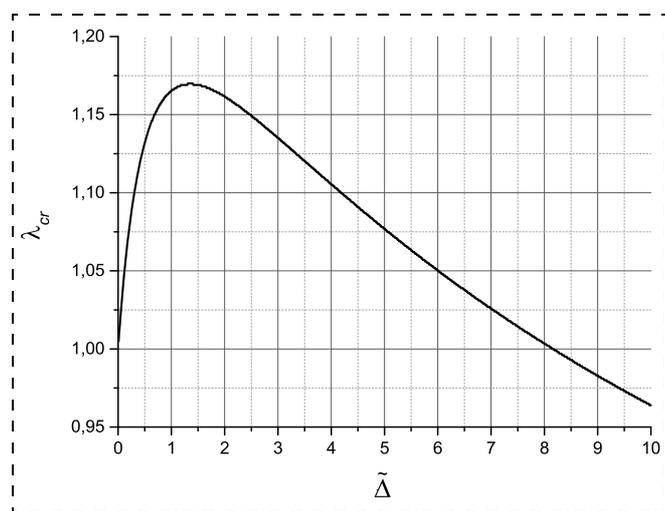


Рис. 4. Зависимость безразмерного критического заряда $\lambda_{cr} = Q_{pi}/Q_{pi,0}$ от $\tilde{\Delta}$

Fig. 4. Dependence of ratio between values of critical charge $\lambda_{cr} = Q_{pi}/Q_{pi,0}$ on parameter $\tilde{\Delta}$

В отсутствии наклона выражение (13) преобразуется к виду

$$Q_{pi,0} = \pm \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon ab kd_0}. \quad (14)$$

На рис. 4 приведена зависимость безразмерного критического заряда $\lambda_{cr} = Q_{pi}/Q_{pi,0}$ от значения величины $\tilde{\Delta}$. Согласно (13) и (14), данная зависимость имеет максимум при $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, а значение λ_{cr} в максимуме равно 1,17.

Отметим, что несмотря на то, что общий заряд в данном случае сохраняется, по площади электродов он распределяется неравномерно. Увеличение угла наклона электродов приводит к увеличению градиента заряда. Отметим также, что поверхностная плотность заряда будет прямо пропорциональна напряжению, до которого в начальный момент времени была заряжена система.

Заключение

Исследовано влияние непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия для МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов в режимах с контролируемым напряжением и зарядом. Получены выражения для расчета электростатических сил и критических напряжений при различных наклонах электродов.

Установлено, что в режиме с контролируемым напряжением при увеличении угла наклона электродов эффективная электростатическая сила в МЭМС обеих конструкций уменьшается, а значение критического напряжения возрастает.

Показано, что в режиме с контролируемым зарядом в двухэлектродных МЭМС при увеличении угла наклона электродов электростатическая сила увеличивается. Обнаружено, что в режиме с конт-

ролируемым зарядом в двухэлектродных МЭМС с непараллельными электродами возникает *pull-in*-эффект. Установлено, что в этом случае при увеличении угла наклона электродов значение критического заряда уменьшается.

В режиме с контролируемым зарядом в МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов при увеличении угла наклона электродов значение критического заряда сначала увеличивается, а затем уменьшается. Найдено, что максимальное значение критического заряда в этом случае достигается при $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, а значение λ_{cr} в максимуме равно 1,17.

Список литературы

1. Nemirovsky Y., Vochobza-Degani O. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators // Jour. of microelectromechanical system. 2001. Vol. 10, no. 4. P. 601–615. Doi: 10.1109/84.967384.
2. Zhang W.-M., Yan H., Peng Z.-K., Meng G. Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: A review. // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. Vol. 214. P. 187–218.
3. Драгунов В. П. Микромеханический электростатический преобразователь // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2007. № 1. С. 56–66.
4. Драгунов В. П., Доржиев В. Ю. Начальные условия и динамический pull-in-эффект в МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 10 (183). С. 31–37.
5. Драгунов В. П. Влияние формы упругого элемента на характеристики микроэлектромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. 2004. № 1. С. 20–26.

6. Драгунов В. П. Нелинейная модель упругого элемента микроэлектромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. 2004. № 6. С. 19–24.

7. Драгунов В. П., Колчужин В. А., Остертак Д. И. Влияние краевых эффектов на электрическую емкость в МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2009. № 2. С. 97–105.

8. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Электростатические взаимодействия в МЭМС со встречно-штыревой структурой // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2009. № 1 (12). С. 99–106.

9. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. I. Расчет емкостей // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 7. С. 37–41.

10. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. II. Расчет электростатических сил // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 8. С. 40–47.

11. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Анализ электромеханических процессов в МЭМП с изменяющейся площадью перекрытия электродов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 2. С. 115–128.

12. Guillemet R., Basset P., Galayko D. et al. Wideband MEMS electrostatic vibration energy harvesters based on gap-closing interdigitated combs with a trapezoidal section // Proc. IEEE 26th Int. Conf. on MEMS, Taipei, 2013. P. 817–820.

13. Драгунов В. П., Доржиев В. Ю. Влияние непараллельности электродов на характеристики микромеханических конденсаторов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2016. № 3. С. 54–64.

14. Cottone F., Basset P., Guillemet R., Galayko D., Marty F. and Bourouina T. Non-linear MEMS electrostatic kinetic energy harvester with a tunable multistable potential for stochastic vibrations // Proc. IEEE 17th Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators Microsyst. Jun. 2013. P. 1336–1339.

V. P. Dragunov, D. Sc, Professor, drag@adm.nstu.ru, D. E. Kiselev, Master's student, heroes-00@mail.ru, R. E. Sinitskiy, Master's Student, sinitsky.rodion@yandex.ru, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Corresponding author:

Kiselev Dmitry E., Master's student, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation, heroes-00@mail.ru

Specific Features of the Electromechanical Interactions in MemS with Nonparallel Electrodes

Received on February 17, 2017

Accepted on March 03, 2017

The article presents the results of the research of the influence of the nonparallel electrodes on the electromechanical interactions in MEMS with a two-electrode and comb-shaped design of the electrodes for two operating modes. Expressions were obtained for calculation of the electrostatic forces, critical voltages and charges at various inclinations of the electrodes. It was discovered that a pull-in effect appears in the charge control mode in the two-electrode MEMS with nonparallel electrodes. It was demonstrated, that in the charge control mode in the MEMS with a comb-shaped electrodes design, as a result of an increase of the inclination electrodes angle, the critical charge value, at first, increased and then decreased. It was found that the maximum value of the critical charge in this case was reached at $\tilde{\Delta} \cong 1.354$, while the value of λ in maximum was equal to 1.17.

Keywords: MEMS, capacitor, nonparallel electrodes, electric capacity, electric force, static balance, pull-in effect

For citation:

Dragunov V. P., Kiselev D. E., Sinitskiy R. E. Specific Features of the Electromechanical Interactions in MEMS with Nonparallel Electrodes, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 360–369.

DOI: 10.17587/nmst.19.360-369

Introduction

Miniaturization of the elements of the control complexes and information systems resulted in appearance of the micromechanical systems, formed on the basis of the integrated microelectronic technologies, and expansion of the sphere of their application.

Among the micromechanical systems an important place is occupied by the microelectromechanical systems (MEMS) based on the electrostatic operating principle. Their components (units, parts) to a maximum degree meet the requirements of the planar technology, which makes it possible to achieve high operational, technical and economic indicators.

When analyzing the internal structure of the products of the microsystem technologies, it is necessary to point out, that a set of various bonds and interactions are implemented in them: mechanical, electric, optical, etc. This is especially evident in case of the microelectromechanical systems, where more often exactly the electromechanical interactions limit the maximal permissible parameters and characteristics achievable by the system [1–4].

Modern microelectromechanical systems structurally and functionally are complex objects consisting of a big number of interconnected subsystems and elements. Meanwhile, a sharp increase of the costs of the developed systems demands a decrease of the number of tests and more specific mathematical models for designing.

The theoretical research of the processes accompanying operation of MEMS is connected with considerable mathematical problems and demands application of effective methods for their solution. In this connection we witness a growing importance of the analytical solutions providing ideas about the directions of search for the optimum solutions, necessary for estimations at the stage of preliminary designing, localization of the areas of the optimal solutions and effective initial approximations for the subsequent more accurate, but "slow" and prolonged calculations with the use of the standard software packages.

The basic element of MEMS, as a rule, is a variable capacitor made with the use of the integrated technologies. Its characteristics to the greatest degree also determine the characteristics of MEMS. As a result, during development of the electrostatic MEMS a necessity appears for estimation of the electric capacity and the electrostatic forces operating between various parts of a design [5–11].

An analysis demonstrates that in most cases for estimation of the electric capacity and electrostatic forces, the MEMS models with parallel electrodes are used. However, the existing technologies do not guarantee parallelism of the electrodes especially in the conditions of a batch production. At that, nonparallelism of the electrodes can appear due to technological errors dur-

ing manufacturing and assemblage of a device [12, 13] and also in the process of operation because of variations in the direction of the system's movement owing to occurrence of the rotating moments.

This work presents a research of the influence of nonparallelism of the electrodes on the electric capacities and forces in MEMS with a two-electrode and comb-shaped design of the electrodes.

MEMS with a two-electrode design of the electrodes

The object of the research of the influence of nonparallelism of electrodes on the electric capacities and forces in MEMS with a two-electrode design was a two-electrode model of the capacitor containing two flat nonparallel conducting electrodes (fig. 1) one of which movable, fixed on elastic suspensions, could move in relation to the other one motionless (fixed). The calculations took into account that the electrodes had length a , width b , minimal interelectrode gap d , maximal interelectrode gap $(d + \Delta)$ and the interelectrode gap at parallel electrodes $d_0 = d$. It was also assumed that a displacement of the movable electrode would not change angle α of its inclination.

If we neglect the specific features of distribution of the electric field at the edges of the electrodes (edge effects), the dependence of the capacity of a two-electrode capacitor with nonparallel electrodes on the geometrical dimensions at small values of α can be presented in the following way:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{\Delta} \ln\left(\frac{\Delta + d}{d}\right), \quad (1)$$

where ε — relative dielectric permeability of the environment between the electrodes, ε_0 — electric constant.

Voltage control mode. When the interelectrode gap changes while the set voltage V between the electrodes of the capacitor is preserved, with account of (1) the expression for the electrostatic attractive force influencing the site of $a \cdot dx$ at small values of α will be the following:

$$dF = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a V^2 dx}{(\operatorname{tg}(\alpha)x + d)^2}, \quad (2)$$

where x — coordinate of the point of application of force (x coordinate of site $a \cdot dx$). Thus, in the capacitor with nonparallel electrodes the electrostatic force changes by the width of electrode b , which should be taken into account during designing of the elastic suspensions for the electrodes.

For analysis of the behavior of the mobile elements of MEMS with nonparallel electrodes in the voltage control mode it is possible to use the effective value of the electrostatic force. Without account of the edge ef-

fects, using (2), the expression for the effective electrostatic force of attraction, having an effect on the non-parallel electrodes, at a constant voltage and invariable inclination angle of electrodes α will be the following:

$$F_{eff,V} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon a V^2 \int_0^b \frac{dx}{(\operatorname{tg}(\alpha)x + d - y)^2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2}{2d^2(1-z)(\tilde{\Delta} + 1 - z)} = \frac{F_{0,V}(1-z)}{(1 + \tilde{\Delta} - z)}, \quad (3)$$

where $\tilde{\Delta} = \Delta/d$, $z = y/d$, $F_{0,V} = \varepsilon_0 \varepsilon ab V^2 / [2d_0^2(1-z)^2]$ — the electrostatic force of attraction acting in a similar capacitor, but with parallel electrodes and interelectrode gap $d_0 = d$.

Thus, in a capacitor with nonparallel electrodes the effective electrostatic force will be in $(1-z)/(1 + \tilde{\Delta} - z)$ times less, than in a capacitor with parallel electrodes. With an increase of the inclination angle of the movable electrode, and, hence, of the average distance between the electrodes d_{cp} , the electrostatic force decreases.

Nonparallelism of the electrodes affects estimations of the capacity value of also the electrostatic force and the range value of a controllable displacement of the movable electrode and the critical voltage, an excess of which makes the movable electrode start its uncontrollable approach to the motionless one till their contact (*pull-in-effect*).

Assuming, that at a very slow increase of the applied voltage (quasistatic case) the electrodes are influenced only by the returning force of the suspension elasticity, proportional to the displacement of the movable electrode, and the electric force of attraction (3), it is possible to present the equation of balance (balance of forces) in the following way:

$$-k dz + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2}{2d^2(1-z)(\tilde{\Delta} + 1 - z)} = 0, \quad (4)$$

where k — rigidity of the elastic suspension of the movable electrode.

According to (4), the maximal value of the controllable displacement of the movable electrode in relation to the motionless one (critical value) from the position, corresponding to absence of voltage, is equal to

$$y_{cr,V} = \frac{d}{3} \left(2 + \tilde{\Delta} - \sqrt{1 + \tilde{\Delta} + \tilde{\Delta}^2} \right) = y_{cr,0} \left(2 + \tilde{\Delta} - \sqrt{1 + \tilde{\Delta} + \tilde{\Delta}^2} \right), \quad (5)$$

where $y_{cr,0} = d_0/3$ — critical displacement in MEMS with the parallel electrodes and interelectrode gap $d_0 = d$.

Taking into account (5) the expression for estimation of the critical voltage in this case can be presented as the following:

$$V_{pi} = \pm \sqrt{2ky_{cr,V}(d - y_{cr,V})(d + \Delta - y_{cr,V}) / (\varepsilon_0 \varepsilon ab)}. \quad (6)$$

In case of parallel electrodes, (6) will be transformed to the already known form:

$$V_{pi,0} = \pm \sqrt{8kd_0^3 / (27\varepsilon_0 \varepsilon ab)}.$$

Thus, in MEMS with two nonparallel electrodes in the mode of operation with a controllable voltage the values of the critical voltage and displacement increase in comparison with the corresponding values at parallel electrodes and interelectrode gap $d_0 = d$, which is caused by an increase of the average distance between the electrodes d_{cp} and a decrease of the capacitor capacity and electrostatic force at a growing angle of inclination of the movable electrode.

Charge control mode. Besides the voltage control mode, in MEMS the mode with a controllable charge (charge control mode) is also used.

In case of variation of the interelectrode gap and preservation of the set full charge of Q_{com} on the electrodes of the capacitor with account of (1), the expression for efficient electrostatic force of attraction at small values of α acquires the following form:

$$F_{eff,Q} = F_{0,Q} \frac{\tilde{\Delta}^2}{(1 + \tilde{\Delta} - z)(1 - z) \ln^2 \left(\frac{1 + \tilde{\Delta} - z}{1 - z} \right)}, \quad (7)$$

where $F_{0,Q} = Q_{com}^2 / (2\varepsilon_0 \varepsilon ab)$ — electrostatic force of attraction acting at an invariable charge in the capacitor with two parallel electrodes and interelectrode gap $d_0 = d$. According to (7) at an increase of the inclination electrodes angle and invariable charge the electrostatic force increases.

Assuming, that in a quasistatic case the electrodes are influenced only by the returning force of elasticity of suspension ky and the electric force of attraction (7), it is possible to demonstrate, that at nonparallel electrodes in the mode with a controllable charge a *pull-in-effect* appears, unlike in case with the parallel electrodes, where the *pull-in-effect* does not appear.

Fig. 2 presents the dependence of variation of interelectrode gap z on dimensionless charge of λ :

$$\lambda = Q_{com} / \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon abdk} = \pm \frac{1}{\tilde{\Delta}} \ln^2 \left(\frac{1 + \tilde{\Delta} - z}{1 - z} \right) \sqrt{z(1-z)(1 + \tilde{\Delta} - z)}, \quad (8)$$

calculated with the use of (8) at several values of $\tilde{\Delta}$.

According to (8) and fig. 2, with an increase of the relative inclination of the electrodes the value of the

critical charge, the excess of which causes a *pull-in-effect*, decreases, which is connected with an increase of the electrostatic force. The range of the controllable displacement of the movable electrode also decreases.

An analysis shows that at a very slow increase of the full charge for estimation of the critical displacement of the movable electrode from the balance position to the motionless one it is possible to offer the following expression:

$$y_{cr, Q} \approx d \left(1 + 0.0637 \tilde{\Delta} - \sqrt{0.0637 \tilde{\Delta} (1 + 0.035 \tilde{\Delta})} \right),$$

which approximates the dependence of the critical displacement on $\tilde{\Delta} = \Delta/d$ for $0 < \tilde{\Delta} \leq 7$ with a margin error, not exceeding 1 %. In its turn the expression for estimation of the critical charge, at the excess of which the electrodes begin an uncontrollable approach till their contact (*pull-in-effect*), becomes the following:

$$Q_{pi} = \pm \frac{1}{\tilde{\Delta}} \ln \left(\frac{1 + \tilde{\Delta} - \tilde{y}_{cr}}{1 - \tilde{y}_{cr}} \right) \times \\ \times \sqrt{2 \varepsilon_0 \varepsilon a b d k \tilde{y}_{cr} (1 - \tilde{y}_{cr}) (1 + \tilde{\Delta} - \tilde{y}_{cr})},$$

where $\tilde{y}_{cr} = y_{cr, Q}/d$.

MEMS with a comb-shaped design of the electrodes

For research of the influence of nonparallelism of the electrodes on the electric capacities and forces in MEMS with comb-shape or interdigital design of the electrodes the model of MEMS capacitor was used (fig. 3).

In such a capacitor the middle (movable) electrode fixed on the elastic suspensions, can be displaced in relation to the two motionless ones. In calculations it was accepted that the electrodes had length a , height b , minimal interelectrode gap d , maximal interelectrode gap $(d + 2\Delta)$ and the interelectrode gap at parallel electrodes $d_0 = d$ in the state, when the movable electrode was equidistant from the motionless ones. It was also assumed, that in case of displacement of the movable electrode the inclination angle of α would not change.

If we neglect the specific features of distribution of the electric field at the edges of the electrodes, the dependence of the capacity of the capacitor with an comb-shaped electrodes design and nonparallel electrodes on the geometrical size at small values of α can be presented in the following form [14]:

$$C(x) = \varepsilon_0 \varepsilon a b \frac{1}{2\Delta} \ln \left(\frac{(d + 2\Delta)^2 - x^2}{d^2 - x^2} \right). \quad (9)$$

At parallel electrodes formula (9) is reduced to the well-known expression:

$$C_0(x) = \varepsilon_0 \varepsilon a b \frac{2d_0}{d_0^2 - x^2}.$$

Voltage control mode. If the interelectrode gap varies with preservation of the set voltage V between the electrodes of the capacitor, with account of (9) the expression for the electrostatic force of attraction, effecting the movable electrode at small values of α in this case can be presented in the following way:

$$F_{eff, V} = F_{0, V} \frac{(1 - z^2)(1 + \tilde{\Delta})}{(1 + 2\tilde{\Delta})^2 - z^2}, \quad (10)$$

where $z = x/d$ — relative displacement of the movable electrode from the initial position, $F_{0, V} = 2\varepsilon_0 \varepsilon a \times b V^2 z / [d_0(1 - z^2)]^2$ — force of attraction in case of parallel electrodes of the comb-shaped design.

According to (10), with an increase of $\tilde{\Delta}$ the correlation of forces $F_{eff, V}/F_{0, V}$ will lessen.

Just like in case of the capacitor with two electrodes and comb-shaped electrodes design the nonparallelism of the electrodes affects also the value of the critical voltage, at the excess of which the electrodes begin to approach each other up to a contact (*pull-in-effect*). Proceeding from the symmetry of the design at the voltage equal to the critical one, the movable electrode will have only one point of unstable balance at $z = 0$.

Assuming, that in case of the comb-shaped electrodes design at a very slow increase of the applied voltage the movable electrode is influenced only by the returning force of the elastic suspension and the electric force, we can present the expression for estimation of the critical voltage, excess of which will cause contact of the electrodes (static *pull-in-effect*) in the following way:

$$V_{pi} = \pm V_{pi, 0} (1 + 2\tilde{\Delta}) / \sqrt{1 + \tilde{\Delta}}, \quad (11)$$

where $V_{pi, 0} = \pm d_0 \sqrt{k d_0 / (2\varepsilon_0 \varepsilon a b)}$ — critical voltage at the parallel electrodes and the value of the interelectrode gap of $d_0 = d$.

Thus, in MEMS with a comb-shaped electrodes design and nonparallel electrodes in the voltage control mode the value of the critical voltage increases in comparison with the corresponding value at parallel electrodes. According to (11) with the growth of the inclination electrodes angle the value of the critical voltage increases.

Charge control mode. In a case, when in the course of operation of MEMS a total charge is set on the ca-

pacitor electrodes, the equation of the balance of forces becomes the following:

$$-kdz + \frac{2\varepsilon_0\varepsilon ab Q_{com}^2}{C^2(z)} \frac{z(1+\tilde{\Delta})}{((1+2\tilde{\Delta})^2 - z^2)(1-z^2)} = 0. \quad (12)$$

An analysis shows, that in a quasistatic case at a certain (critical) value of the charge, the movable electrode will also have only one point of unstable balance $z = 0$. This allows us to determine the value of the critical charge from the equation (12):

$$Q_{pi} = \pm \frac{1}{\tilde{\Delta}} (1 + 2\tilde{\Delta}) \ln(1 + 2\tilde{\Delta}) \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon abkd_0}{2(1 + \tilde{\Delta})}}. \quad (13)$$

In absence of an inclination the expression (13) will be transformed into the following:

$$Q_{pi,0} = \pm \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon abkd_0}. \quad (14)$$

Fig. 4 presents the dependence of the dimensionless charge $\lambda_{cr} = Q_{pi}/Q_{pi,0}$ on the value of $\tilde{\Delta}$. According to (13) and (14), the dependence has its maximum at $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, while the value of λ_{cr} in the maximum equals to 1.17.

We should point out that despite the fact that the total charge is preserved, on the area of the electrodes it is distributed nonuniformly. An increase of the angle of inclination of the electrodes leads to an increase of the gradient of the charge. We should also point out, that the surface density of the charge will be directly proportional to the voltage, up to which until the initial moment the system was charged.

Conclusion

The influence of nonparallelism of the electrodes on the electromechanical interactions for MEMS with a two-electrode and comb-shaped design of the electrodes in the voltage and charge control modes was investigated.

Expressions were obtained for calculation of the electrostatic forces and the critical voltages at various inclinations of the electrodes.

It was discovered, that in the voltage control mode during an increase of the inclination electrodes angle, the effective electrostatic force in MEMS of both designs decreased, while the value of the critical voltage increased.

It was demonstrated, that in the mode with a controllable charge in the two-electrode MEMS during an increase of the inclination electrodes angle the electrostatic force increased. It was discovered, that in the charge control mode in the two-electrode MEMS with nonparallel electrodes a *pull-in*-effect appeared. It was

established, that in this case with an increase of the inclination angle the critical charge value decreases.

It was demonstrated that in the charge control mode in MEMS with a comb-shaped electrodes design at an increase of the inclination electrodes angle the critical charge value, at first, increased, and then decreased. It was found, that the maximum value of the critical charge in this case was achieved at $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, while the value of λ_{cr} in the maximum equaled to 1.17.

References

1. Nemirovsky Y., Bochobza-Degani O. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators, *Jour. of microelectromechanical system*, 2001, vol. 10, no. 4, pp. 601–615, doi: 10.1109/84.967384.
2. Zhang W.-M., Yan H., Peng Z.-K., Meng G. Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: A review, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 214, pp. 187–218.
3. Dragunov V. P. Mikromekhanicheskiy jelektrostaticheskiy preobrazovatel', *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossii'skoi' Federacii*, 2007, no. 1, pp. 56–66.
4. Dragunov V. P., Dorzhiev V. Y. Nachal'nye usloviya i dinamicheskij pull-in-effekt v MEMS s izmenjajushhimsja mezhelektrodnym zazorom, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2015, no. 10 (183), pp. 31–37.
5. Dragunov V. P. Vlijanie formy uprugogo jelementa na harakteristiki mikrojelektromekhanicheskikh sistem, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2004, no. 1, pp. 20–26.
6. Dragunov V. P. Nelinejnaja model' uprugogo jelementa mik-rojelektromekhanicheskikh sistem, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2004, no. 6, pp. 19–24.
7. Dragunov V. P., Kolchuzin V. A., Ostertak D. I. Vlijanie kraevyh effektov na jelektricheskuju emkost' v MEMS, *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossii'skoi' Federacii*, 2009, no. 2, pp. 97–105.
8. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Jelektrostaticheskie vzaimodejstvija v MEMS so vstrečno-shtyrevoj strukturoj, *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossii'skoi' Federacii*, 2009, no. 1 (12), pp. 99–106.
9. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Jelektrostaticheskie vzaimodejstvija v MEMS s ploskoparallel'nymi jelektrodami. Chast' I. Raschet emkostej, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2010, no. 7, pp. 37–41.
10. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Jelektrostaticheskie vzaimodejstvija v MEMS s ploskoparallel'nymi jelektrodami. Chast' II. Raschet jelektrostaticheskikh sil, *Nano- i mikrosistemnaja tekhnika*, 2010, no. 8, pp. 40–47.
11. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Analiz jelektromekhanicheskikh processov v MEMP s izmenjajushhejsja ploshhad'ju perekrytija jelektrodov, *Nauchny'i vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2009, no. 2, pp. 115–128.
12. Guillemet R., Basset P., Galayko D. et al. Wideband MEMS electrostatic vibration energy harvesters based on gap-closing interdigitated combs with a trapezoidal section, *Proc. IEEE 26th Int. Conf. on MEMS, Taipei, 2013*, pp. 817–820.
13. Dragunov V. P., Dorzhiev V. Yu. Vlijanie neparallel'nosti jelektrodov na harakteristiki mikromekhanicheskikh kondensatorov, *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossii'skoi' Federacii*, 2016, no. 3, pp. 54–64.
14. Cottone F., Basset P., Guillemet R., Galayko D., Marty F., Bourouina T. Non-linear MEMS electrostatic kinetic energy harvester with a tunable multistable potential for stochastic vibrations, *Proc. IEEE 17th Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators Microsyst*, Jun. 2013, pp. 1336–1339.

Г. С. Караян, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: hsKarayan@yandex.ru, С. В. Гандилян, канд. техн. наук, доцент, зав. лаб. e-mail: angastroi@mail.ru, В. В. Гандилян, канд. физ.-мат. наук, доцент, Ереванский государственный университет г. Ереван, Армения

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИКРОСИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

Поступила в редакцию 30.12.2016

Рассматривается современное состояние совершенно нового направления науки — микросистемной электромеханики. Анализируются широкие спектры ее практического применения и перспективы дальнейшего развития.

Подробно обсуждаются два основных пути создания микро- и нанoeлектромеханических преобразователей энергии как базовых элементов микросистемной электромеханики "сверху вниз" и "снизу вверх".

Описаны основные технологические приемы конструирования базовых функциональных элементов микросистемной электромеханики, охарактеризованы области их применения в традиционной и новой технике (в информационных и компьютерных технологиях, медицине, аэрокосмических и ракетно-артиллерийских системах и т. д.).

Ключевые слова: микросистемная электромеханика, нанoeлектромеханика, МЭМС и НЭМС, молекулярный монтаж, атомная сборка, самоорганизация

Посвящается памяти академика А. Г. Иосифьяна

Введение

Современная наука, относящаяся к электромеханике, прогресс которой базируется на максимальном использовании новейших достижений классической механики и электродинамики, физики полупроводников, атомной физики, энергетики, оптоэлектроники, кибернетики и т. п., развивается по двум магистральным направлениям.

1. В настоящее время как в области теории электромеханических преобразователей (ЭМП) энергии, так и в области их изготовления ждет своего решения множество задач, связанных с повышением энергетических показателей, проектированием и созданием более экономичных (менее металлоемких и более технологичных) электрических машин и их функциональных элементов.

2. Наряду с микроэлектроникой, компьютерной техникой, телекоммуникацией и т. д. в области современной электромеханики наиболее ярко проявляется жизненная необходимость миниатюризации (и сверхминиатюризации) функциональных элементов ЭМП энергии и их систем [1–3].

Первое направление развития науки в области электромеханики

в современной научной литературе традиционно толкуется как "макросистемная электромеханика", второе — как "микросистемная электромеханика", как важнейшая отрасль современной микросистемной техники (рис. 1) [4–6].

Базовыми объектами исследования макросистемной электромеханики являются ЭМП энергии классического назначения: электрические машины и аппараты, от микроэлектродвигателей с мощностью не выше 1 кВт, являющихся основой авто-

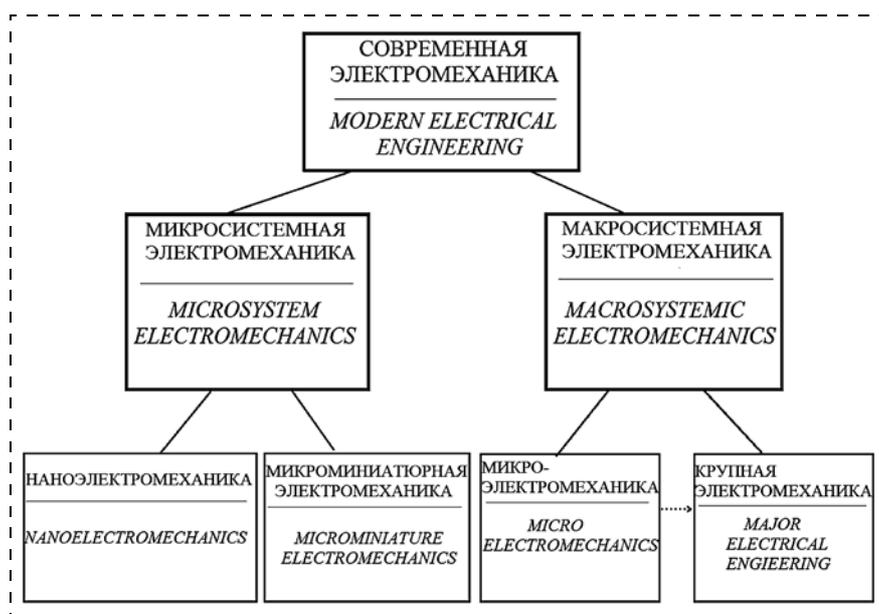


Рис. 1. Классификация ЭМП энергии по энергетическим и массогабаритным показателем
Fig. 1. Classification of EMC of energy by the energy and mass-dimension indicators

матизации множества технологических процессов, до самых мощных электрических машин (гидро- и турбогенераторов для энергогенерирующих систем) [7, 8].

Появление современной микросистемной электромеханики связано с очередной стадией развития техники и технологии микромеханики и микроэлектроники, благодаря которым стало возможно создание малогабаритных интегрированных многофункциональных микроэлектромеханических систем (МЭМС) как совокупность микромеханических и микроэлектронных компонентов (или их подсистем), объединенных в общую интегральную схему. Это позволило при решении поставленных задач достичь нового качественного уровня в массогабаритных показателях, быстродействии, функциональных возможностях, производительности, снижении стоимости и т. п. При этом разнообразные приборы, схемы, устройства и подсистемы, в которых динамические процессы энергообразования носят электромеханический характер, а структурные функциональные элементы имеют размер (по меньшей мере в одном направлении) $0,1 \text{ мкм} < l < 0,1 \text{ мм}$, могут быть частью или законченным изделием МЭМС [9—11].

В настоящее время качественно новый уровень развития современной электромеханики предопределяет внедрение новейших достижений нанонауки и нанотехнологии в тех отраслях естествознания, инженерных наук и технологии, которые имеют базовое значение для науки в области электромеханики и промышленности в целом.

Для современной электромеханики во всем диапазоне энергетического спектра первостепенной задачей является развитие электротехнического материаловедения. В настоящее время проводятся активные исследования по практическому применению электрических материалов различного назначения, изготовленных по нанотехнологиям.

Среди наноматериалов, перспективных в применении к электромашиностроению, следует выделить: аморфные сплавы, графен, магнитную ферробумагу, углеродные нанотрубки, металлические порошки в электропроводящих слоях, новые фрикционные и электроизоляционные материалы и др. Удельные магнитные потери магнитопроводов из аморфных и нанокристаллических сплавов имеют значительно меньшее значение по сравнению с электрической сталью и ферритами (менее $0,1 \text{ Вт/кг}$ при $f = 60 \text{ Гц}$). Они обладают высокой относительной начальной магнитной проницаемостью, а также индукцией насыщения на промышленных и высоких частотах ($B_S = 1,2 \dots 1,3 \text{ Тл}$). Например, графен — новейший наноструктурный материал, обладающий уникальными токопроводящими свойст-

вами, которые позволяют ему служить не только очень хорошим проводником, но и полупроводником. Кроме того, графен чрезвычайно прочен и выдерживает огромные нагрузки как на разрыв, так и на прогиб. Указанные свойства актуальны для проводниковых материалов ЭМП энергии, работающих в условиях интенсивных динамических нагрузок.

Еще одним примером применения нанотехнологии является изготовление обмоточного провода с использованием тонкодисперсного порошка оксида кремния, введенного химическим способом в полиамидную изоляцию. Этот метод позволил увеличить качество готового провода и повысить его температурный индекс до $280 \text{ }^\circ\text{C}$.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что внедрение наноструктурных электротехнических материалов в производстве ЭМП энергии может способствовать комплексному повышению уровня современного электромашиностроения (особенно крупному). Однако этот процесс пока ограничивается технико-технологическими трудностями изготовления и высокой стоимостью указанных материалов [12—14].

В случае использования нанотехнологий и наноматериалов в микросистемной электромеханике следует использовать термин "наносистемная электромеханика". Это касается тех случаев, когда размеры и мощности ЭМП энергии соразмерны с размерами и мощностью биологических преобразователей энергии (при этом наименьшие из сделанных человеком устройств соизмеримы с наибольшими молекулами живых организмов). На этом уровне мощностей господствует одно из стратегических направлений современной нанонауки — нанoeлектромеханика, которая рассматривает электромеханические системы (НЭМС) со структурными функциональными элементами размером (хотя бы в одном направлении) $10 \text{ нм} < l < 100 \text{ нм}$ [15, 16].

Решение первостепенных задач современной микросистемной электромеханики требует дальнейшего глубокого изучения строения вещества, синтеза процессов в веществе, а также установления методов получения кристаллической решетки проводников, диэлектриков, полупроводников, диамагнетиков, ферромагнетиков с закономерным распределением атомов и молекул в зависимости от предлагаемых свойств и назначения этих материалов, создания проводников и полупроводников на базе полимерной и других химических соединений. Необходимо резкое повышение качества атомно-молекулярных композиций и композиционных материалов для установок непосредственного преобразования тепловой, солнечной, атомной, химической энергии в электрическую с высоким КПД.

Классификация ЭМП энергии и их систем по принципу действия

В окружающем нас мире (от вселенских макрообъектов, таких как галактики и звезды, до микрообъектов — биодвигателей, атомов и всего многообразия элементарных частиц) процесс электромеханического преобразования энергии, обусловленный непосредственным взаимодействием гравитационно-инерционных и электромагнитных сил, — всеобщее и фундаментальное явление.

В природных процессах энергообразования одновременно участвуют и магнитные, и электрические поля. Если в том или ином природном процессе превосходят магнитные силы, а действием электрических сил можно пренебречь, то можно сказать, что "действуют" индуктивные ЭМП энергии. Если превосходят электрические силы, а действием магнитных сил можно пренебречь, то можно утверждать, что "действуют" емкостные ЭМП энергии. Если мощности магнитных и электрических сил, действующих в общем объеме, соизмеримы друг с другом, то можно говорить о действиях совмещенных индуктивно-емкостных ЭМП энергии.

По сути любой природный процесс преобразования электромагнитного поля можно моделировать как действие некоего совмещенного индуктивно-емкостного ЭМП энергии, подсистемами которого является нелинейно взаимодействующие индуктивные и емкостные ЭМП энергии. Уникальным примером совмещенной системы индуктивных и емкостных ЭМП энергии (магнитогидродинамических — МГД и электрогидродинамических — ЭГД генераторов и двигателей) является планета Земля как самоорганизующаяся многокомпонентная система, взаимодействующая с окружающим космическим пространством через электромагнитные и гравитационно-инерционные поля [17—19].

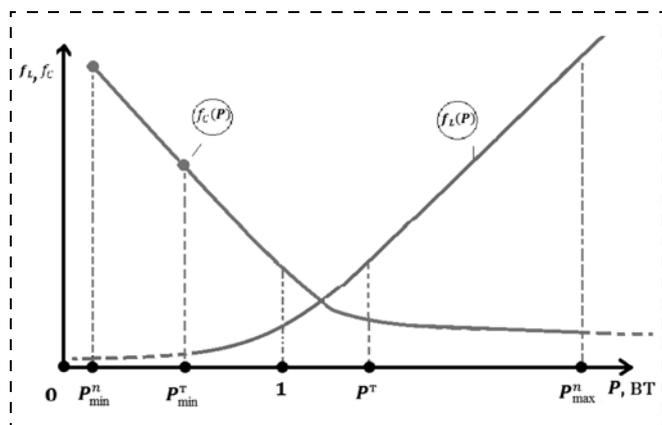


Рис. 2. Предпочтительные области распределения электромеханических преобразователей энергии
 Fig. 2. Preferable areas for distribution of the electromechanical converters of energy

Если представить шкалу мощностей для природных ЭМП энергии, действующих от микромира до космических масштабов (рис. 2), и на ней выделить предпочтительные области, в которых действуют индуктивные и емкостные ЭМП энергии, то можно утверждать следующее.

- В природных микроструктурах, особенно в биологических и физиологических явлениях в мире клеточных и субклеточных структур живой природы, в процессах преобразования электромагнитной энергии основная роль принадлежит электрическому полю (действуют емкостные ЭМП энергии, которые занимают область от точки минимума до примерно нескольких ватт).
- Индуктивные ЭМП энергии играют решающую роль в природных макросистемах (начиная с макросистем живых организмов до космических объектов) и господствуют в области больших мощностей (начиная от долей ватта до 10^{26} Вт и выше).

Функции распределения $f_L(P)$ и $f_C(P)$ определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} f_L(P) &= \frac{N_L(P)}{N(P)}; \\ f_C(P) &= \frac{N_C(P)}{N(P)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где P — мощность; $N_L(P)$ и $N_C(P)$ — среднестатистическое число индуктивных и емкостных ЭМП энергии; $N(P)$ — общее число ЭМП энергии.

При этом функции $f_L(P)$ и $f_C(P)$ удовлетворяют следующим условиям:

$$\left. \begin{aligned} \lim_{P \rightarrow \infty} f_L(P) &= 1, & \lim_{P \rightarrow P_{\min}} f_L(P) &= 0; \\ \lim_{P \rightarrow \infty} f_C(P) &= 0, & \lim_{P \rightarrow P_{\min}} f_C(P) &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На шкале мощностей для природных ЭМП энергии, действующих в Земных масштабах, имеются две "магические" точки: точка минимума — $P_{\min}^n \approx 10^{-17}$ Вт — мощность самого маленького биологического двигателя ворсинки бактерии (самого маломощного емкостного ЭМП энергии, созданного природой) и точка максимума — $P_{\max}^n \approx 6,5 \cdot 10^{29}$ Вт — мощность униполярной "электрической динамомшины" планеты Земля [18, 19].

В настоящее время человечество освоило некоторые участки узкого интервала шкалы мощностей. Экстремальными точками этого интервала являются: точка минимума $P_{\min}^T \approx 0,6 \cdot 10^{-8}$ Вт — мощность самого маломощного емкостного нанодвигателя и точка максимума $P_{\max}^T \approx 10^9$ Вт —

мощность турбогенератора (самой мощной электрической машины, созданной человеком).

Как и в природных явлениях, в зависимости от принципа осуществления (реализации) взаимного преобразования электромагнитной и механической энергии технические ЭМП энергии и их системы во всем диапазоне энергетического спектра подразделяются на три больших класса:

- индуктивные (электроиндукционные) ЭМП энергии, в которых рабочим полем является магнитное поле;
- емкостные (магнитно-индукционные) ЭМП энергии, в которых рабочим полем является электрическое поле;
- индуктивно-емкостные (магнитно-электроиндукционные) ЭМП энергии, в которых электро-механическое преобразование осуществляется магнитным и электрическим полями.

Принципиальные схемы ЭМП энергии показаны на рис. 3.

При исследовании вопросов физико-математического моделирования и практического изготовления совмещенных индуктивно-емкостных ЭМП энергии следует иметь в виду одно важное обстоятельство.

Совместное применение индуктивных и емкостных ЭМП энергии в общем объеме одного агрегата в макросистемной электромеханике не эффективно, так как индуктивные ЭМП энергии являются источниками ЭДС, а емкостные — источниками тока. Такая совмещенная система представляла бы гибрид источников низкого и сверхвысокого напряжения и имела бы низкий КПД.

В макросистемной электромеханике определенный интерес представляют совмещенные системы, состоящие из последовательного и параллельного соединения индуктивных и емкостных ЭМП энергии. При возникновении резонансных режимов в таких системах их энергетические характеристики наилучшие, так как происходит обмен реактивной мощностью между индуктивной и емкостной подсистемами, и для создания магнитного и электрического полей совмещенный ЭМП энергии перестает потреблять реактивную мощность от внешних источников энергии [20, 21].

Совершенно иная ситуация в современной микро-системной электротехнике.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию наноструктурных материалов электротехнического назначения, в которых одновременно существуют и магнитное, и сегнетоэлектрическое (или антисегнетоэлектрическое) упорядочение [22].

Если в прошлом веке успешное развитие физики твердого тела в области электротехнического материаловедения, обусловленное интенсивным развитием физики магнитных явлений и сегнето-

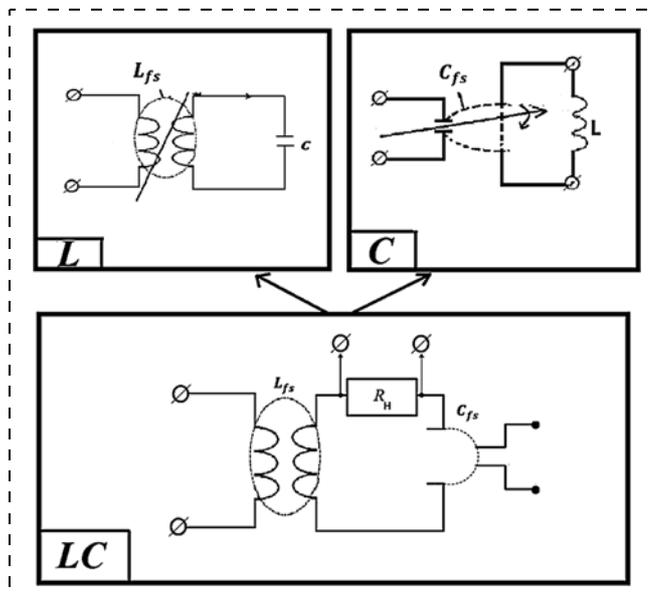


Рис. 3. Классификация ЭМП энергии по принципу действия
Fig. 3. Classification of EMC of energy by the operating principle

электрического в отдельности, отражалось в макросистемной электромеханике осуществлением нового качественного скачка индуктивных и емкостных макроЭМП энергии в отдельности, то наноструктурные электротехнические материалы дuality назначения могут быть с успехом применены в разработке и создании новых схем и компонентов микро-системного электрооборудования, в которых базовыми элементами являются совмещенные индуктивно-емкостные микро- и нано-ЭМП энергии и их системы.

Например, как установлено в работе [23], изготавливаемые по технологии МСТ микроминиатюрные индуктивно-емкостные электродвигатели могут иметь важное значение для совершенствования, миниатюризации и удешевления современных аэрокосмических и ракетно-артиллерийских систем.

В США этими вопросами занимаются такие известные научно-исследовательские фирмы, как Intel, MEMS, Inolustry Group, Sandia National Labs. Известен американский микроминиатюрный летательный аппарат с параметрами: масса — 80 г, размер крыльев 15 см, высота полета ≈ 230 м, скорость полета ≈ 70 км/ч, КПД рабочего двигателя (изготовленного по технологии МСТ микроминиатюрного индуктивно-емкостного электродвигателя) ≈ 82 %.

Классификация МЭМС и НЭМС по функциональным характеристикам

В работах авторов [24, 25] осуществлен сравнительный анализ динамических и структурных характеристик и классификация по принципу дейст-

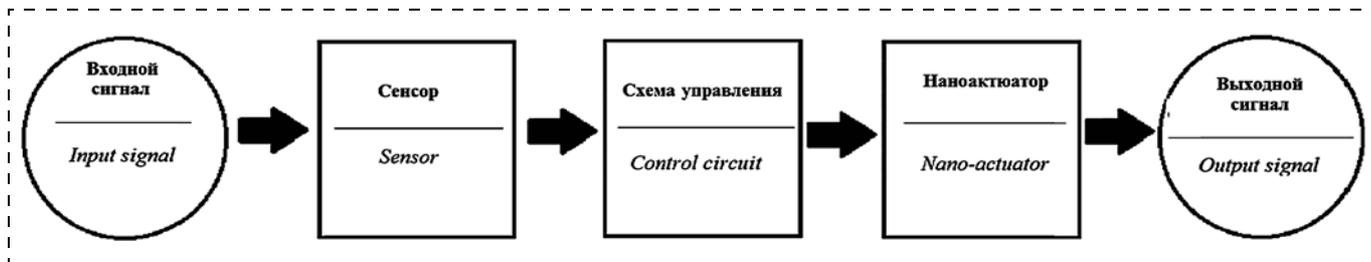


Рис. 4. Общая структура НЭМС

Fig. 4. General structure of NEMS

вия базовых функциональных элементов МЭМС и НЭМС — микро- и наноЭМП энергии с точки зрения микро- и наноминиатюрных трактовки основных принципов и теоретических положений современной электрофизики.

Было установлено, что несмотря на имеющиеся между МЭМС и НЭМС сходные характеристики по функциональным принципам в МСТ, между ними имеется кардинальное отличие по узловым признакам динамического и энергетического состояния.

Основные особенности МЭМС и НЭМС могут быть вкратце сформулированы следующим образом.

- В наносистемной технике используются предельные возможности сверхминиатюризации электрических, магнитных, механических и биологических систем.
- Если для МЭМС процесс миниатюризации функциональных элементов, подчиняясь общим закономерностям развития современной микросистемной техники, можно осуществить с помощью моделей и технологии типа "сверху вниз" (нисходящее производство), которые в неявной форме предполагают, что уменьшение размеров структур не влияет на их функциональные свойства (и принцип функционирования), то при производстве наносистемной техники (в том числе и НЭМС) главенствующее значение принимают технологии типа "снизу вверх" (восходящее производство), основой которых служит атомный и молекулярный синтез (так называемый "молекулярный монтаж" или "атомная сборка").
- Так как в МЭМС динамические процессы преобразования электромагнитного поля обусловлены силой тяжести (инертностью) микромеханических элементов, то их физико-математическое моделирование можно осуществить с помощью классических законов электрофизики Фарадея — Максвелла (и соответственно, классической теории электрических цепей).
- Так как в наносистемной технике (и соответственно в НЭМС) силы тяжести незначительны по сравнению с силами химических связей межатомного и межмолекулярного воздействия, то

в задачах физико-математического моделирования НЭМС законы классической электрофизики (и соответствующая теория электрических цепей) должны быть скорректированы в соответствии с квантовыми законами электрофизики.

- Если изделия микросистемной техники в области МЭМС по структуре чисто технические, то в области наносистемной техники необходимы фундаментальные исследования, возможности создания изделий НЭМС с совмещением гармонично действующих технических и природных функциональных элементов.
- В настоящее время на основе подражания природным аналогам (например, с использованием возможностей и функциональных свойств биологических наноструктур) ведутся работы по созданию НЭМС, в которых часть функций выполняют элементы живых организмов (биомолекулы, бактерии и т. д.). Так как созданные человеком НЭМС могут функционировать в широком диапазоне температур (от низких температур вплоть до нескольких сотен градусов) и в различных агрессивных средах, то естественно, что в настоящее время один из главных мотивов, побуждающих нас к изучению живого вещества в наномасштабе, — это мотив технологический. Можно утверждать, что сегодняшнее развитие наносистемной электромеханики предопределяет путь к созданию природоподобной техники [26, 27].

Развитию НЭМС способствовали следующие открытия последнего двадцатилетия:

- создание углеродных нанотрубок и применение зондов микроскопов и литографических методов для сборки получаемых трубок в отдельные устройства;
- возможность размещения сконструированных отдельных молекул в зазоре между электродами и измерения переноса заряда через эти молекулы;
- развитие зондовых методов для манипулирования отдельными атомами вещества и создания наноструктур;
- разработка химических методов синтеза нанокристаллов и методов их объединения в более крупные упорядоченные структуры;

- выделение биохимических "молекулярных двигателей" и их включение в небиологическую среду [28, 29].

Элементарной базой НЭМС и наноробототехники являются углеродные нанотрубки (обладающие исключительными физическими и электрическими свойствами), углеродные каркасные структуры (например, фуллерен C_{60}), молекулярные моторы, молекулярные переключатели, комплексы ДНК и т. д. или их подсистемы, которые могут быть частью или законченным изделием НЭМС. Общая структура НЭМС включает в себя чувствительные элементы (датчики информации или наносенсоры), каналы передачи энергии и информации, управляющие устройства и исполнительные механизмы (например, наноактюаторы) (рис. 4) [30].

Заключение

Прогресс в области современной электромеханической науки по всем интервалам энергетических и массогабаритных показателей ЭМП энергии и их систем во многом зависит от развития электротехнического материаловедения.

В настоящее время материаловедческие и технологические разработки, позволяющие за счет создания наноструктур варьировать физико-механические и физико-химические свойства материалов и изделий, играют большую роль в создании и макроэлектромеханических и микроэлектромеханических (в том числе наноэлектромеханических) систем.

Вопросы физико-математического моделирования микросистемной электромеханики будут затронуты в дальнейших работах авторов настоящей работы.

Список литературы

1. **Иосифьян А. Г.** Вопросы электромеханики. М.: Энергия, 1975. 227 с.
2. **Иосифьян А. Г.** Электромеханика в космосе. М.: Знание 1977. 64 с.
3. **Копылов И. П.** Куда идет электромеханика // Электротехника. 2007. № 12. С. 50—55.
4. **Бертинов А. И., Бут Д. А., Мизюрин С. Р. и др.** Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии. М.: Энергоатомиздат, 1993. 361 с.
5. **Копылов И. П., Гандилян С. В., Гандилян В. В.** Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования электромеханических преобразователей энергии // Электротехника. 1998. № 9. С. 25—40.
6. **Осин И. Л., Юферов Ф. М.** Электрические машины автоматических устройств. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 109 с.
7. **Гандилян С. В., Гандилян В. В.** Некоторые проблемы создания микроминиатюрных электромеханических преобразователей энергии // Электричество. 1999. № 3. С. 43—46.
8. **Копылов И. П.** Электрические машины. М.: Юрайт, 2015. Т. 1. 267 с.; Т. 2. 407 с.
9. **Нанотехнологии в электронике** / Под ред. Ю. А. Чаплыгина. М.: Техносфера, 2005. 446 с.

10. **Gallacher B. J., Burdess J. S., Harris A. J., McNie M. E.** The design and fabrication of a multi axis vibrating ring gyroscope // Symposium gyro technology 2001. Stuttgart, Germany. 2001. P. 10—20.

11. **Muralt P.** Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films // Reports on Progress in Physics. 2001. Vol. 64. P. 1339—1388.

12. **Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В., Копьев П. С., Панов В. И., Полгорацкий Э. А., Сибельдин Н. Н., Сирус Р. А.** Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2005. № 8. С. 3—13.

13. **Губин С. П., Ткачев С. В.** Графен и родственные наноформы углерода. М.: URSS, 2012. 101 с.

14. **Андривеский Р. А., Рагуля А. В.** Наноструктурные материалы. М.: Издат. центр "Академия", 2005. 192 с.

15. **Нанотехнология в ближайшем десятилетии.** Прогноз направления развития / Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса; Пер. с англ. М.: Мир, 2002. 292 с.

16. **Lew H. S.** Electro-Tension and Torgue in Biological Membranes Modelled as a Dipole Sheet // Fluid Conductors. — Biomechanics. 1972. Vol. 5, N. 4. P. 126—132.

17. **Гандилян С. В., Гандилян У. В.** Обобщенное электромеханическое моделирование биоэнергетических систем // Электротехника 1996. № 6. С. 53—56.

18. **Нанобиотехнология биомиметическая мембран** / Под ред. Дональда К. Мартина. М.: Научный мир. 2012. 216 с.

19. **Григорьев В. И., Григорьева Е. В.** Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планеты и звезд. М.: Изд-во ФИЗМАЛИТ, 2003. 192 с.

20. **Гандилян С. В., Гандилян У. В.** Совмещенные индуктивно-емкостные электрические машины // Известия РАН. Сер. Энергетика и транспорт. 1993. № 2. С. 50—62.

21. **Лапцевич А. А., Гречихин Л. И., Куць Н. Г.** Энергетическая база беспилотных летательных аппаратов // Известия высш. учеб. заведений. Сер. Энергетика. 2010. № 1. С. 64—78.

22. **Пятаков А. П., Звездин А. К.** Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. 2012. Т. 182. С. 539—620.

23. **Турков В. Е., Жукова С. А., Рискин Д. Д.** Реактивные микродвигатели, изготавливаемые по технологии МСТ // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 12. С. 7—21.

24. **Karayan H. S. and Gandilyan S. V.** Several Issues of Generalized Physical and Mathematical Modeling of Micro- and Nano-Electromechanical Systems (MEMS and NEMS) // Armenian Journal of Physics, 9 (3), 2016, pp. 244—259.

25. **Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф., Ибрагимов И. М.** Основы нанотехнологии в технике. М.: Издательский центр "Академия", 2009. 237 с.

26. **Альтман Ю.** Военные нанотехнологии: Возможности применения и превентивного контроля вооружений. М.: Техносфера, 2006. 424 с.

27. **Гандилян С. В.** Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования микро- и наноэлектромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 8. С. 15—32.

28. **Харис П.** Углеродные нанотрубки и родственные структуры. М.: Техносфера, 2003. 236 с.

29. **Елецкий А. В.** Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 4. С. 401—438.

30. **Нанотехнология в ближайшем десятилетии.** Прогноз направления исследований / Под ред. М. Роко, П. Аливисатоса; Пер. с англ. под ред. Р. А. Андриановского. М.: Мир, 2002. 292 с.

H. S. Karayan, D. Sc., Professor, hsKarayan@yandex.ru, **S. V. Gandilyan**, Ph. D., Docent, Head of Laboratory, angastroi@mail.ru, **V. V. Gandilyan**, Ph. D., Docent, Yerevan State University, Yerevan, 0025, Armenia

Corresponding author:

Gandilyan Seyran V., Docent, Head of Laboratory, e-mail: angastroi@mail.ru, Yerevan State University, Yerevan, 0025, Armenia

Current State and Prospects of Development of Microsystems Electromechanics

Received on December 30, 2016

Accepted on January 27, 2017

The article presents the modern state of an absolutely new direction in development of science — the microsystem electromechanics and analyzes a wide spectra of its practical applications and prospects.

Two main ways for creation of the micro- and nano-electromechanical energy converters as the basic elements of the microsystem electromechanics are discussed in detail: "from top to bottom" and "from bottom to top".

The article also describes the basic technological methods for designing of the main functional elements of the microsystem electromechanics, and characterizes the areas of their application in the traditional and new technologies (in the information and computer technologies, medicine, space and missile-artillery systems, etc.).

Keywords: *microsystem electromechanics, nano-electromechanics, MEMS and NEMS, molecular assemblage, nuclear assemblage, self-organizing*

For citation:

Karayan H. S., Gandilyan S. V., Gandilyan V. V. Current State and Prospects of Development of Microsystems Electromechanics, *Nano- i Mikrosistemnaya Tehnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 370—380.

DOI: 1017587/nmst.19.370-380

Introduction

The science of electromechanics, the progress of which is based on the use of achievements of the classical mechanics and electrodynamics, physics of semiconductors, nuclear physics, power engineering, optoelectronics, cybernetics, etc., develops in two main directions.

1. In the field of the theory of the electromechanical converters (EMC) of energy and their manufacturing there are many problems connected with an increase of the energy indicators, designing and development of more economic (less metal-consuming and more technological) electric cars and their elements.

2. Just like in microelectronics, computer technologies, telecommunication, etc. in the electromechanics there is a vital necessity for miniaturization (and super-miniaturization) of the functional elements of EMC of energy and the related systems [1—3].

The first direction in the development of science in the field of electromechanics in the scientific literature is traditionally interpreted as "*the macrosystem electromechanics*", the second — as "*the microsystem electromechanics*" — a major branch of the modern microsystem technologies (fig. 1) [4—6].

The basic objects of research in the macrosystem electromechanics are the classical-purpose EMC of energy: electric machines and devices from the microelectric motors with a power below 1kW, which make the basis of automation of the technological processes, up to the most powerful electric machines (hydro- and turbogenerators for the energy-generating systems) [7, 8].

Appearance of the microsystem electromechanics is connected with a new stage of development of the micro-mechanical and microelectronic technologies, which

made possible creation of the small-sized integrated multipurpose microelectro-mechanical systems (MEMS) as a set of the micromechanical and microelectronic components (or their subsystems), incorporated into a single integrated circuit. This allowed us to reach a new level in solving the problems of the weight-dimensions, speed, functionality, productivity, saving in costs, etc. At that, various instruments, circuits, devices and subsystems, in which the dynamic processes of the energy production have an electromechanical character and the structural functional elements have the size (at least in one direction) of $0.1 \mu\text{m} < l < 0.1 \text{mm}$, can be a part of a finished product or a finished product of MEMS [9—11].

A qualitatively new level of development of the electromechanics predetermines introduction of the achievements of nanoscience and nanotechnology in those branches of the natural sciences, engineering sciences and technologies, which have a basic value for the science in the field of electromechanics and industry as a whole.

A paramount problem for the electromechanics in all the range of the energy spectrum is development of the electrotechnical material science. An active research is going on for a practical application of different-purpose electric materials made by nanotechnologies.

Among the nanomaterials, promising for application in electromechanical engineering, it is necessary to name the following: amorphous alloys, graphene, magnetic ferropaper, carbon nanotubes, metal powders in the electroconducting layers, new frictional and electro-insulation materials, etc. The specific magnetic losses of the magnetic conductors made of the amorphous and nanocrystal alloys have smaller values in comparison with the electric steel and ferrites (less than

0.1 W/kg at $f = 60$ Hz). They possess high relative initial magnetic permeability, and also a saturation induction on the industrial and high frequencies ($B_S = 1.2...1.3$ T). For example, graphene is a nanostructured material with unique current — conducting properties, which allow it to be both a very good conductor, and a semiconductor. Besides, graphene is extremely strong and it withstands huge loads both on rupture and on deflection. The specified properties are important for the conducting materials of EMC of energy working in the conditions of intensive dynamic loads.

Another example of application of the nanotechnology is manufacturing of a winding wire with the use of a fine-dispersed powder of the silicon oxide chemically included into a polyamide insulation. This method allowed to increase the quality of a ready wire and to raise its temperature index up 280 °C.

From the above-stated it is possible to draw a conclusion, that introduction of the nanostructured electrotechnical materials in production of EMC of energy can promote a comprehensive increase of the level of the electromechanical engineering (especially large one). However, so far, this process is limited by the technical-technological difficulties of manufacturing and high costs of the specified materials [12—14].

In case the nanotechnologies and nanomaterials are used in the microsystem electromechanics, it is necessary to apply the term of nanosystem electromechanics. It concerns those cases, when the sizes and powers of EMC of energy are proportional to the sizes and powers of the biological converters of energy (at that, the smallest of the devices made by people are commensurable with the greatest molecules of the live organisms). At this level of powers one of the strategic directions in the nanoscience — nanoelectromechanics dominates, it deals with the electromechanical systems (NEMS) having the structural functional elements with dimensions (at least in one direction) of $10 \text{ nm} < l < 100 \text{ nm}$ [15, 16].

Solution of the paramount problems of the microsystem electromechanics demands a deep studying of the structure of a substance, synthesis of the processes in the substance, and also determination of the methods for obtaining of a crystal lattice of the conductors, dielectrics, semiconductors, diamagnetics, ferrimagnetics with a regular distribution of atoms and molecules depending on the proposed properties and purposes of these materials, development of the conductors and semiconductors on the basis of the polymeric and other chemical compounds. A sharp improvement is necessary of the quality of the atom-molecule compositions and composite materials for the installations of a direct and highly efficient transformation of the thermal, solar, nuclear and chemical energies into the electric energy.

Classification of EMC of energy and their systems by the operating principle

In the world around us (from the universal macro-objects, such as galaxies and stars, down to the micro-

objects — bioengines, atoms and variety of the elementary particles) the process of the electromechanical transformation of energy, determined by a direct interaction of the gravitation-inertial and electromagnetic forces, is a universal and fundamental phenomenon.

In the natural energy-formation processes the magnetic and electric fields participate simultaneously. If in the natural process the magnetic forces dominate, while the action of the electric forces can be neglected, then it is possible to say that the inductive EMC of energy "operate". If the electric forces dominate, while the action of the magnetic forces can be neglected, it is possible to assert, that the capacitive EMC of energy "operate". If the powers of the magnetic and electric forces in the total amount are commensurable with each other, it is possible to talk about the actions of the combined inductive-capacitive EMC of energy.

As a matter of fact, any natural process of transformation of an electromagnetic field can be modeled as an action of the combined inductive-capacitive EMC of energy, the subsystems of which are non-linearly interacting inductive and capacitive EMC of energy. An example of a combined system of the inductive and capacitive EMC of energy (magnetohydrodynamic — MHD and electrohydrodynamic — EHD generators and engines) is the Earth as a self-organizing multicomponent system interacting with the surrounding space through the electromagnetic and gravitation-inertial fields [17—19].

If we present a scale of powers for the natural EMC of energy, operating from a microcosm up to the space scales (fig. 2), and single out the preferable areas on it, in which the inductive and capacitive EMC of energy operate, it is possible to assert the following.

- In the natural microstructures, especially in the biological and physiological phenomena in the world of the cellular and subcellular structures of the wildlife, in the processes of transformation of the electromagnetic energy the main role belongs to the electric field (capacitive EMC of energy operate, which occupy the area from a point of a minimum up to approximately several watts).
- Inductive EMC of energy play the decisive role in the natural macrosystems (beginning from the macrosystems of the live organisms up to the space objects) and dominate in the field of the big powers (beginning from shares of a watt up to 10^{26} W and over).

The distribution functions of $f_L(P)$ and $f_C(P)$ are determined by the following expressions:

$$\left. \begin{aligned} f_L(P) &= \frac{N_L(P)}{N(P)}; \\ f_C(P) &= \frac{N_C(P)}{N(P)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

where P — power; $N_L(P)$ and $N_C(P)$ — average number of the inductive and capacitive EMC of energy; $N(P)$ — total quantity of EMC of energy.

At that $f_L(P)$ and $f_C(P)$ meet the following conditions:

$$\left. \begin{aligned} \lim_{P \rightarrow \infty} f_L(P) = 1, \quad \lim_{P \rightarrow P_{\min}^n} f_L(P) = 0; \\ \lim_{P \rightarrow \infty} f_C(P) = 0, \quad \lim_{P \rightarrow P_{\min}^n} f_C(P) = 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

On the scale of the powers for the natural EMC of energy, operating in the Earth scales, there are two "magic" points: the point of minimum — $P_{\min}^n \approx 10^{-17}$ Вт — the power of the smallest biological engine of a bacterium fiber (the most low-power capacitive EMC of energy created by the nature) and the point of maximum — $P_{\max}^n \approx 6,5 \cdot 10^{29}$ Вт — the power of the unipolar "electric dynamo" — planet of Earth [18, 19].

The mankind has mastered certain sites of a narrow interval of the scale of powers. The extreme points of this interval are: the point of minimum $P_{\min}^T \approx 0,6 \cdot 10^{-8}$ Вт — the power of the most low-power capacitive nano-engine, and the point of maximum $P_{\max}^T \approx 10^9$ Вт — the power of a turbogenerator (the most powerful electric machine created by mankind).

Just like in the natural phenomena, depending on the principle of realization of a mutual transformation of the electromagnetic and mechanical energy the technical EMC of energy and their systems in all the range of the power spectrum are subdivided into three big classes:

- Inductive (electro-inductive) EMC of energy, in which the working field is the magnetic field;
- Capacitive (magnetic-inductive) EMC of energy, in which the working field is the electric field;
- Inductive-capacitive (magnetic-electroinductive) EMC of energy, in which the electromechanical transformation is carried out by the magnetic and electric fields.

The basic circuits of EMC of energy are presented in fig. 3.

During the research of the questions of the physical and mathematical modeling and practical manufacturing of the combined inductive-capacitive EMC of energy one important circumstance should be taken into account.

A joint application of the inductive and capacitive EMC of energy in the total amount of one unit in the macrosystem electromechanics is not effective, because the inductive EMC of energy are the sources of the electromotive force, and the capacitive ones are the sources of the current. Such a combined system would represent a hybrid of the sources of the low and ultra-high voltage and would have low efficiency.

In the macrosystem electromechanics of certain interest are the combined systems consisting of the consecutive and parallel connections of the inductive and capacitive EMC of energy. When resonant modes occur in such systems, their power characteristics are the best, because of the exchange of the jet power between

the inductive and capacitive subsystems, and the combined EMC of energy cease to consume the jet power from the external energy sources for creation of the magnetic and electric fields [20, 21].

In the modern microsystem electromechanics the situation is absolutely different. Intensive research is going on for development of the nanostructured materials for the electrotechnical purposes, in which both the magnetic and the ferroelectric (or anti-ferroelectric) ordering systems exist simultaneously [22].

If in the previous century the successful development of the physics of a solid body in the field of the electrotechnical materials science, caused by an intensive development of the physics of the magnetic and ferroelectric phenomena separately, was reflected in the macrosystem electromechanics by realization of a new quantum leap of the inductive and capacitive macro-EMC of energy separately, then the nanostructured dual-purpose electrotechnical materials can be applied successfully in development of the circuits and components for a microsystem electric equipment, in which the basic elements are the combined inductive-capacitive micro- and nano-EMC of energy and their systems.

For example, as it is established in [23], the micro-miniature inductive-capacitive electric motors made by MST technology can be important for improvement, miniaturization and reduction of costs of the space and missile-artillery systems.

In the USA the following well-known companies are engaged in these activities: Intel, MEMS, Inolustry Group and Sandia National Labs. The American micro-miniature aircraft with the following parameters is known: weight — 80 g, wing spread — 15 cm, flight height ≈ 230 m, speed of flight ≈ 70 km/h, efficiency of the working engine (made by MST technology of the microminiature inductive-capacitive electric motor) ≈ 82 %.

Classification of MEMS and NEMS by the functional characteristics

In [24, 25] an analysis was carried out of the dynamic and structural characteristics and classification by the operating principle of the basic functional elements of MEMS and NEMS — micro- and nano-EMC of energy from the point of view of the micro- and nano-miniature versions — of the main theoretical positions of the electrophysics.

It was established, that notwithstanding the similar characteristics of MEMS and NEMS by the functional principles in MST, there was a cardinal difference between them concerning the central signs of the dynamic and energy states.

The basic specific features of MEMS and NEMS can be formulated as the following.

- The nanosystem technologies use the limiting conditions of superminiaturization of the electric, magnetic, mechanical and biological systems.

- If for MEMS the process of miniaturization of the functional elements, submitting to the general laws of development of the microsystem technologies, is possible to carry out by means of the models and technology of "from top to bottom" type (descending manufacture), which in an implicit form assume, that reduction of the sizes of the structures does not influence their properties (and the functioning principle), then during production of the nanotechnologies (including NEMS), the dominating role belongs to "from bottom to top" technologies (ascending manufacture), the basis of which is atomic and molecular synthesis ("molecular assemblage" or "atomic assemblage").
 - Since in MEMS the dynamic processes of transformation of the electromagnetic field are determined by the force of gravity (inertness) of the micromechanical elements, their physical and mathematical modeling can be carried out by means of the Faraday — Maxwell classical laws of electrophysics (the classical theory of electric circuits).
 - Since in the nanosystem technology (in NEMS, accordingly) the gravity force is insignificant in comparison with the forces of the chemical bonds of the interatomic and intermolecular influence, in the tasks of the physical and mathematical modeling the NEMS laws of the classical electrophysics (the corresponding theory of the electric circuits) should be corrected in accordance with the quantum laws of the electrophysics.
 - If the products of the microsystem technologies in the field of MEMS are purely technical by their structure, then the area of the nanosystem technologies requires fundamental research works and opportunities for development of NEMS products with a combination of the harmoniously operating technical and natural functional elements.
 - On the basis of imitation of the natural analogues (for example, with the use of the possibilities and functional properties of the biological nanostructures) the work is going on for development of NEMS, in which some of the functions are carried out by the elements of the live organisms (biomolecules, bacteria, etc.).
 - Since NEMS created by people can function in a wide range of temperatures (from low temperatures up to several hundreds of degrees) and in various aggressive environments, it is only natural, that one of the main motives for studying of the live substance in the nano-scale is a technological motive. It is possible to assert, that development of the nanosystem electromechanics predetermines the way to creation of the nature-like technologies [26, 27].
- Development of NEMS was promoted by the following discoveries of the twentieth century:
- Development of the carbon nanotubes and application of the probe microscopes and lithographic

methods for assemblage of received tubes into separate devices;

- Possibility of placing of the designed separate molecules in a backlash between the electrodes and measurement of a charge transfer through those molecules;
- Development of the probe methods for manipulation of the separate atoms of the substance and creation of nanostructures;
- Development of the chemical methods for synthesis of the nanocrystals and methods of their integration into larger ordered structures;
- Release of the biochemical "molecular engines" and their inclusion in a nonbiological environment [28, 29].

The element base of NEMS and nanorobotics is made of the carbon nanotubes (possessing exclusive physical and electric properties), carbon frame structures (for example, fullerene C_{60}), molecular motors, molecular switches, DNA complexes, etc., and/or their subsystems, which can be a part of a finished product or a finished product of NEMS. The general structure of NEMS includes sensitive elements (information sensors or nanosensors), channels for energy and information transfer, control devices and actuators (for example, nano-actuators) (fig. 4) [30].

Conclusion

Progress in the field of the electromechanical science in all the intervals of the energy and mass-dimensional indicators of EMC of energy and their systems in many respects depends on the development of the electro-technical materials science.

The materials science and technological developments, allowing due to the nanostructures to vary the physical-mechanical and physical-chemical properties of the materials and products, play a big role in creation of the macroelectromechanical and microelectromechanical (including nanoelectromechanical) systems.

The questions of the physical and mathematical modeling of the microsystem electromechanics will be discussed in the further works of the authors.

References

1. **Iosif'yan A. G.** *Voprosy e'lektromehaniki*. Moscow, E'nergiya, 1975. 227 p. (in Russian).
2. **Iosif'yan A. G.** *E'lektromehanika v kosmose*. Moscow, Znanie 1977. 64 p. (in Russian).
3. **Kopylov I. P.** Kuda idet e'lektromehanika, E'lektrotehnika. 2007, no. 12, pp. 50—55 (in Russian).
4. **Bertinov A. I., But D. A., Mizyurin S. R.** i dr. *Special'nye e'lektricheskie mashiny. Istochniki i preobrazovatelej e'nergii*. Moscow, E'nergoatomizdam, 1993, 361 p. (in Russian).
5. **Kopylov I. P., Gandilyan S. V., Gandilyan V. V.** Nekotorye voprosy obobshchennogo fiziko-matematicheskogo modelirovaniya e'lektromehanicheskikh preobrazovatelej e'nergii, *E'lektrotehnika*, 1998, no. 9, pp. 25—40 (in Russian).
6. **Osin I. L., Yuferov F. M.** *E'lektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustrojstv*. Moscow, Izd-vo MEI, 2003. 109 p. (in Russian).

7. **Gandilyan S. V., Gandilyan V. V.** Nekotorye problemy sozdaniya mikrominiaturnykh e'lektromekhanicheskikh preobrazovatelej e'nergii, *E'lektrichestvo*, 1999, no. 3, pp. 43–46 (in Russian).
8. **Kopylov I. P.** *E'lektricheskie mashiny*. Moscow, YUrajt, 2015, vol. 1. 267 p.; vol. 2. 407 p. (in Russian).
9. **Nonatehnologii v elektroniki**. Pod red. YU. A. CHaplygina. Moscow, Tehnosfera, 2005, 446 p. (in Russian).
10. **Gallacher B. J., Burdess J. S., Harris A. J., McNie M. E.** The desing and fabrication of a multi axis vibrating ring gyroscope, *Symposium gyro technology*, 2001. Stuttgart, Germany. 2001, pp. 10–20.
11. **Murali P.** Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films, *Reports on Progress in Physics*, 2001, vol. 64, pp. 1339–1388.
12. **Alferov ZH. I., Aseev A. L., Gaponov S. V., Kop'ev P. S., Panov V. I., Poltorackii E'.A., Sibel'din N. N., Sirus R. A.** Nanomaterialy i nanotehnologii, *Mikrosistemnaya tehnika*, 2005, no. 8, pp. 3–13 (in Russian).
13. **Gubin S. P., Tkachev S. V.** *Grafen i rodstvennyye nanoformy ugleroda*, Moscow, URSS, 2012, 101 p. (in Russian).
14. **Andrievskii R. A., Ragulya A. V.** *Nanostrukturnye materialy*, Moscow, Izdat. centr "Akademiya", 2005, 192 p. (in Russian).
15. **Nanotehnologiya v blizhajshem desyatiletii. Prognoz napravleniya razvitiya**. Pod red. M. K. Roko, R. S. Uil'yamsa i P. Alivisatos: Per. s angl., Moscow, Mir, 2002, 292 p. (in Russian).
16. **Lew H. S.** Electro-Tension and Torque in Biological Membranes Modelled as a Dipole Sheet, *Fluid Conductors. — Biomechanics*, 1972, vol. 5, no. 4, pp. 126–132.
17. **Gandilyan S. V., Gandilyan U. V.** Obobshchennoe e'lektromekhanicheskoe modelirovanie bioe'nergeticheskikh sistem, *E'lektrotehnika*, 1996, no. 6, pp. 53–56 (in Russian).
18. **Nanobiotehnologiya biomimeticheskaya membran** (Redaktor Donal'd K. Martin), Moscow, Nauchnyi mir, 2012, 216 p. (in Russian).
19. **Grigor'ev V. I., Grigor'eva E. V.** *Baroe'lektricheskii effekt i e'le-ktromagnitnye polya planety i zvezd*, Moscow, Izd-vo FIZMALIT, 2003, 192 p. (in Russian).
20. **Gandilyan S. V., Gandilyan U. V.** Sovmeshchennye induktivno-emkostnye e'lektricheskie mashiny, *Izvestiya RAN. Seriya E'nergetika i transport*, 1993, no. 2, pp. 50–62 (in Russian).
21. **Lapevich A. A., Grechihin L. I., Kuc' N. G.** E'nergeticheskaya baza bespilotnykh letatel'nykh apparatov, *Izvestiya vyssh. ucheb. zavedenii. Seriya E'nergetika*, 2010, no. 1, pp. 64–78 (in Russian).
22. **Pyatakov A. P., Zvezdin A. K.** Magnitoe'lektricheskie materialy i mul'tiferroiki, *UFN*. 2012, vol. 182, pp. 539–620 (in Russian).
23. **Turkov V. E., Zhukova S. A., Riskin D. D.** Reaktivnye mikrodivigateli, izgotavlivaemye po tehnologii MST, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2014, no. 12, pp. 7–21 (in Russian).
24. **Karayn H. S. and Gandilayn S. V.** Several Issues of Generalized Physical and Mathematical Modeling of Micro- and Nano-Electromechanical Systems (MEMS and NEMS), *Armenian Journal of Physics*, 2016, 9 (3), pp. 244–259.
25. **Kovshov A. N., Nazarov Yu. F., Ibragimov I. M.** *Osnovy nanotehnologii v tehnike*. Moscow, Izdatel'skii centr "Akademiya", 2009, 237 p. (in Russian).
26. **Al'tman Yu.** *Voennyye nanotehnologii: Vozmozhnosti primeneniya i preventivnogo kontrolya vooruzhenii*. Moscow, Tehnosfera. 2006. 424 p. (in Russian).
27. **Gandilyan S. V.** Nekotorye voprosy obobshchennogo fiziko-matematicheskogo modelirovaniya mikro- i nanoe'lektromekhanicheskikh sistem, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2015, no. 8, pp. 15–32 (in Russian).
28. **Haris P.** *Uglerodnye nanotrubki i rodstvennyye struktury*. Moscow, Tehnosfera, 2003. 236 p. (in Russian).
29. **Eleckii A. V.** Uglerodnye nanotrubki i ih e'missionnye svoystva, *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2002, vol. 172, no. 4, pp. 401–438 (in Russian).
30. **Nanotehnologiya v blizhajshem desyatiletiiya. Prognoz napravleniya issledovaniya**, Pod red. M. Roko, P. Alivisatos. Per. s angl. pod red. R. A. Andrianovskogo, Moscow, Mir, 2002. 292 p. (in Russian).

УДК 621.3.049.776

DOI: 10.17587/nmst.19.380-384

В. Д. Садков, канд. техн. наук, доц., e-mail: sadvd2016@mail.ru, **К. С. Фомина**, студент, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (НГТУ), ktp@nntu.nnov.ru

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛНОЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Поступила в редакцию 11.01.2017

Предложена универсальная методика расчета сопротивления пленочных элементов произвольной формы с произвольным расположением контактов, косвенно учитывающая двумерность поля потенциалов в исследуемом элементе и заключающаяся в его разбиении на базовые элементы прямоугольной и дуговой формы, расчет которых проводится по полученным формулам. Результирующее сопротивление определяется как сумма сопротивлений базовых элементов.

Ключевые слова: пленочный элемент, резистор произвольной формы, расчет, сопротивление

Введение

Специфической для микроэлектроники является произвольность конфигураций пленочных элементов, для которых вычисляется сопротивление [1].

Традиционный подход, связанный с получением аналитического решения поставленной задачи методами точного или приближенного конформных отображений, приводит (даже при произвольной конфигурации одной из сторон изначально

прямоугольного пленочного элемента) к алгоритмическим и вычислительным трудностям для каждой новой конфигурации элемента [2, 3]. Численные методы решения двумерных задач требуют освоения и использования серьезных программных продуктов.

В работе предлагается простая универсальная методика, косвенно учитывающая двумерность поля потенциалов в пленочном элементе и заключающаяся в его разбиении на прямоугольные и дуговые базовые элементы (БЭ), расчет которых проводится по полученным формулам.

Методика расчета

Конфигурация пленочного элемента произвольной формы приведена на рис. 1 и может включать в себя как плавные, так и ступенчатые участки границы.

При параллельности контактов 1 и 2 пленочный элемент разбивается на прямоугольные БЭ с отношением длины a_i к ширине Δ_i , удовлетворяющим условию $a_i/\Delta_i \geq 10$.

При отсутствии параллельности контактов 1 и 2 разбиение на прямоугольные БЭ продолжается до тех пор, пока вблизи точки 0 пересечения перпендикуляров к серединам контактов не выделится дугообразный участок. Этот участок разбивается на дуговые БЭ с таким отношением максимального радиуса r_{2i} к минимальному r_{1i} , чтобы выполнялось условие $r_{2i}/r_{1i} \geq \exp(5\alpha_i)$, где α_i — угол между сторонами дугового БЭ.

Размер электродов прямоугольных и дуговых БЭ определяется длиной области соприкосновения данного БЭ с предшествующим и последующим БЭ.

Сопротивление прямоугольного БЭ (рис. 2) вычисляем, отображая прямоугольник в плоскости Z

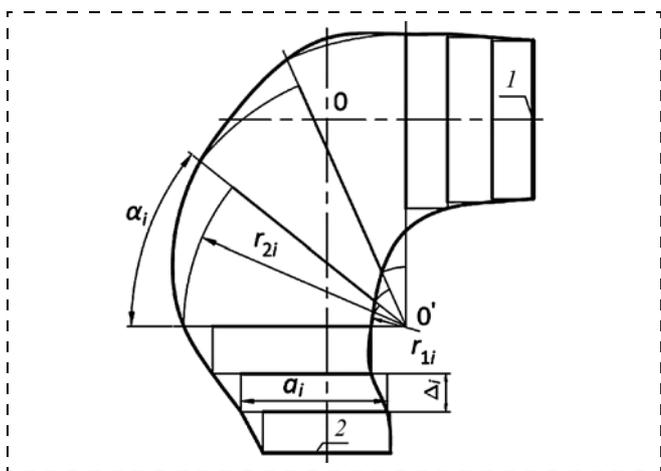


Рис. 1. Конфигурация пленочного элемента произвольной формы с взаимно перпендикулярно расположенными контактами 1 и 2
Fig. 1. Configuration of a film element of an arbitrary form with the mutually perpendicularly located contacts 1 and 2

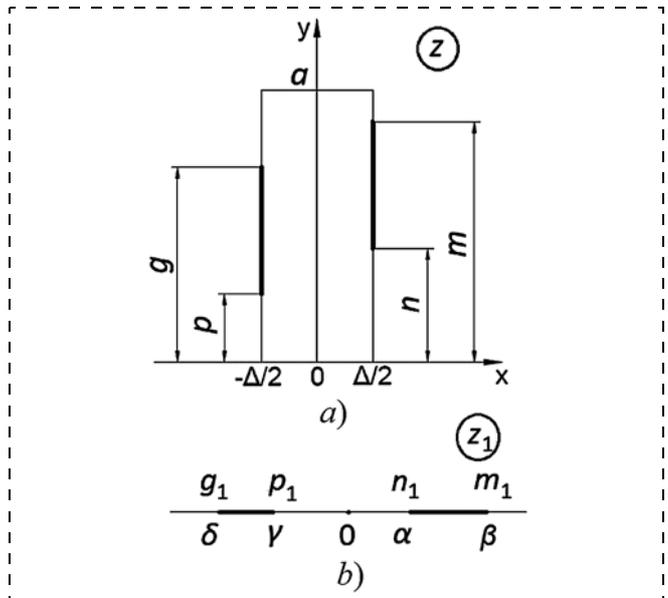


Рис. 2. Отображение прямоугольного базового элемента (a) на верхнюю полуплоскость (b)

Fig. 2. Visualization of a rectangular base element (a) on the top semiplane (b)

(рис. 2, a) на верхнюю полуплоскость Z_1 (рис. 2, b) с помощью функции

$$Z_1 = \operatorname{sn}\left(\frac{z}{\Delta/2} K, k\right), \quad \frac{K'}{K} = \frac{a}{\Delta/2}, \quad (1)$$

где $\operatorname{sn}(u, k)$ — эллиптический синус Якоби аргумента u и модуля k ; K и K' — полные эллиптические интегралы 1-го рода модуля k и дополнительного модуля $k' = (1 - k^2)^{1/2}$ соответственно [3].

При $a/(\Delta/2) \geq 10$ $k \rightarrow 0$, $K \rightarrow \pi/2$, $k' \rightarrow 1$, $K' \rightarrow \infty$. Для сопротивления БЭ (рис. 2) получаем [3]:

$$R = \rho \frac{K(d)}{K'(d)}, \quad d^2 = \frac{(\delta + \beta)(\alpha + \gamma)}{(\alpha + \delta)(\gamma + \beta)}, \quad (2)$$

где ρ — удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки;

$$\alpha = \operatorname{ch}(\pi n/\Delta), \quad \beta = \operatorname{ch}(\pi m/\Delta), \quad \gamma = \operatorname{ch}(\pi p/\Delta), \\ \delta = \operatorname{ch}(\pi q/\Delta).$$

После преобразований (при $x \gg 1$ $\operatorname{ch} x \approx e^x/2$, при $d \rightarrow 0$ $K(d)/K'(d) \approx (\pi/2)/\ln(4/d)$) получаем при $m > q$ и $n > p$:

$$R = \frac{\rho}{\frac{2}{\pi} \ln 4 + \frac{q-n}{\Delta}}. \quad (3)$$

В частном случае при $p = 0$, $q = a$

$$R = \frac{\rho}{\frac{2}{\pi} \ln 4 + \frac{m-n}{\Delta}}; \quad (4)$$

при $p = 0$, $q = a$, $n = 0$

$$R = \frac{\rho}{\frac{2}{\pi} \ln 2 + \frac{m}{\Delta}}; \quad (5)$$

при $p = 0, m = a$

$$R = \frac{\rho}{\frac{2}{\pi} \ln 4 + \frac{q-n}{\Delta}} \quad (6)$$

Видно, что сопротивление прямоугольного БЭ при $a/\Delta \geq 5$ определяется отношением наименьшей длины контакта к его ширине Δ . При этом знаменатель формул (3)–(6) увеличивается за счет рассеяния тока с концов электродов на $s(2/\pi)\ln 2 \approx 0,5s$, где $s = 1$ при рассеянии только с одного конца и $s = 2$ — с двух концов.

Расчет дуговых БЭ (рис. 3) сводим к рассмотренному прямоугольному БЭ, отображая область в плоскости Z (рис. 3, а) на прямоугольник в плоскости Z_1 (рис. 3, б) с помощью функции

$$Z_1 = \frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{z}{\sqrt{r_1 r_2}} \quad (7)$$

При этом координаты точек прямоугольника в плоскости Z_1 определяются выражениями

$$\begin{aligned} Z_{A1} &= \frac{\pi}{\alpha} \ln \sqrt{\frac{r_2}{r_1}}, & Z_{B1} &= -\frac{\pi}{\alpha} \ln \sqrt{\frac{r_2}{r_1}}, \\ Z_{C1} &= -\frac{\pi}{\alpha} \ln \sqrt{\frac{r_2}{r_1}} + i\pi, & Z_{D1} &= \frac{\pi}{\alpha} \ln \sqrt{\frac{r_2}{r_1}} + i\pi, \end{aligned}$$

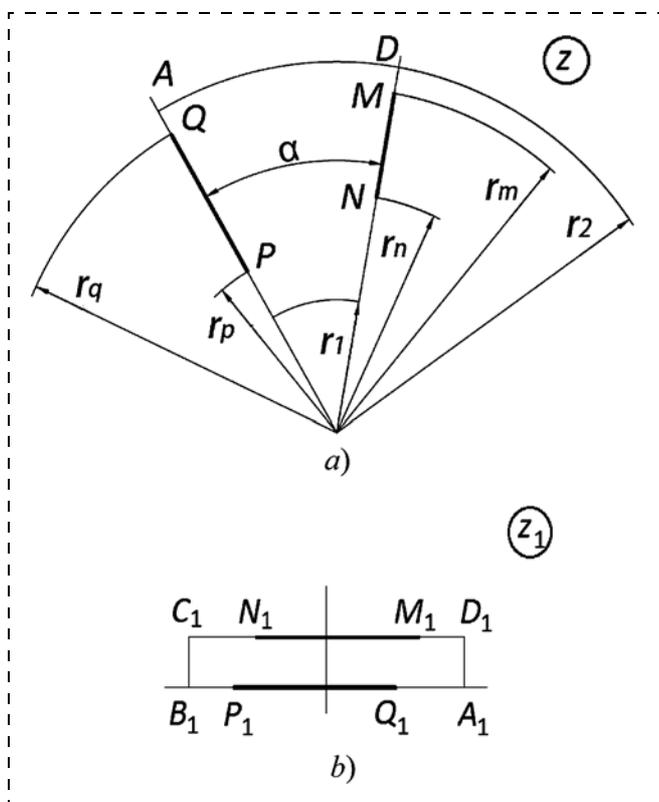


Рис. 3. Отображение дугового базового элемента (а) на прямоугольный (б)

Fig. 3. Visualization of an arc base element (a) on a rectangular one (b)

$$Z_{P1} = \frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{\sqrt{r_1 r_2}}{r_p}, \quad Z_{Q1} = \frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{r_q}{\sqrt{r_1 r_2}},$$

$$Z_{N1} = -\frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{\sqrt{r_1 r_2}}{r_n} + i\pi, \quad Z_{M1} = \frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{r_m}{\sqrt{r_1 r_2}} + i\pi.$$

Масштабируя элемент рис. 3, б (делим все размеры на π/α) и устанавливая его вертикально (как на рис. 2, а), получаем

$$\begin{aligned} a &= \ln(r_2/r_1), & \Delta &= \alpha, & n &= \ln(r_n/r_1), & m &= \ln(r_m/r_1), \\ p &= \ln(r_p/r_1), & q &= \ln(r_q/r_1). \end{aligned}$$

Используя результаты расчета прямоугольного БЭ, получаем для дугового БЭ (рис. 3, а) (напрямер, при $m > q$ и $n > p$):

$$R = \frac{\rho}{\frac{2}{\pi} \ln 4 + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{r_q}{r_n}}$$

Результирующее сопротивление пленочного элемента определяется как сумма сопротивлений всех БЭ.

Заключение

Предложена простая и универсальная методика, косвенно учитывающая двумерность поля потенциалов в исследуемом пленочном элементе произвольной формы и заключающаяся в его разбиении на прямоугольные и дуговые базовые элементы.

Расчет базовых элементов проводился строгим методом конформных отображений и позволил получить для условий предложенной методики простые формулы для их расчета.

Результирующее сопротивление пленочного элемента определяется как сумма сопротивлений базовых элементов.

Предложенная методика проверена сравнением с результатами моделирования в программном комплексе Elcut [4], реализована программно и включена в САПР резистивных структур НПО "ЭРКОН", г. Нижний Новгород.

Список литературы

1. Седаков А. Ю., Смолин В. К. Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления. М.: Радиотехника, 2011. 168 с.
2. Лаврик В. И., Фильчакова В. П., Яшин А. А. Конформные отображения физико-топологических моделей. Киев: Наукова думка, 1990. 376 с.
3. Фильчаков П. Ф. Приближенные методы конформных отображений: справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1964. 531 с.
4. www.tor.ru

Corresponding author:

Sadkov Viktor D., Associate Professor, Institute of Radio Electronics and Information Technologies Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. Y. Alekseev, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, sadvd2016@mail.ru

Calculation of Resistance Film Element of Arbitrary Shape

Received on 15 January 2017
Accepted on 10 February 2017

The authors propose a universal method for calculation of the resistance of the film elements of an arbitrary form and an arbitrary arrangement of the contacts, which indirectly takes into account the two-dimensionality of the field of potentials in the investigated element and consists in its splitting into the base elements of the rectangular and arc forms, the calculation of which is done in accordance with the received formulas. The resulting resistance is determined as the sum of the resistances of the base elements.

Keywords: a film component, resistor of any form, calculation of resistance

For citation:

Sadkov V. D., Fomina K. S. Calculation of Resistance Film Element of Arbitrary Shape, *Nano- i Mikrosistemnaya Tehnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 380–384.

DOI: 10.17587/nmst.19.380-384

Introduction

A specific feature of the microelectronics is arbitrariness of configurations of the film elements for which resistance [1] is calculated.

The traditional approach connected with obtaining of an analytical solution for the problem by the methods of exact or approached conformal visualizations, results (even at an arbitrary configuration of one of the sides of the initially rectangular film element) in the algorithmic and computing difficulties for each new configuration of an element [2, 3]. The numerical methods for solving of the two-dimensional problems demand development and use of serious software products.

The work presents a simple method indirectly taking into account the two-dimensionality of the field of potentials in a film element and consisting in its splitting into the rectangular and arc base elements (BE), the calculation of which is done by the received formulas.

Calculation method

The configuration of a film element of an arbitrary form is presented in fig.1 and may include smooth and step boundary sites.

If contacts 1 and 2 are parallel, the film element is divided into rectangular BE with the correlation of length a_i to the width Δ_i , meeting condition of $a_i/\Delta_i \geq 10$.

If contacts 1 and 2 are not parallel, splitting into rectangular BE will proceed till a bow-shaped site appears near point 0 of crossings of the perpendiculars to the middles of the contacts. This site is broken into the arc BE with such a correlation of the maximal radius r_{2i} to the minimal r_{1i} , which meets condition $r_{2i}/r_{1i} \geq \exp(5\alpha_i)$, where α_i is the angle between the sides of the arc BE.

The size of the electrodes of the rectangular and arc BE is determined by the length of the contact area of the given BE with the previous and subsequent BE.

Resistance of a rectangular BE (fig. 2) is calculated by visualization of a rectangle in plane Z (fig. 2, a) on the top semiplane Z_1 (fig. 2, b) by means of the function:

$$Z_1 = sn\left(\frac{z}{\Delta/2}K, k\right), \quad \frac{K'}{K} = \frac{a}{\Delta/2}, \quad (1)$$

where $sn(u, k)$ — elliptic sine of Jacoby of argument u and modulus k ; K and K' — full elliptic integrals of the 1st kind of modulus k and additional modulus $k' = (1 - k^2)^{1/2}$ accordingly [3].

At $a/(\Delta/2) \geq 10$ $k \rightarrow 0$, $K \rightarrow \pi/2$, $k' \rightarrow 1$, $K' \rightarrow \infty$.

For resistance of BE (fig. 2) we get [3]:

$$R = \rho \frac{K(d)}{K'(d)}, \quad d^2 = \frac{(\delta + \beta)(\alpha + \gamma)}{(\alpha + \delta)(\gamma + \beta)}, \quad (2)$$

where ρ — specific surface resistance of the resistive film;

$$\alpha = \text{ch}(\pi n/\Delta), \quad \beta = \text{ch}(\pi m/\Delta), \quad \gamma = \text{ch}(\pi p/\Delta), \\ \delta = \text{ch}(\pi q/\Delta).$$

After transformations (at $x \gg 1$ $\text{ch}x \approx e^x/2$, at $d \rightarrow 0$ $K(d)/K'(d) \approx (\pi/2)/\ln(4/d)$) at $m > q$ and $n > p$ we get:

$$R = \frac{\rho}{\pi} \frac{2 \ln 4 + q - n}{\Delta}. \quad (3)$$

In a particular case at $p = 0$, $q = a$

$$R = \frac{\rho}{\pi} \frac{2 \ln 4 + m - n}{\Delta}; \quad (4)$$

at $p = 0, q = a, n = 0$

$$R = \frac{\rho}{\frac{2}{\pi} \ln 2 + \frac{m}{\Delta}}; \quad (5)$$

at $p = 0, m = a$

$$R = \frac{\rho}{\frac{2}{\pi} \ln 4 + \frac{q-n}{\Delta}}. \quad (6)$$

As one can see, the resistance of a rectangular BE at $a/\Delta \geq 5$ is determined by the correlation of the least length of contact to its width Δ . At that, the denominator of the formulas (3)–(6) increases due to scattering of current from the ends of the electrodes by $s(2/\pi)\ln 2 \approx 0.5s$, where $s = 1$ at scattering only from one end and $s = 2$ — from two ends.

Calculation of the arc BE (fig. 3) we reduce to the considered rectangular BE, by visualization of the area in plane Z (fig. 3, a) on the rectangle in plane Z_1 (fig. 3, b) by means of the following function

$$Z_1 = \frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{z}{\sqrt{r_1 r_2}}. \quad (7)$$

At that, the co-ordinates of the points of the rectangle in plane Z_1 are determined by the following expressions

$$\begin{aligned} Z_{A1} &= \frac{\pi}{\alpha} \ln \sqrt{\frac{r_2}{r_1}}, & Z_{B1} &= -\frac{\pi}{\alpha} \ln \sqrt{\frac{r_2}{r_1}}, \\ Z_{C1} &= -\frac{\pi}{\alpha} \ln \sqrt{\frac{r_2}{r_1}} + i\pi, & Z_{D1} &= \frac{\pi}{\alpha} \ln \sqrt{\frac{r_2}{r_1}} + i\pi, \\ Z_{P1} &= \frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{\sqrt{r_1 r_2}}{r_p}, & Z_{Q1} &= \frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{r_q}{\sqrt{r_1 r_2}}, \\ Z_{N1} &= -\frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{\sqrt{r_1 r_2}}{r_n} + i\pi, & Z_{M1} &= \frac{\pi}{\alpha} \ln \frac{r_m}{\sqrt{r_1 r_2}} + i\pi. \end{aligned}$$

By scaling the element in fig. 3, b (we divide its dimensions by π/α) and setting it vertically (fig. 2, a) we get $a = \ln(r_2/r_1), \Delta = \alpha, n = \ln(r_n/r_1), m = \ln(r_m/r_1), p = \ln(r_p/r_1), q = \ln(r_q/r_1)$.

Using the results of calculation of the rectangular BE, we receive for arc BE (fig. 3, a) (for example, at $m > q$ and $n > p$):

$$R = \frac{\rho}{\frac{2}{\pi} \ln 4 + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{r_q}{r_n}}.$$

The resulting resistance of the film element is determined as the sum total of the resistances of all BE.

Conclusion

The authors offer a simple and universal technique, indirectly taking into account two-dimensionality of the field of potentials in a film element of an arbitrary form and consisting in its splitting into rectangular and arc BE.

Calculation of BE was done by the strict method of conformal visualizations, and it allowed to receive simple formulas for the conditions of the offered technique and for their calculation.

The resulting resistance of the film element is determined as the sum total of the resistances of the base elements.

The proposed technique was verified by a comparison with the results of modeling in Elcut program complex [4], it was also programmatically realized and included in the CAD resistive structures of NPO ERKON, Nizhny Novgorod.

References

1. Sedakov A. Ju., Smolin V. K. *Tonkoplennochnye jelementy v mikroelektronike: osnovy proektirovaniya i izgotovleniya*, Moscow, Radiotekhnika, 2011. 168 p. (in Russian).
2. Lavrik V. I., Fil'chakova V. P., Jashin A. A. *Konformnye otobrazheniya fiziko-topologicheskikh modelej*. Kiev: Naukova dumka, 1990. 376 p. (in Russian).
3. Fil'chakov P. F. *Priblizhennyye metody konformnykh otobrazhenij: spravochnoe posobie*. Kiev: Naukova dumka, 1964. 531 p. (in Russian).
4. www.tor.ru

Рисунок к статье А. Л. Деспотули, А. В. Андреевой
**«РАЗМЕРНЫЕ ФАКТОРЫ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ
 В СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ НАНОИОНИКИ»**

A. L. Despotuli, A. V. Andreeva
**«DIMENSIONAL FACTORS AND NON-LINEAR PROCESSES
 IN STRUCTURE-DYNAMIC APPROACH OF NANOIONICS»**

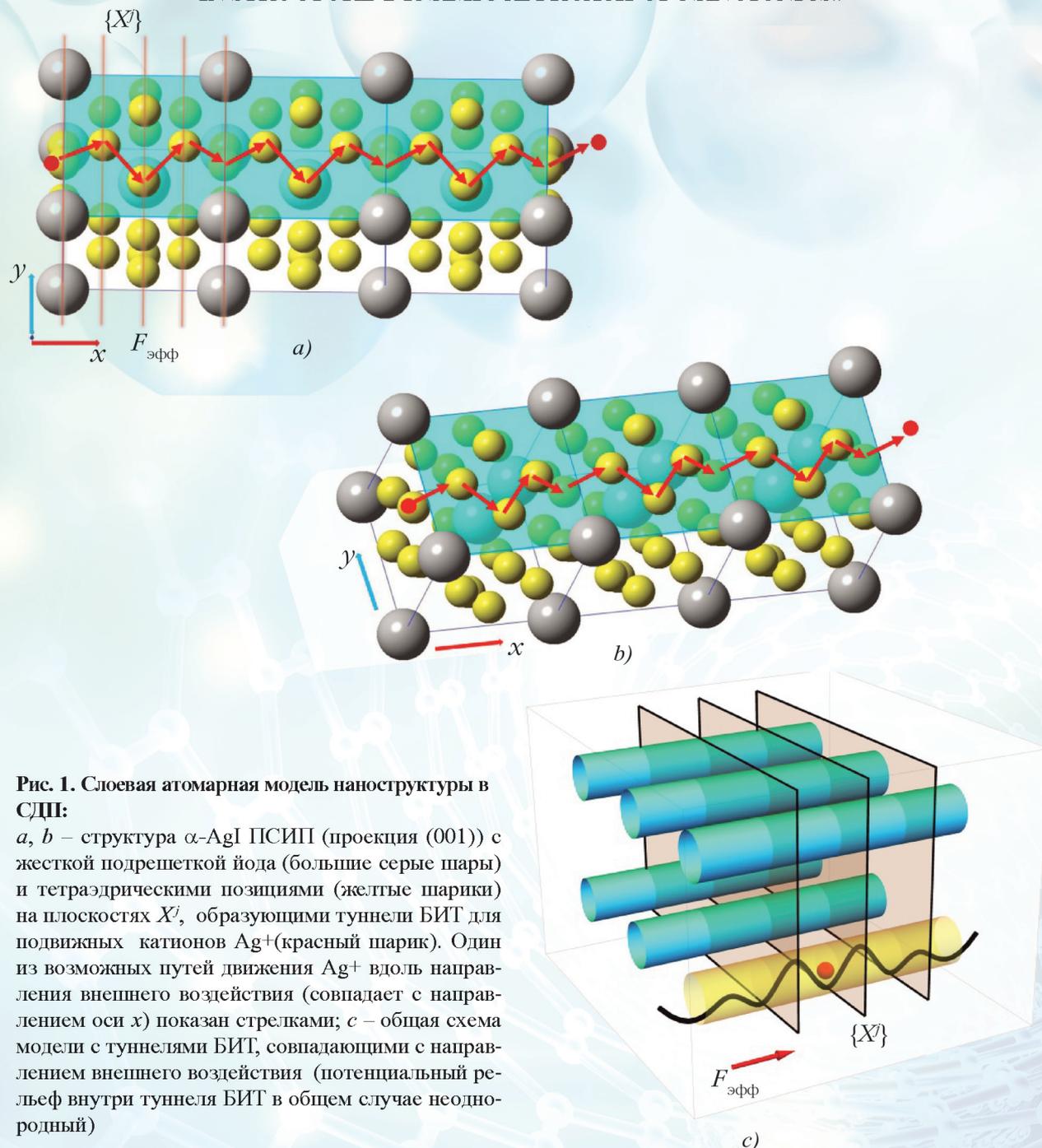


Рис. 1. Слоевая атомарная модель наноструктуры в СДП:
a, b – структура α -AgI ПСИП (проекция (001)) с жесткой подрешеткой йода (большие серые шары) и тетраэдрическими позициями (желтые шарик) на плоскостях X^i , образующими туннели БИТ для подвижных катионов Ag^+ (красный шарик). Один из возможных путей движения Ag^+ вдоль направления внешнего воздействия (совпадает с направлением оси x) показан стрелками; *c* – общая схема модели с туннелями БИТ, совпадающими с направлением внешнего воздействия (потенциальный рельеф внутри туннеля БИТ в общем случае неоднородный)

Fig.1. Layered atomic model of the nanostructure in SDA: *a, b* – structure of the α -AgI AdSIC ((001) projection) with the rigid iodine sub-lattice (large gray spheres) and tetrahedral positions (small yellow spheres) on the planes X^i , forming FIT-tunnels for mobile Ag^+ cations (red sphere). One of possible ways of Ag^+ movement along a direction of external influence (coincides with the x -axis direction) is shown by arrows; *c* – the general scheme of the model with FIT-tunnels coinciding with the direction of external influence (a potential relief in the FIT-tunnel is generally non-uniform)

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный теоретический
и прикладной научно-
технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписные индексы
по каталогам:

«Роспечать» – 72656;
«Пресса России» – 94033



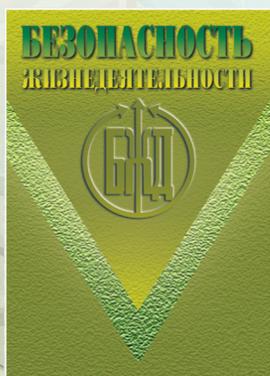
Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Подписные индексы
по каталогам:

«Роспечать» – 79492;
«Пресса России» –
27848



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписные индексы
по каталогам:

«Роспечать» – 79963;
«Пресса России» –
94032

Ежемесячный
междисциплинарный
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано микросистем в различные области науки, технологии и производства.



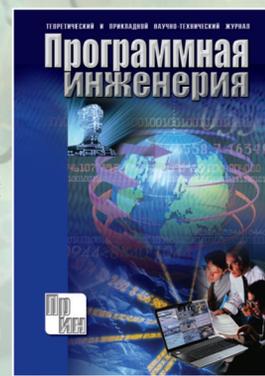
Подписные индексы
по каталогам:

«Роспечать» – 79493;
«Пресса России» –
27849

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.



Подписные индексы
по каталогам:

«Роспечать» – 22765;
«Пресса России» –
39795

Научно-аналитический
и производственный журнал

ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

В журнале освещаются информационно-аналитические материалы по вопросам разработки, постановки на производство и использования горного оборудования на предприятиях горнопромышленных отраслей; обеспечения качества, надежности и безопасности электромеханических комплексов на горно-добывающих и перерабатывающих твердые полезные ископаемые предприятиях.



Подписные индексы
по каталогам:

«Роспечать» – 20134;
«Пресса России» –
39708

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru