

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 6 (95) ✧ 2008

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в Российский индекс научного цитирования

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.

Асеев А. Л.

Гапонов С. В.

Каляев И. А.

Климов Д. М.

Ковальчук М. В.

Мокеров В. Г.

Никитов С. А.

Сигов А. С.

Чаплыгин Ю. А.

Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.

Андреевский Р. А.

Антонов Б. И.

Арсентьева И. С.

Астахов М. В.

Быков В. А.

Волчихин В. И.

Горнев Е. С.

Градецкий В. Г.

Гурович Б. А.

Журавлев П. В.

Захаревич В. Г.

Кальнов В. А.

Карякин А. А.

Квардаков В. В.

Колобов Ю. Р.

Кузин А. Ю.

Мокров Е. А.

Нарайкин О. С.

Норенков И. П.

Панич А. Е.

Панфилов Ю. В.

Петросянц К. О.

Петрунин В. Ф.

Путилов А. В.

Пятышев Е. Н.

Сауров А. Н.

Серебряников С. В.

Сухопаров А. И.

Телец В. А.

Тимошенко С. П.

Тодуа П. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство

"Новые технологии"

Издается с 1999 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Абрамов И. И. Термин "элемент" в микро- и нанoeлектронике . . . . . 2

### НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Рехвиашвили С. Ш., Киштыкова Е. В., Розенберг Б. А. Кинетика формирования наночастиц в растворах, содержащих хорошо адсорбирующиеся органические соединения . . . . . 4

Моисеев К. М., Норман Е. Д., Булыгина Е. В., Панфилов Ю. В., Петрухин Г. Н., Красулин Г. А. Исследование автоэмиссионных свойств углеродных нанотрубок на опаловых матрицах . . . . . 10

Карташев В. А., Карташев В. В. Исследование движения иглы туннельного микроскопа относительно поверхности . . . . . 13

Рембеза Е. С., Рембеза С. И., Ермолина Е. А., Гречкина М. В. Структура и электрофизические свойства нанокompозита Sn—Y—O . . . . . 19

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Какурин Ю. Б., Захаров А. Г., Котов В. Н. Моделирование массопереноса в неоднородных полупроводниковых структурах . . . . . 22

Дорошевич В. К. Требования к обеспечению качества и управлению технологическим процессом изготовления микросхем . . . . . 26

Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавый С. П. Анализ электромеханических параметров электростатических микрореле с автономными держателями . . . . . 28

Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Термоэлектрические явления в тонкопленочных тензорезисторных датчиках давления при воздействии нестационарных температур и виброускорений . . . . . 33

Лихошерст В. В. Сравнительный анализ характеристик микромеханических акселерометров прямого и компенсационного измерения . . . . . 38

### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Деулин Е. А. Исследование процесса трения газов о материал трубы как причины "водородной болезни" магистральных трубопроводов . . . . . 43

Михайлов В. П., Акимов И. Ю., Базиненков А. М. Системы виброизоляции и юстировки реологического типа . . . . . 51

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Рзянина А. В., Усанов Д. А., Скрипаль Ан. В., Островский Н. В., Козлов В. В., Ткачев А. Г., Скрипаль Ал. В. Оценка биологической совместимости углеродных наноструктур с клетками фибробластов китайского хомячка линии V-79 . . . . . 57

Елинсон В. М., Юровская М. А., Овчинникова Н. С., Лямин А. Н., Нежметдинова Р. А. Создание нанокompозитных биоматериалов нового поколения на основе наноструктурированных полимеров и органических производных фуллерена [60] с различными модифицирующими агентами . . . . . 60

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ . . . . . 64

ИНФОРМАЦИЯ . . . . . 72

Contents . . . . . 80

Аннотации статей журнала и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>, <http://eLIBRARY.ru>

### ПОДПИСКА:

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

Адрес для переписки:  
e-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

УДК 621.382 (075.8)

**И. И. Абрамов**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники, Минск,  
Республика Беларусь

## ТЕРМИН "ЭЛЕМЕНТ" В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

*Рассматривается термин "элемент" интегральной  
схемы в области микро- и нанoeлектроники.*

В связи с интенсивным развитием нанонаук в настоящее время чрезвычайно актуальной становится задача формирования терминологии в самых различных ее областях. Это важно для развития науки и техники, в учебном процессе, а также для разработки соответствующих стандартов. Последние значительные работы в области нанонаук (см., например, [1]) свидетельствуют о важности такой терминологии, так как, к сожалению, нередко под одним и тем же термином разные специалисты подразумевают достаточно различающиеся понятия. Большая и плодотворная работа проведена рядом ученых, опубликовавших статьи в журнале "Нано- и микросистемная техника". Можно отметить публикации журнала по формированию терминологии в области микро- и наносистемной техники [2–8]. В целом, работы в этом направлении продолжают лучшие традиции советских школ в области науки, техники и высшего образования, всегда уделявших серьезное внимание терминологии, ее чистоте.

В данной статье рассматривается один из терминов в области микро- и нанoeлектроники — *элемент интегральной схемы*. Этот выбор не случаен. Во-первых, главным объектом разработки и исследования в области нанoeлектроники, как и микроелектроники, должна стать интегральная схема (ИС) или в более широком смысле — интегрированная информационная система. Качество таких высокоинтегрированных систем во многом определяется именно активным элементом. Во всяком случае, об этом свидетельствует вся история развития микроелектроники. Во-вторых, мой опыт преподавания дисциплин "Моделирование технологических процессов и элементов интегральных микросхем", "Системы автоматизированного проектирования интегральных микросхем", "Моделирование элементов и приборов микроелектроники и нанoeлектроники" (для магистрантов) подтверждает особую важность терминологии в учебном процессе. Без нее нормальный (качественный) учебный процесс фактически невозмо-

жен. Бесспорно важным в указанных дисциплинах является рассматриваемый термин. Замечу, что применительно к математическому моделированию элементов ИС необходимый спектр определений основных терминов был сформулирован в учебных пособиях [9, 10]. В-третьих, дискуссии последних лет в литературе по поводу развития нанoeлектроники требуют определиться с термином "элемент" и в этой области, так как от его понимания зависит многое (см., например, [11, 12]).

### Микроелектроника

Проанализируем сначала ситуацию с термином "элемент интегральной микросхемы". Здесь, казалось бы, все более или менее ясно.

Обратимся к классике.

"Компоненты, которые входят в состав ИС и тем самым не могут быть выделены из нее в качестве самостоятельных изделий, называются *элементами ИС*, или *интегральными элементами*. Они обладают некоторыми особенностями по сравнению с обычными транзисторами, резисторами и т. д., которые изготавливаются в виде конструктивно обособленных единиц и соединяются в схему путем пайки" [13]. Так определил И. П. Степаненко в своем классическом учебнике термин "элемент ИС". Им были также выделены "...*активные* элементы типа транзисторов..." и "...*пассивные элементы* (резисторы, конденсаторы и т. п.)".

Сделаю одно замечание. Коллеги и ученики И. П. Степаненко, подготавливая второе издание учебника [14], исключили всего лишь два подчеркнутых слова из определения Игоря Павловича с учетом прошедшего времени. Согласитесь, — неплохо.

Анализ других учебных пособий в области микроелектроники приводит к выводу, что авторы либо просто избегают введения этого термина, либо делают незначительные правки по отношению к стандарту [15]:

"Элемент интегральной микросхемы — часть интегральной микросхемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая выполнена нераздельно от кристалла или подложки и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

*Примечание.* Под электрорадиоэлементом понимают транзистор, диод, резистор, конденсатор и др."

Отмечу два недостатка приведенных определений. Во-первых, это некоторая расплывчатость формулировки, что, однако, является вполне естественным (оправданным) для развивающейся области науки и техники, которой является микроелектроника (менее существенный недостаток). Во-вторых,

в определениях отсутствует размерный фактор (наиболее существенный недостаток). Отмечу, что ни в одном термине стандарта [15] нет *явного* указания на размеры.

Так, в соответствии со стандартом [15]:

"Интегральная микросхема — микросхема, ряд элементов которой нераздельно выполнен и электрически соединен между собой таким образом, что с точки зрения технических требований, испытаний, торговли и эксплуатации устройство рассматривается как целое.

*Примечание.* Под микросхемой понимают микроэлектронное устройство, рассматриваемое как единое изделие, имеющее высокую плотность расположения элементов и (или) компонентов, эквивалентных элементам обычной схемы".

Возникшая ситуация, впрочем, и понятна, так как в те времена о нанoeлектронике речь не шла. Правда, замечу, что она не изменилась и в энциклопедиях\* и энциклопедических словарях, например [16]:

"Интегральная схема (ИС, интегральная микросхема), микроминиатюрное электронное устройство, элементы которого неразрывно связаны конструктивно, технологически и электрически. Делятся на малые, средние, большие и сверхбольшие". Следовательно, и здесь приставка "микро-" понимается в том же смысле, что и в словах: "микроскопический", "микроорганизм", т. е. от греческого "mikros" — "малый".

Таким образом, анализ показывает, что, хотя и имеются в целом удовлетворительные определения термина "элемент" интегральной схемы в микроэлектронике, наиболее существенный их недостаток — отсутствие явной привязки к пространственному размеру. Именно с этим можно во многом связать возникающие "жаркие" дискуссии специалистов и недоразумения в литературе по поводу нанoeлектроники.

## Нанoeлектроника

Сложившаяся ситуация наиболее сложна именно для этой области, в которой мы фактически только начинаем по-серьезному работать, т. е. мы и здесь получаем "эстафету" от микроэлектроники.

Для того чтобы разобраться с этим, попытаемся ответить на следующий важный вопрос: "Существуют ли нанoeлектронные интегральные схемы?" Мой ответ — да! И здесь я мог бы просто сослаться на цикл моих статей [17]. Однако все же сделаю несколько комментариев.

Во-первых, я согласен с мнением академика Орликовского А. А. о том, что *"еще в 1999 году микроэлектроника стала нанoeлектроникой, преодолев рубеж технологического разрешения 100 нм"* [11]. Замечу, что в такой постановке вопроса нет и намека на "революцию". Речь идет об "эволюции", т. е. плавном, "эстафетном" переходе к новому качеству. Во-

\* Определения, приведенные в "Большой советской энциклопедии", "Физической энциклопедии", хотя и различаются, однако также обладают отмеченным недостатком.

вторых, даже если не согласиться с данным мнением, то нанoeлектронные интегральные схемы\* на приборных структурах, в которых принципиально важны квантовые эффекты, также создаются еще с прошлого века [17]. Достаточно отметить, что в США изготовление ИС на резонансно-туннельных структурах находится в серийном производстве с конца 90-х годов. Действительно, поспорить можно, если не учитывать факты и во главу угла ставить *вопрос о принципиальной важности квантовых эффектов*. Но при чем здесь они? Ведь в микроэлектронике мы никогда "не привязывались" к каким-либо физическим эффектам. Мы всегда неявно (приставка "микро-") и явно (первый закон Мура\*\*) *ориентировались на пространственные размеры* (топологические нормы, минимальный топологический размер, минимальный размер области элемента: длина затвора, длина канала и т. п.). Почему в нанoeлектронике надо менять "правила игры"? Автор не видит для этого веских оснований. Конечно, когда размеры (длина канала  $L_k$ ) кремниевых нанотранзисторов с МДП-структурой составят несколько длин волн де Бройля  $\lambda_B$  в кремнии ( $\lambda_B(\text{Si}) \approx 12$  нм при  $T = 300$  К), влияние квантовых эффектов на их электрические характеристики будет важно, но это произойдет при  $L_k$  около 20 нм. Здесь, по-видимому, и следует ожидать наиболее существенных, качественных изменений [17].

Исходя из принципа эволюционного развития, преобразования микроэлектроники в нанoeлектронику сформулируем определение термина "элемент нанoeлектронной интегральной схемы", основываясь на приведенных ранее определениях и комментариях, а именно: "Элемент нанoeлектронной интегральной схемы — это часть нанoeлектронной интегральной схемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента (транзистор, диод, резистор, конденсатор и др.) с характеристическими размерами в диапазоне от 1 до 100 нм, которая не может быть выделена как самостоятельное изделие.

*Примечание.* Под характеристическим размером могут пониматься минимальный топологический размер, размер активной области элемента, например, длина канала и др."

Аналогичным образом может быть модернизирован термин "интегральная схема" в области нанoeлектроники. Думаю, что введение более "жестких" определений, по крайней мере пока, нецелесообразно. Время покажет.

## Список литературы

1. **Nanoscience.** Nanotechnologies and Nanophysics / Eds. by C. Dupas, P. Houdy, M. Lahmani. Berlin—Heidelberg—New York: Springer—Verlag, 2007. 823 p.
2. **Мальцев П. П., Кузин А. Ю., Телец В. А.** О терминах в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2002. № 10. С. 35—37.
3. **Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В., Копьев П. С., Панов В. И., Полторацкий Э. А., Сибельдин Н. Н.,**

\* По аналогии с микроэлектроникой их можно было бы называть "интегральные наносхемы", но, как мне кажется, этого лучше не делать в свете изложенного выше.

\*\* В США, как известно, это вообще один из основных законов развития микроэлектроники страны.

Сурис Р. А. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3—13.

4. Лучинин В. В. Введение в индустрию наносистем // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 5. С. 2—7; 8.

5. Мальцев П. П. О терминологии в области микро- и наносистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 9. С. 2—4; 4,5.

6. Вернер В. Д. О терминологии в микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 9. С. 6—7.

7. Иванов А. А., Мальцев П. П., Телец В. А. О направлениях развития микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 1. С. 2—12.

8. Вернер В. Д., Иванов А. А., Коломенская Н. Г., Лучинин В. В., Мальцев П. П., Попов И. В., Сауров А. Н., Телец В. А. Изделия микросистемной техники — основные понятия и термины // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 2—5.

9. Абрамов И. И. Курс лекций "Моделирование элементов интегральных схем": Учеб. пособие. Мн.: БГУ, 1999. 92 с.

10. Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. Москва—Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2005. 152 с.

11. Наноэлектроника, квантовые компьютеры и электронная отрасль России. Рассказывает директор ФТИАН академик А. А. Орликовский // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 5. С. 4—10.

12. Носов Ю., Сметанов А. На пути в наноэлектронику. Исторические параллели и сопоставления // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 5. С. 11—16.

13. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие. М.: Сов. радио, 1980. 424 с.

14. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие. 2-е изд. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. 488 с.

15. ГОСТ 17021—88 (СТ СЭВ 1623—79). Микросхемы интегральные. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1988. 11 с.

16. Большой энциклопедический словарь. М.: ООО "Издательство АСТ"; ООО "Издательство Астрель", 2003. 1247 с.

17. Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники // Нано- и микросистемная техника. 2006. Ч. I, № 8, С. 34—37; Ч. II, № 9, С. 26—36; 2007, Ч. III, № 1, С. 36—47; Ч. IV, № 2, С. 24—32; Ч. V, № 3, С. 57—70; Ч. VI, № 7, С. 10—24; № 12, С. 73.

## НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 541.18 (075.8)

С. Ш. Рехвишвили, канд. физ.-мат. наук,  
Е. В. Кишტიкова, Б. А. Розенберг<sup>1</sup>, д-р хим. наук,  
Кабардино-Балкарский государственный  
университет, г. Нальчик,

<sup>1</sup> Институт проблем химической физики  
Российской академии наук, Черноголовка  
Московской области

E-mail: rsergo@mail.ru; rozen@icp.ac.ru

### КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ В РАСТВОРАХ, СОДЕРЖАЩИХ ХОРОШО АДСОРБИРУЮЩИЕСЯ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

*Получено и подробно проанализировано кинетическое уравнение, описывающее формирование неорганической наночастицы в растворе, содержащем хорошо адсорбирующееся органическое соединение (ХАОС). Найдены упрощенные аналитические решения уравнения и рассмотрены различные предельные случаи. В задаче учитывались размерные зависимости кинетических параметров реакций, а также зависимости поверхностного натяжения от размера наночастицы и степени заполнения ее поверхности молекулами ХАОС.*

#### Введение

Синтез наночастиц заданной формы и размеров с узким распределением по размерам и периодическим распределением их в пространстве является

ключевой проблемой современной нанотехнологии [1—6]. Использование наночастиц с такими характеристиками позволяет успешно решать различные технические и биомедицинские задачи [1—6].

Синтез неорганических наночастиц (металлов и металлоидов, их оксидов, сульфидов, селенидов и др.) часто проводят в водных и неводных растворах с добавками хорошо адсорбирующихся органических соединений (ХАОС). В качестве добавок обычно используют полимеры, низкомолекулярные и высокомолекулярные поверхностно-активные вещества [1—7]. Иногда в качестве таких добавок могут выступать сами органические растворители. Адсорбция этих добавок на наночастицах сопровождается формированием органической оболочки на неорганическом ядре и приводит к резкому (более чем на порядок) снижению межфазного поверхностного натяжения, стабилизации образующихся наночастиц от их агрегации, торможению роста, а также резкому повышению их устойчивости к окружающей среде (например, наночастиц металлов к их окислению кислородом воздуха). Кроме того, в таких процессах часто образуются наночастицы с достаточно узким распределением по размерам, что крайне важно с практической точки зрения для получения хорошо организованных двухмерных и трехмерных периодических наноструктур. Следует также заметить, что средний размер наночастиц, образующихся в присутствии ХАОС, существенно меньше (для благородных металлов это обычно 1—6 нм), чем в их отсутствие. Эти документированные в литературе экспериментальные наблюдения свидетельствуют о явном влиянии адсорбции компонентов реакционной системы на процесс формирования наночастиц. Тем не менее, до самого послед-

него времени это влияние, по существу, не учитывалось в теоретических моделях формирования новой фазы [7, 8].

Простой анализ термодинамических особенностей процессов формирования неорганических наночастиц, сопровождающихся адсорбцией, показывает, что в зависимости от интенсивности адсорбции, прекращающей рост частиц, радиус наночастиц может быть уменьшен вплоть до размеров атомных кластеров. Настоящая работа посвящена созданию кинетической модели формирования новой фазы в растворе, содержащем ХАОС, которая учитывает размерную зависимость поверхностного натяжения и реалистическую изотерму адсорбции. При этом решается следующая последовательность взаимосвязанных задач:

- расчет размерных зависимостей поверхностного натяжения и констант скорости реакций;
- расчет адсорбционной зависимости поверхностного натяжения;
- расчет радиуса наночастицы.

Основное допущение в нашей модели заключается в том, что степень заполнения поверхности наночастицы адсорбатом считается не зависящей от ее радиуса: для наночастиц разного размера степень заполнения в процентном соотношении остается одной и той же в зависимости от концентрации ХАОС в растворе. Молекулы ХАОС на неорганических частицах осаждаются с высокой эффективностью (время адсорбции  $\sim 10^{-12}$  с) в виде субмонослоя, так что зависимостью данного процесса от времени можно пренебречь. Математически это выражается в параметризации уравнения кинетики.

### Размерная зависимость параметров

Рассмотрим отдельную наночастицу. Строгое термодинамическое рассмотрение искривленной поверхности конденсированной фазы методом Гиббса приводит к уравнению Гиббса—Толмена—Кенига—Бафа [9]:

$$\frac{\partial \ln \sigma(r)}{\partial \ln r} = \frac{2\delta \left( 1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} \right)}{1 + 2\delta \left( 1 + \frac{\delta}{r} + \frac{1}{3} \frac{\delta^2}{r^2} \right)}, \quad (1)$$

где  $\sigma(r)$  и  $r$  — поверхностное натяжение и радиус наночастицы;  $\delta$  — постоянная Толмена, равная по порядку величины толщине поверхностного слоя. В общем случае уравнение (1) не разрешимо в явном виде. В работе [10] показано, что точное решение уравнения (1), когда  $\delta$  не зависит от  $r$ , может быть представлено в виде

$$\sigma(r) = \frac{\sigma^{(\infty)} r}{\delta} \exp \left( - \sum_{k=1}^3 \frac{x_k^2 \ln(r/\delta - x_k)}{3x_k^2 + 4x_k + 2} \right), \quad (2)$$

где  $x_k = \{-0,558; -0,721 + i0,822; -0,721 - i0,822\}$  — корни кубического уравнения  $3x^3 + 6x^2 + 6x + 2 = 0$ ;

$\sigma^{(\infty)}$  — поверхностное натяжение плоской поверхности ( $r \rightarrow \infty$ ).

Выражение (2) является сложным для дальнейшего использования, поэтому его целесообразно заменить более простой асимптотической формулой. При  $r \gg \delta$  в числителе и знаменателе правой части (1) правомерно убрать выражения в скобках. В этом случае элементарное интегрирование (1) приводит к известной формуле Толмена:

$$\sigma(r) = \frac{\sigma^{(\infty)}}{1 + \frac{2\delta}{r}}. \quad (3)$$

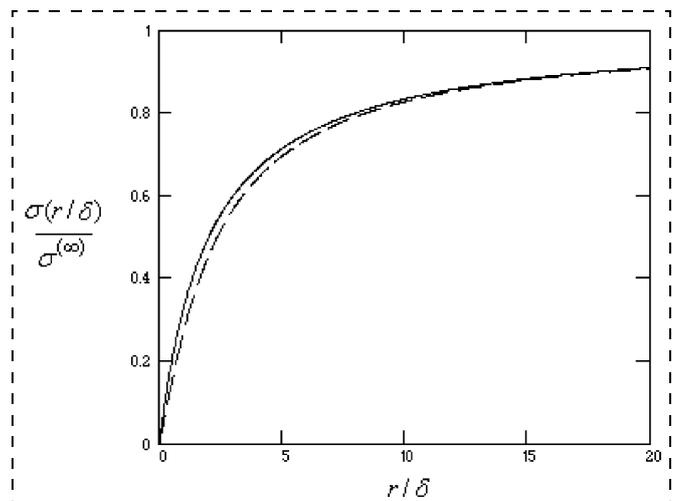
На рисунке показаны графики зависящих от  $r$  функций в (2) и (3). Можно видеть, что приближенная формула (3) вполне приемлемо описывает размерную зависимость поверхностного натяжения даже при малых  $r$ .

Перейдем теперь к размерным зависимостям констант скорости реакций, относящимся к образованию и растворению наночастицы. Оба процесса — образование и растворение — имеют активационный характер и описываются соответственно изменениями химических потенциалов  $\Delta\mu_g$  и  $\Delta\mu_d$ . Эти изменения по аналогии с [8] и с учетом (3) определяются кривизной поверхности в соответствии со следующими уравнениями:

$$\Delta\mu_g = \Delta\mu_g^{(\infty)} + 2\alpha V \frac{\sigma(r)}{r} = \Delta\mu_g^{(\infty)} + \frac{2\alpha V \sigma^{(\infty)}}{r + 2\delta}; \quad (4)$$

$$\Delta\mu_d = \Delta\mu_d^{(\infty)} - 2\beta V \frac{\sigma(r)}{r} = \Delta\mu_d^{(\infty)} - \frac{2\beta V \sigma^{(\infty)}}{r + 2\delta}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты переноса ( $\alpha + \beta = 1$ );  $\Delta\mu_{g,d}^{(\infty)}$  — изменения химических потенциалов в случае плоской поверхности;  $V$  — объем, приходящийся на одну частицу.



Зависимость поверхностного натяжения от радиуса наночастицы: сплошная линия — точная формула (2); штриховая линия — приближенная формула (3)

В выражениях (4) и (5) за радиус наночастицы принимается расстояние от центра наночастицы до поверхности натяжения. Такая форма учета размерной зависимости поверхностного натяжения наиболее удобна, так как не меняет вид уравнения Кельвина [9]. В теории активированного комплекса константа скорости реакции дается известной экспоненциальной формулой Эйринга. Учитывая эту формулу, а также выражения (4) и (5), для констант скорости реакций образования и распада наночастицы находим:

$$k_g = k_g^{(\infty)} \exp\left(-\frac{2\alpha\sigma^{(\infty)}V}{k_B T(r+2\delta)}\right); \quad (6)$$

$$k_d = k_d^{(\infty)} \exp\left(\frac{2\beta\sigma^{(\infty)}V}{k_B T(r+2\delta)}\right), \quad (7)$$

где  $k_g^{(\infty)} = \lim_{r \rightarrow \infty} k_g$  и  $k_d^{(\infty)} = \lim_{r \rightarrow \infty} k_d$  — константы скорости реакций для плоской поверхности;  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

При описании реакций нулевого и первого порядка часто вводят константы скорости с различными физическими размерностями. Можно, однако, избежать этого, если в определение потока, связанного с реакцией заданного порядка, ввести некоторую размерную константу. В связи с этим в нашем случае будем полагать, что константы  $k_g$  и  $k_d$  имеют одну и ту же размерность и определяют изменение толщины слоя вещества за единицу времени (размерность констант м/с). При  $\delta \rightarrow 0$  из (6) и (7) получаются формулы из работы [8], которые не учитывают размерную зависимость поверхностного натяжения. Учет этой зависимости, на наш взгляд, принципиально важен, особенно на начальной стадии образования наночастиц. Так, если по каким-либо причинам знак постоянной  $\delta$  изменится, то при  $r < 2\delta$  знаки показателей экспонент в (6) и (7) поменяются на противоположные. Здесь уместно указать, что за отрицательные значения  $\delta$  ответственны сильные межатомные взаимодействия на поверхности наночастицы [11].

### Учет влияния адсорбции

Данный раздел посвящен расчету поверхностного натяжения  $\sigma^{(\infty)}$ , входящего в формулы (6) и (7), с учетом адсорбции ХАОС. В растворе концентрация ХАОС, как правило, достаточно высока (на порядки выше концентрации неорганического вещества), и ХАОС не претерпевает фазового разделения с образованием самостоятельной фазы. Расход неорганического вещества на нуклеацию значительно превышает расход ХАОС на субмонослойную адсорбцию, поэтому концентрация ХАОС в растворе при образовании наночастиц остается практически неизменной. Как известно, общей особенностью изотерм ад-

сорбции органических соединений из раствора является их схожесть с изотермой Ленгмюра — с ростом концентрации адсорбата в растворе адсорбция возрастает до значений, соответствующих равновесному насыщению [12]. Для учета латерального взаимодействия молекул ХАОС между собой в качестве изотермы адсорбции можно использовать уравнение Фаулера—Гуггенгейма

$$C = \frac{\theta}{b(1-\theta)} \exp\left(-\frac{w\theta}{k_B T}\right), \quad (8)$$

где  $C$  — концентрация ХАОС в растворе;  $\theta$  — степень покрытия поверхности адсорбатом;  $b$  — параметр, учитывающий взаимодействие "адсорбат—адсорбат";  $w$  — энергия латерального взаимодействия ( $w > 0$  — притяжение,  $w < 0$  — отталкивание). Латеральное взаимодействие должно обязательно возникать между концевыми частями адсорбированных молекул вблизи участков их закрепления на поверхности частицы.

Чтобы определить изменение поверхностного натяжения при адсорбции, ниже используется подход, предложенный в работе [13]. Согласно уравнению Гиббса, поверхностное натяжение в процессе адсорбции будет изменяться на величину

$$d\sigma^{(\infty)} = -\Gamma d\mu, \quad (9)$$

где  $\Gamma$  — адсорбция. Если раствор близок к идеальному, то справедлив закон Генри и дифференциал химического потенциала

$$d\mu = k_B T \frac{dC}{C}. \quad (10)$$

Адсорбция с учетом степени заполнения есть

$$\Gamma = n_s \theta, \quad (11)$$

где  $n_s$  — максимальная поверхностная концентрация ХАОС.

Подставив (10) и (11) в (9), находим

$$\sigma^{(\infty)} = \sigma_0^{(\infty)} - n_s k_B T \int_0^\theta \left(\frac{d \ln C}{d\theta}\right) \theta d\theta, \quad (12)$$

где  $\sigma_0^{(\infty)}$  — поверхностное натяжение плоской поверхности при  $C = 0$ . После подстановки (8) в (12) и последующего интегрирования получаем выражение для поверхностного натяжения

$$\sigma^{(\infty)} = \sigma_0^{(\infty)} + n_s k_B T \left( \ln(1-\theta) + \frac{w\theta^2}{2k_B T} \right). \quad (13)$$

Выражение (13) устанавливает связь поверхностного натяжения плоской поверхности со степенью ее покрытия молекулами ХАОС в равновесных условиях. При  $\theta = 0$  имеется чистая поверхность, не покрытая добавкой. Если латеральным взаимодействием можно пренебречь, то  $w = 0$ , а из (13) получа-

ется известное уравнение Шишковского. После подстановки (13) в (6) и (7) находим:

$$k_g = k_g^{(\infty)} \exp \left\{ -\frac{2\alpha V}{k_B T(r+2\delta)} \left( \sigma_0^{(\infty)} + \frac{n_s w \theta^2}{2} \right) \right\} \times (1-\theta)^{-\alpha f(r)}, \quad (14)$$

$$k_d = k_d^{(\infty)} \exp \left\{ \frac{2\beta V}{k_B T(r+2\delta)} \left( \sigma_0^{(\infty)} + \frac{n_s w \theta^2}{2} \right) \right\} \times (1-\theta)^{\beta f(r)}, \quad (15)$$

$$f(r) = \frac{2n_s V}{r+2\delta}.$$

В отсутствие адсорбции при  $\theta = 0$  уравнения (14) и (15), как это и должно быть, переходят в (6) и (7).

### Уравнение кинетики роста наночастицы

В основе предлагаемой модели кинетики лежат следующие представления. Имеется отдельная наночастица в бесконечном объеме раствора, который содержит неорганическое вещество и ХАОС. С течением времени в результате перехода растворенного неорганического вещества в твердую фазу происходит рост наночастицы. В процессе роста из объема того же раствора на поверхность наночастицы адсорбируются молекулы ХАОС и прекращают ее рост на занятой адсорбтом поверхности.

Для получения уравнения кинетики необходимо составить уравнения для потоков в системе.

1. Поток, связанный с реакцией на поверхности частицы. В случае механизма многослойной нуклеации, который выглядит наиболее вероятным для наночастиц в коллоидном растворе, поток неорганического вещества к поверхности частицы описывается поверхностной реакцией первого порядка

$$J_1 = 4\pi r^2 k_g N, \quad (16)$$

где  $k_g$  — определяется выражением (14);  $N$  — концентрация атомов или молекул неорганического вещества вблизи поверхности наночастицы.

2. Поток, связанный с растворением наночастицы, т. е. с обратным процессом. В простейшем случае, когда растворение не зависит от концентрации  $N$  (реакция нулевого порядка), этот поток определяется выражением

$$J_2 = -4\pi r^2 k_d c_0, \quad (17)$$

где  $k_d$  — определяется выражением (15);  $c_0$  — постоянная с размерностью концентрации, возникающая при описании реакции нулевого порядка и характеризующая растворимость наночастицы.

3. Поток, обусловленный диффузией. Процесс диффузии, определяющий доставку неорганического вещества из объема раствора к наночастице, описывается первым законом Фика [8]:

$$J_3 = 4\pi r^2 D \left( \frac{dN}{dx} \right) \approx 4\pi r D (N_0 - N), \quad (18)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии атомов или молекул неорганического вещества в растворе;  $N_0$  — концентрация неорганического вещества в объеме раствора.

В условиях стационарности потоков

$$J_3 = J_1 + J_2, \quad (19)$$

поэтому с учетом (16)—(18) для концентрации неорганического вещества вблизи поверхности наночастицы из (19) получаем выражение

$$N = \frac{k_d c_0 r + D N_0}{k_g r + D}. \quad (20)$$

Подставив (20) в (18) и приняв во внимание определение для диффузионного потока [8], получим уравнение

$$\frac{4\pi r^2 dr}{V dt} = J_3 = 4\pi r D \left\{ N_0 - \frac{k_d c_0 r + D N_0}{k_g r + D} \right\}, \quad (21)$$

где  $t$  — время. Решением уравнения (21) является зависящий от времени радиус наночастицы  $r = r(t)$ . В конкретных расчетах степень заполнения  $\theta$ , входящая в формулы для скоростей реакций, должна быть заменена с помощью изотермы (8) на концентрацию ХАОС, что дополнительно сводится к решению трансцендентного уравнения. Из (21) и с учетом (14), (15) получим

$$\frac{dr}{dt} = V D c_0 \left\{ \frac{y_1 - \exp\left(\frac{y_2}{r+2\delta}\right)}{r + y_3 \exp\left(\frac{y_4}{r+2\delta}\right)} \right\}; \quad (22)$$

$$y_1 = \frac{N_0}{c_0}; y_2 = \frac{2V}{k_B T} \left( \sigma_0^{(\infty)} + n_s k_B T \left( \ln(1-\theta) + \frac{w\theta^2}{2k_B T} \right) \right);$$

$$y_3 = \frac{D}{k_g^{(\infty)}}; y_4 = \alpha y_2.$$

Начальное условие для уравнения (22) имеет вид

$$r(0) = 0. \quad (23)$$

Уравнение (22) представляет собой дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. Его интеграл, к сожалению, не может быть вычислен аналитически. При  $r'(0) = 0$  уравнение (22) имеет только одно тривиальное решение  $r(t) = 0$ , т. е. рост наночастицы невозможен. Для обеспечения роста требуется выполнение условия пересыщения раствора

$$N_0 > c_0 \exp(y_2/2\delta).$$

Другой предельный случай реализуется в растворе с высоким содержанием неорганического вещества при понижении поверхностного натяжения частицы за счет адсорбции ХАОС ( $y_2, y_4 \rightarrow 0$ ) и при большом радиусе наночастицы. Для него решение

уравнения (22) вместе с условием (23) находится без труда:

$$r(t) = -y_3 + \sqrt{y_3^2 + 2(y_1 - 1)DVc_0 t}. \quad (24)$$

Если коэффициент диффузии  $D$  мал, а константа скорости роста  $k_g^{(\infty)}$  велика, то при крайне высоком пересыщении ( $N_0 \gg c_0$ ) имеет место диффузионно-контролируемый рост частицы. При этом из (24) получается следующее известное выражение:

$$r(t) = \sqrt{2N_0 V D t}. \quad (25)$$

Выражение для радиуса критического зародыша получается, когда правая часть в уравнении (22) равна нулю:

$$r_c = \frac{y_2 - 2\delta \ln(y_1)}{\ln(y_1)}. \quad (26)$$

При  $y_2 \rightarrow 0$  из (26) получаем  $r_c = -2\delta$ , что имеет физический смысл лишь при  $\delta < 0$ . Это означает, что при данных условиях диффузионный контроль процесса образования наночастицы, скорее всего, осуществляется, когда ее поверхность натяжения находится выше эквимолекулярной поверхности. Причиной тому служат сильные межатомные или межмолекулярные взаимодействия, возникающие вблизи поверхности наночастицы при адсорбции ХАОС (см. [10]). На наш взгляд, при наличии ХАОС это может наблюдаться лишь в редких случаях. Если поверхность натяжения совпадает с эквимолекулярной поверхностью, то  $\delta = 0$ , и из (26) получаем выражение  $r_c = y_2/\ln(y_1)$ , которое при  $\theta = 0$  в точности согласуется с выражением (23) из работы [8].

Выделим, наконец, отдельно случай начальной стадии формирования наночастицы, когда экспоненты в числителе и знаменателе уравнения (22) могут быть разложены в ряды с точностью до линейных членов. Тогда уравнение (22) принимает вид

$$\frac{dr}{dt} = \frac{z_1 r + z_2}{z_3 r + z_4}; \quad (27)$$

$$z_1 = \frac{VDc_0 y_2}{4\delta^2} \exp\left(\frac{y_2}{2\delta}\right); z_2 = VDc_0 \left(y_1 - \exp\left(\frac{y_2}{2\delta}\right)\right);$$

$$z_3 = 1 - \frac{y_3 y_4}{4\delta^2} \exp\left(\frac{y_4}{2\delta}\right); z_4 = y_3 \exp\left(\frac{y_4}{2\delta}\right).$$

Решение уравнения (27) с учетом начального условия (23) выражается через функцию Ламберта  $W(x)$ , которая является решением трансцендентного уравнения  $W(x) \exp(W(x)) - x = 0$  [14]. Но в силу малости  $r$  можно воспользоваться и следующим приемом. Разделяя переменные в (27) и проводя интегрирование, получим

$$\frac{z_3 z_1 r + (z_4 z_1 - z_3 z_2) \ln(z_1 r / z_2 + 1)}{z_1^2} = t. \quad (28)$$

Видно сразу, что нулевой член разложения в ряд по  $r$  левой части уравнения (28) дает нуль. Учитывая первый член разложения, приходим к выражению

$$r(t) = \frac{z_2}{z_4} t = VDc_0 \frac{y_1 - \exp\left(\frac{y_2}{2\delta}\right)}{y_3 \exp\left(\frac{y_4}{2\delta}\right)} t. \quad (29)$$

Если адсорбция ХАОС на ранней стадии формирования наночастицы влечет за собой резкое уменьшение поверхностного натяжения, то  $y_2, y_4 \rightarrow 0$  и при  $N_0 \gg c_0$  из (29) следует простая формула

$$r(t) = k_g^{(\infty)} t = \frac{k_B T a t}{2\pi \hbar} \exp\left(-\frac{\Delta\mu_g^{(\infty)}}{k_B T}\right), \quad (30)$$

где  $\hbar$  — постоянная Планка;  $a$  — среднее межатомное или межмолекулярное расстояние в наночастице. В записи (30) учтена формула Эйринга с множителем перед экспонентой  $\nu = k_B T / (2\pi \hbar)$ . Максимальная скорость принята равной  $av$ . Формулу (30) в некотором смысле можно считать квантовой, так как она содержит постоянную Планка и атомистические характеристики; она, как несложно догадаться, может быть получена квантово-статистическим путем (см. приложение). Проведем ориентировочную численную оценку. Для значений  $a = 0,2$  нм,  $\Delta\mu_g^{(\infty)} = 0,5$  эВ и  $T = 300$  К из (30) определяем, что наночастица радиусом 5 нм образуется за время около  $10^{-3}$  с. Такая частица при плотной упаковке содержит свыше 10 атомов, т. е. является уже макроскопическим образованием.

Таким образом, на начальном этапе при малом радиусе наночастицы ее рост происходит прямо пропорционально времени. Данный вывод, хотя и кажется вполне логичным, нуждается в тщательной экспериментальной проверке, так как на начальной стадии нуклеации кристаллов из жидкой фазы важную роль могут играть реальная структура жидкой фазы, промежуточные метастабильные аморфные "до-зародыши" и различные полиморфные модификации кристаллических зародышей. В данной задаче рассматривается лишь образование сферических частиц. Учет несферической симметрии кристаллических частиц значительно усложнит теорию.

## Заключение

В данной статье впервые проанализирована кинетика процесса формирования неорганических наночастиц, в ходе которого имеет место конкурентная эффективная адсорбция стабилизирующей органической добавки. Получены выражения для констант скорости процессов образования и растворения неорганических наночастиц, учитывающие адсорбцию стабилизирующей органической добавки и размерную зависимость поверхностного натяжения. Выведено параметризованное уравнение кинетики, описывающее образование наночастицы в насыщенном растворе, содержащем хорошо адсорбирующуюся

стабилизирующую органическую добавку. Найдены решения уравнения при некоторых режимах протекания процесса, допускающие их экспериментальную проверку.

Кинетическое уравнение (22) предсказывает уменьшение радиуса формирующейся наночастицы и, соответственно, изменение дисперсности ансамбля наночастиц при увеличении интенсивности адсорбции ХАОС, что качественно согласуется с имеющимися в литературе экспериментальными данными [1–7]. Положительным моментом является то, что это уравнение содержит постоянную Толмена, которая характеризует размерную зависимость поверхностного натяжения и несет информацию о тонком межфазном слое. В будущем такая информация может быть использована для развития наших знаний о связи параметров межфазного слоя (величины и знака постоянной Толмена) с химической структурой адсорбирующихся добавок.

Полученные в статье результаты являются фундаментом для развития кинетической теории, в которой рассматривается временная эволюция функции распределения наночастиц по размерам при их образовании в жидкофазных процессах, сопровождающихся адсорбцией молекул ХАОС. Создание указанной выше кинетической теории позволит контролировать и оптимизировать технологические процессы в целях синтеза практически монодисперсных неорганических наночастиц заданного размера. Подобные неорганические наночастицы обладают способностью самопроизвольно организовываться в двух- и трехмерные периодические структуры. При увеличении дисперсности частиц постепенно утрачивается их способность к пространственной самоорганизации, которая является ключевым свойством, определяющим успех и эффективность использования неорганических наночастиц в электронике, фотонике, спинтронике, механике, катализе и медицине [1–7].

#### Список литературы

1. **Schmid G.** (Ed.) Nanoparticles. New York: Wiley-Interscience, 2004.
2. **Cao G.** Nano structures and nanomaterials: synthesis, properties and applications. London: Imperial College Press, 2004.
3. **Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun P. V.** Nanocomposite Science and Technology. Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
4. **Bhushan B.** (Ed.). Springer handbook of nanotechnology. Berlin: Springer, 2004.
5. **Rao C. N. R., Muller A., Cheetman A. K.** The chemistry of nanomaterials. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, 2004.
6. **Rozenberg B. A., Tenne R.** Polymer-assisted fabrication of nanoparticles and nanocomposites // Prog. Polym. Sci. 2008. V. 33, N. 1. P. 40.
7. **Cushing B. L., Kolesnichenko V. L., O'Connor C. J.** Recent Advances in the Liquid-Phase Syntheses of Inorganic Nanoparticles // Chem. Rev. 2004. V. 104. P. 3893.

8. **Talapin D. V., Rogach A. L., Hasse M., Weller H.** Evolution of an Ensemble of Nanoparticles in a Colloidal Solution: Theoretical Study // J. Phys. Chem. B. 2001. V. 105. P. 12278.

9. **Оно С., Кондо С.** Молекулярная теория поверхностного натяжения. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.

10. **Рехвиашвили С. Ш., Кишტიкова Е. В.** О температуре плавления наночастиц и наноструктурных веществ // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. № 10. С. 50.

11. **Рехвиашвили С. Ш., Кишტიкова Е. В., Кармокова Р. Ю., Кармоков А. М.** К расчету постоянной Толмена // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 2. С. 1.

12. **Адамсон А.** Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979.

13. **Рехвиашвили С. Ш., Кишტიкова Е. В.** Адсорбция и поверхностная энергия в экспериментах с кварцевым микробалансом // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 4. С. 137.

14. **Corless R. M., Gonnet G. H., Hare D. E., Jeffrey D. J., Knuth P. E.** On the Lambert W-function // Adv. Comput. Math. 1996. V. 5. P. 329.

#### Приложение

Будем предполагать, что скорость роста зародыша на начальном этапе соответствует средней тепловой скорости движения частиц (атомов или молекул), участвующих в образовании активированного комплекса. Рассмотрим распределение частиц в пространстве импульсов. Число частиц, находящихся в интервале импульсов от  $p$  до  $p + dp$ , выражается через одномерную плотность состояний

$$g(p)dp = \frac{a}{\pi\hbar} dp, \quad (\text{П.1})$$

где  $g(p)$  — плотность состояний. Используя (П.1) и функцию распределения частиц по импульсам  $f(p)$  из статистики Максвелла—Больцмана, для среднего импульса запишем

$$\begin{aligned} \langle p \rangle &= \int_0^{\infty} g(p)f(p)pdp = \\ &= \frac{a}{\pi\hbar} \exp\left(\frac{E_0}{k_B T}\right) \int_0^{\infty} p \exp\left(-\frac{p^2}{2mk_B T}\right) dp, \end{aligned} \quad (\text{П.2})$$

где  $E_0$  — уровень химического потенциала, отсчитанный от дна потенциального ящика с частицами.

Выполняя интегрирование в (П.2), получаем выражение

$$\langle p \rangle = \frac{k_B T m a}{\pi\hbar} \exp\left(\frac{E_0}{k_B T}\right). \quad (\text{П.3})$$

Средняя скорость теплового движения частиц

$$\langle v \rangle = \frac{k_B T a}{\pi\hbar} \exp\left(\frac{E_0}{k_B T}\right), \quad (\text{П.4})$$

что при  $\langle v \rangle = 2r/t$  и  $E_0 = -\Delta\mu_g^{(\infty)}$  точно соответствует формуле (30).

К. М. Моисеев<sup>1</sup>, Е. Д. Норман<sup>1</sup>,  
 Е. В. Бульгина<sup>1</sup>, доц.,  
 Ю. В. Панфилов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
 Г. Н. Петрухин<sup>2, 3</sup>,

Г. А. Красулин<sup>3</sup>, канд. техн. наук,  
<sup>1</sup>МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
 E-mail: moiseev@bmstu.ru

<sup>2</sup> ФГУП "НИИФП им. Ф. В. Лукина",  
 E-mail: gpetruhin@mail.ru

<sup>3</sup> Московский институт электронной техники  
 (МИЭТ), г. Зеленоград

## ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ОПАЛОВЫХ МАТРИЦАХ

*Представлены результаты процесса создания эффективных автоэммиттеров на основе углеродных нанотрубок (УНТ), выращенных на синтетическом опале CVD-методом. Дана оценка перспективы использования синтетического опала для создания автоэммиттеров на основе УНТ.*

### Введение

Автоэммиттеры на основе углеродных нанотрубок перспективны при решении широкого класса задач, связанных, например, с разработкой таких устройств, как матричные автоэммиттеры для плоских экранов, катоды микрорадиоламп терагерцового диапазона частот, автоэммиттеры для экономичных индикаторов и осветителей, терабитные запоминающие среды, и задач, связанных со считыванием информации в терабитных ПЗУ.

Актуальность использования автоэммиттеров в перечисленных устройствах обуславливается рядом их достоинств: достаточно низкие рабочие напряжения при больших плотностях и значениях эмиссионного тока, устойчивость к радиационному излучению в отличие от кремниевой технологии, очень широкий рабочий температурный диапазон (они могут работать как при гелиевых, так и при довольно высоких температурах — вплоть до 3000 °С). Например, обычные жидкокристаллические (ЖК) телевизоры не работоспособны при температурах ниже 0 °С и выше 50 °С.

Использование углеродных нанотрубок для изготовления автоэммиттеров представляется актуальным вследствие замечательных свойств первых (в частности, огромное aspectное отношение), относительной простоты и низкой энергоёмкости производства данных устройств [1].

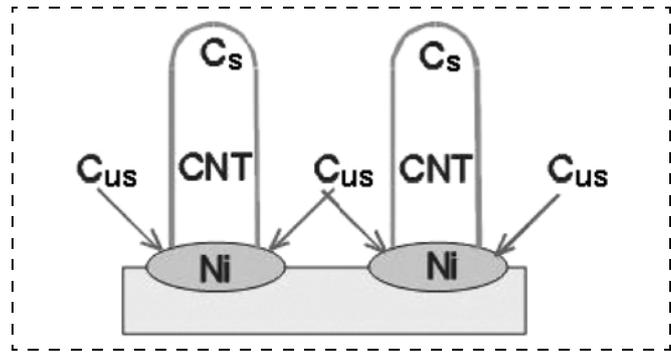


Рис. 1. Модель роста нанотрубок

### Модель роста УНТ

В данной работе для роста УНТ используется метод химического осаждения углерода из газовой фазы (CVD) с использованием катализатора и стимуляции разложения газа в тлеющем разряде. В качестве катализатора в нашем случае используется слой Ni толщиной 10 нм, который наносится на исходную поверхность (рис. 1). Затем полученную структуру нагревают в инертной атмосфере до 600—800 °С. При этом слой катализатора распадается на множество наноразмерных областей (бляшек), диаметр которых во многом определяет диаметр будущих нанотрубок. После этого в реактор подается углеродсодержащий газ.

Используя результаты работы [2], можно отметить ряд моментов, которые определяют процесс роста углеродных нанотрубок. Осаждающиеся на поверхность катализатора атомы углерода можно разделить на две группы. В первую группу входят атомы, которые связаны с тремя другими атомами углерода. Атом из этой группы называют атомом с насыщенными связями и обозначают как  $C_s$ . Во вторую группу входят атомы углерода, имеющие связи с другими атомами углерода, общее число которых не превышает двух. Естественно, что во вторую группу входят и одиночные атомы. Атом, входящий во вторую группу, называют атомом с не насыщенными связями и обозначают  $C_{us}$ . Нанотрубка растет на верхней части бляшки, а атомы  $C_{us}$  возникают по периферии верхней части бляшки (рис. 1) [3].

### Опаловые матрицы

Интерес к опаловым матрицам с тонкопленочными покрытиями и автоэммиттерами на основе УНТ вызван особенностью структуры поверхности опала. Синтетический опал представляет собой плотноупакованные наносферы диоксида кремния ( $SiO_2$ ) с диаметром 300 нм, образующие трехмерную решетку — опаловую матрицу (рис. 2). Такая структура дает основание полагать, что рост УНТ будет происходить упорядоченно в соответствии с топологией поверхности опала. Более того, наносферы могут способствовать увеличению эффективной поверхности автоэммиттера.

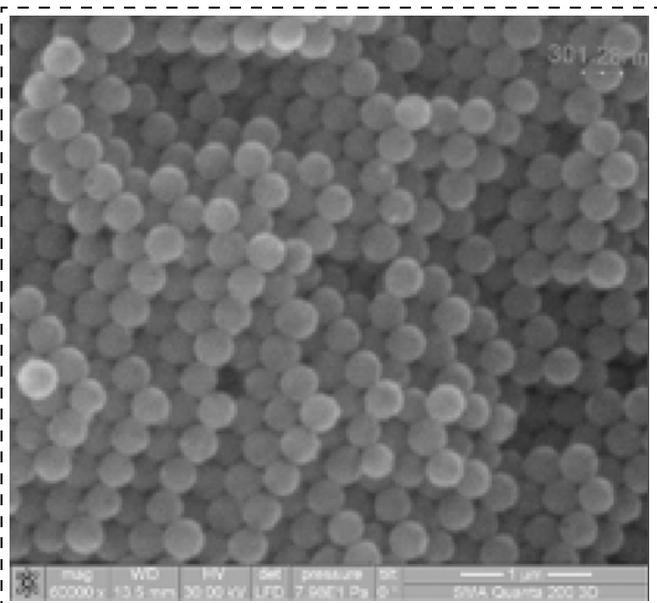


Рис. 2. Рельеф исходной опаловой поверхности, полученный на сканирующем электронном микроскопе FEI Quanta 200 3D

### Содержание эксперимента

Эксперимент проводился на установке института МИЭТ, позволяющей CVD-методом получать УНТ. На рис. 3 представлен исходный образец синтетического опала.

Схема и вид рабочей камеры установки изнутри показаны на рис. 4 и 5.

В эксперименте использовались режимы и технология, которые отработаны на установке и с наибольшей вероятностью дают положительные результаты [1]. Была подготовлена подложка, где в качестве буферного слоя и катализатора выбраны подслои хрома толщиной 20 нм и пленка никеля толщиной 10 нм соответственно. Напыление металлов на поверхность опала проводилось термическим методом. Перед напылением оснастка подверглась химической очистке.

*Характерные параметры процесса на установке:*

Температура, °С . . . . .	650
Давление, Па . . . . .	15
Время, мин . . . . .	35

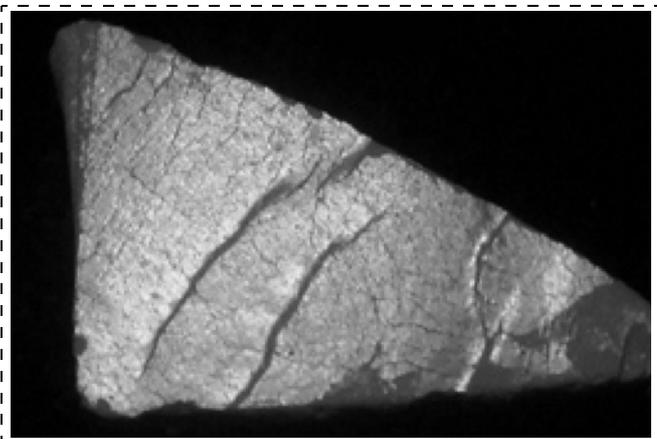


Рис. 3. Фотография исходного образца опала

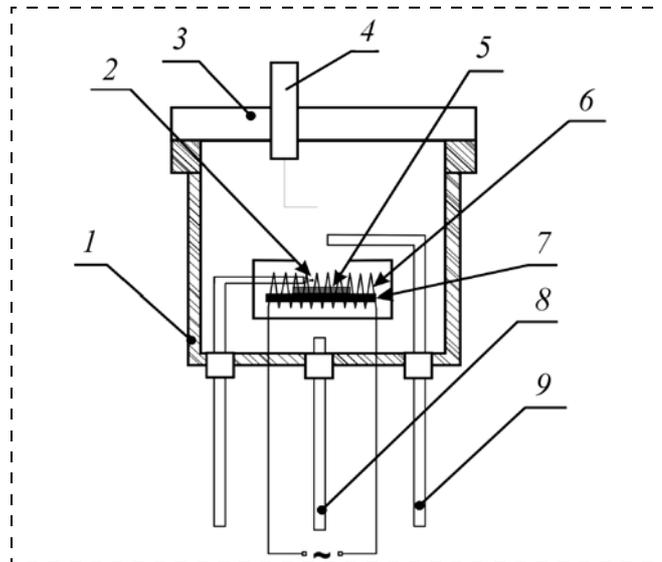


Рис. 4. Схема рабочей камеры:

1 — корпус; 2 — крышка; 3 — трубка подачи газовой смеси; 4 — трубка откачки рабочей камеры; 5 — нагреватель; 6 — термопара; 7 — подложкодержатель; 8 — образец; 9 — свеча



Рис. 5. Вид рабочей камеры изнутри

В качестве рабочего углеродсодержащего элемента использовался спиртовой пар. Он получался при пропускании через этиловый спирт смеси  $\text{Ag} + \text{H}_2$  (5%), а затем эта смесь, содержащая молекулы спирта, подавалась в рабочую камеру.

### Измерение характеристик

Для измерения плотности автоэмиссионного тока и его деградации во времени использовался специально разработанный для этой задачи стенд. Он создан на основе вакуумной системы напылительной установки с интегрированной в эту систему рабочей камерой от источника ионной очистки. В данной системе удается откачать рабочий объем камеры до давлений  $\sim 10^{-4}$  Па, при полном отсутствии в камере паров масла. На рис. 6 представлен измерительный столик с помещенным на нем образцом.

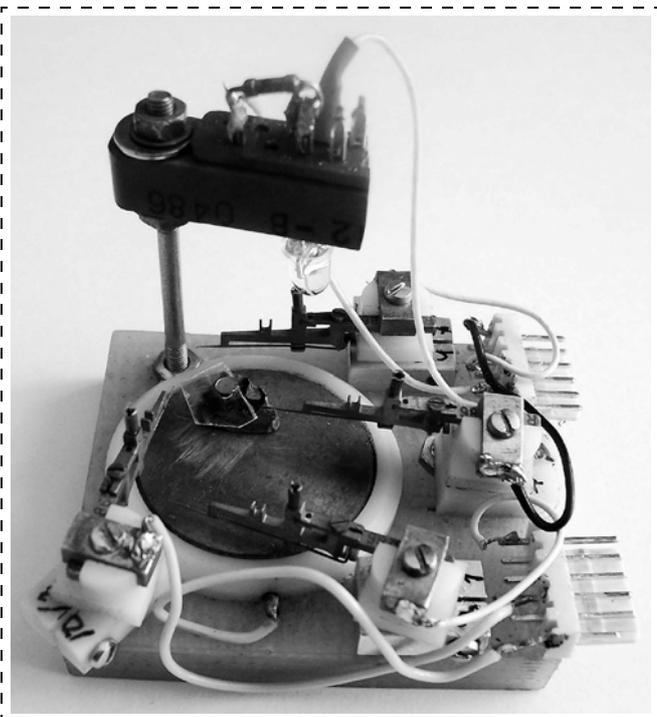


Рис. 6. Внешний вид измерительного столика с помещенным на нем опалом

### Результаты

Результаты получены на основании:

- измерения токов и напряжения эмиссии;
- деградации автоэмиссионных токов в течение времени;
- исследования поверхностей опала с выращенными на них УНТ методом сканирующей электронной микроскопии.

Критериями оценки значения эмиссии выбраны параметры:

- $U_{\text{порог}}$  — пороговое напряжение, при котором появляется автоэмиссионный ток, на 1 мкм межэлектродного расстояния;
- $I_{\text{max}}$  — максимальный ток с УНТ, протекающий через диафрагму 2 мм<sup>2</sup>;

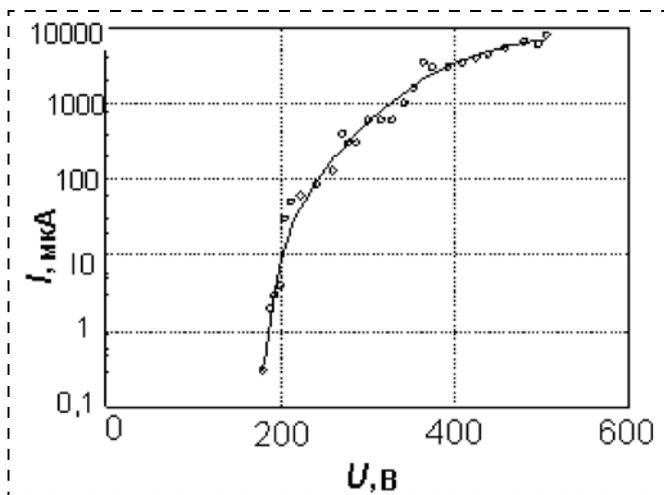


Рис. 7. ВАХ автоэмиссии из УНТ, выращенных на опале

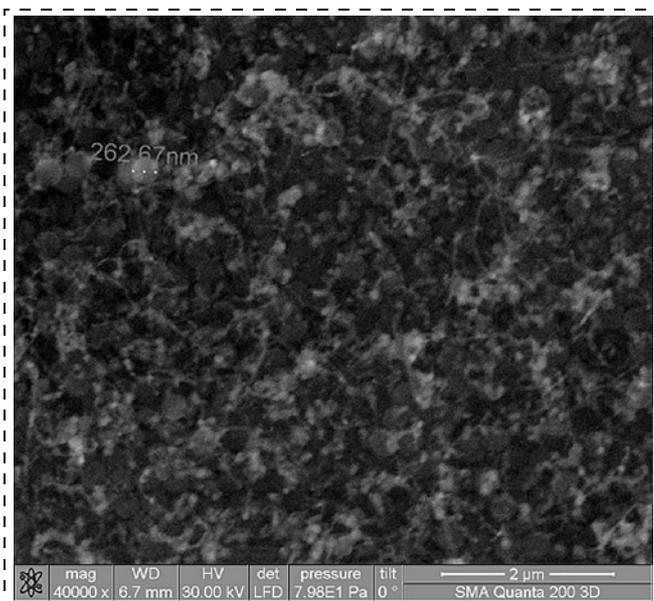


Рис. 8. Опаловые матрицы с УНТ

$I_{\text{сред}}$  — средний установившийся ток с УНТ, протекающий через диафрагму 2 мм<sup>2</sup>.

*Результаты измерения эмиссии:*

$U_{\text{порог}}$ , В/мкм	0.3
$I_{\text{max}}$ , мкА/мм <sup>2</sup>	0.8
$I_{\text{сред}}$ , мкА/мм <sup>2</sup>	0.2

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) автоэмиссии из УНТ, выращенных на опале, представлена на рис. 7.

Данный образец также исследовался на предмет деградации автоэмиссионного тока во времени. Критериями оценки значения деградации выбраны параметры:

$U$  — напряжение, подаваемое на образец;

$I$  — ток автоэмиссии до и после включения напряжения  $U$ ;

$\Delta t$  — время действия напряжения  $U$ .

*Результаты деградации тока:*

$U$ , В	495
$I$ (до), мкА	2,5—5
$\Delta t$ , мин	30
$I$ (после), мкА	0,5—0,7

Механизм деградации обусловлен действием пондеромоторных сил и связанных с ними больших механических напряжений в области соединения нанотрубки с катализатором. [4]

Изображение поверхности синтетического опала с УНТ, полученное на сканирующем электронном микроскопе FEI Quanta 200 3D, представлено на рис. 8. На скане отчетливо прослеживается рельеф опаловой матрицы с волокнами УНТ.

### Выводы

На основе проведенных экспериментов можно сделать вывод, что использование синтетического опала в качестве подложки для автоэммитера на основе углеродных нанотрубок перспективно при низких температурах, так как специфическая поверхность опаловой матрицы вносит механические на-

пряжения в пленку катализатора, которые снижают температуру, необходимую для распада наноразмерной пленки на капли, а также увеличивает эффективную площадь автоэмиттера.

Полученные автоэмиссионные измерения показали низкие пороговые значения эмиссии (3 В/мкм) и высокие токи (8 мкА/мм<sup>2</sup>), что является важным фактором для применения в устройствах автоэмиссионной электроники.

Исследование поверхности образцов на СЭМ показало наличие на ней УНТ. Поверхность очень плотно насыщена УНТ. При дальнейшем усовершенствовании технология создания автокатодов с УНТ на опаловых матрицах может составить конкуренцию традиционным технологиям, использующим кремниевые подложки.

#### Список литературы

1. Ильичев Э. А., Петрухин Г. Н. Особенности технологии выращивания углеродных нанотрубок на каталитических областях пониженной размерности (1D, 0D) для приборов на основе автоэмиссии // Нанотехнологии в электронике. 2007. С. 69–79.
2. Ding F., Rosen A., Bolton K. Chemical Physics Letters. 2004. 393. P. 309–313.
3. Гаврилов С. А., Ильичев Э. А., Козлитин А. И. и др. Латеральный эмиттер как базовый элемент интегральной эмиссионной электроники // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 11. С. 48–53.
4. Алексеева Е. Ю., Петрухин Г. Н. Автоэмиттеры на основе углеродных нанотрубок и анализ причин их деградации // Тр. 13-й Всероссийской межвузовской научно-техн. конф. студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика — 2008. М.: ИПК МИЭТ. С. 5.

УДК 51.007.57

**В. А. Карташев**, д-р. физ.-мат. наук., проф.,  
**В. В. Карташев**,  
Институт прикладной математики РАН,  
kart@list.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИГЛЫ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА ОТНОСИТЕЛЬНО ПОВЕРХНОСТИ

*Исследуется зависимость изображения поверхности, получаемого с помощью туннельного микроскопа, от радиуса закругления иглы. Предлагается алгоритм для восстановления рельефа поверхности с учетом конечных размеров конца иглы.*

Рассматривается задача интерпретации изображений, получаемых с помощью туннельного микроскопа конструкции НПО "Алмаз", который используется в РХТУ им. Д. И. Менделеева. Интерес к туннельной микроскопии связан с тем, что она позволяет получать сравнительно простым способом изображение рельефа подложки с разрешением порядка 1 нм и менее.

В зондовой микроскопии используется метод механической развертки, т. е. построчное сканирование поверхности [1–3]. Поверхность как бы "ощупывается" концом иглы на расстоянии примерно 1 нм. Измеренные относительные высоты преобразуются в изображение рельефа и выводятся на дисплей.

Восстановление реальной формы рельефа по получаемым результатам является достаточно сложной математической задачей, так как требуется учитывать различные физические факторы, которые влияют на туннельный ток, работу системы управления и приводов [4–6]. В общей постановке она сводится к решению уравнений в частных производных, где неизвестным является рельеф поверхности, т. е. граничные условия. Сложность прямого решения этой задачи приводит к необходимости поиска прибли-

женных решений, которые учитывают действующие факторы частично.

В настоящее время штатное программное обеспечение для визуализации поверхности дает достаточно грубое приближение, так как в нем в качестве рельефа принимается траектория движения зонда. Точность такого решения зависит от точности отслеживания заданного значения туннельного тока и выполнимости предположения, что туннельный ток не зависит от рельефа и формы конца иглы.

В предлагаемой работе проведено исследование влияния размеров конца иглы и физики туннельного тока. Результаты исследования показывают, что оба этих фактора вносят существенный вклад (порядка нанометра) в картину получаемого изображения, что позволяет сделать вывод о необходимости коррекции получаемого изображения в тех случаях, когда требуется получить разрешение 1 нм и менее.

### Конструкция туннельного микроскопа

Микроскоп конструкции НПО "Алмаз" (рис. 1, 2) состоит из: массивного основания 1, кожуха 2, уп-

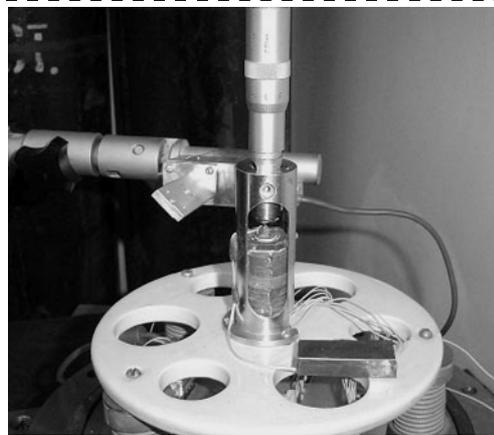


Рис. 1.

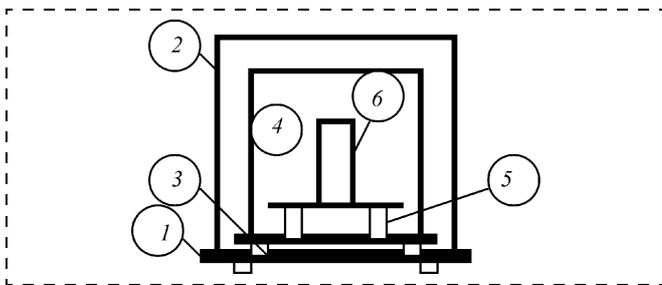


Рис. 2.

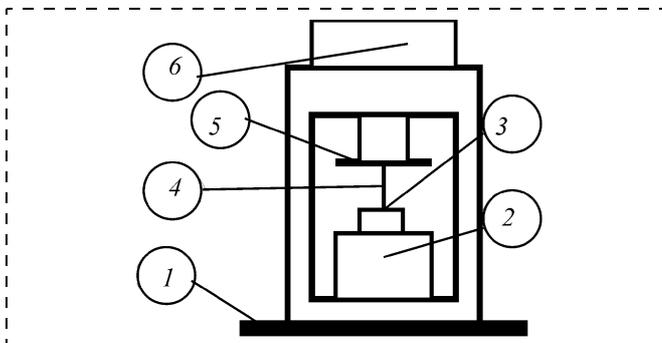


Рис. 3.

ругих опор 3, 5, камеры для проведения экспериментов 4, блока приводов 6.

Блок приводов (рис. 3) представляет собой: основание 1, пьезоприводы точных перемещений (с разрешением 0,1 нм), устройства 3 крепления зонда (иглы с радиусом закругления порядка 1 нм) 4, устройства крепления образца 5, микрометрического механизма 6 для выведения образца в рабочую зону пьезоприводов.

### Расчет плотности туннельного тока

Основным способом получения рельефа поверхности является сканирование при постоянном туннельном токе. В этом режиме на иглу микроскопа подается постоянное напряжение. Система управления поддерживает такую высоту до поверхности, чтобы туннельный ток оставался постоянным. Если поверхность является однородной и между иглой и подложкой нет других веществ, то в отсутствие возмущений конец иглы отслеживает рельеф поверхности.

Неточности в отслеживании туннельного тока и особенности его протекания приводят к тому, что расстояние между острием иглы и подложкой не является постоянной величиной. В результате измеряемый рельеф поверхности отличается от реального.

Рассмотрим зависимость плотности туннельного тока от расстояния до подложки. Эта зависимость получена в работах [1, 2]:

$$j = \frac{e\phi^*}{2\pi\hbar z^2} \left( \exp(-kz) - \left(1 + \frac{eV}{\phi^*}\right) \exp\left(-\sqrt{1 + \frac{eV}{\phi^*}}\right) \right);$$

$$k = \frac{4\pi\sqrt{2m\phi^*}}{\hbar},$$

где  $j$  — плотность туннельного тока;  $k$  — константа затухания волновой функции в области потенциального барьера;  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг — масса электрона;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона;  $\phi^* \approx 4$  эВ =  $6,4 \cdot 10^{-19}$  Дж — работа выхода электрона;  $\hbar = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж/Кл — постоянная Планка;  $V$  — подводимое напряжение;  $z$  — расстояние до поверхности.

При указанных значениях констант  $k = 0,2$  нм<sup>-1</sup>. В процессе сканирования подводимое напряжение меньше 1 В. Следовательно,  $eV < 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж  $\ll \phi^*$ .

Используем эту зависимость для упрощения формулы плотности туннельного тока, линеаризовав его по параметру  $\frac{eV}{\phi^*}$ .

В итоге получим:

$$j = \frac{e^2 k V}{4\pi\hbar z} \exp(-kz).$$

Подставив типичное значение подводимого напряжения  $V = 0,3$  В, находим, что

$$j = \frac{0,45 \cdot 10^{-6} k}{z} \exp(-kz).$$

Эту формулу удобно исследовать, если расстояние до поверхности  $z$  измерять в ангстремах. Тогда

$$j = \frac{0,9 \cdot 10^{-6}}{z} 7^{-z} \text{А/Å}^2.$$

Диаметр атома приблизительно равен  $2\text{Å}$ . Если в процессе сканирования расстояние между иглой и подложкой больше диаметра атома, т. е.  $z > 2\text{Å}$ , то в этом случае  $7^{-z} \ll 1/z$  и, следовательно, зависимость туннельного тока от расстояния определяется исключительно скоростью убывания показательной функции.

Отсюда можно сделать вывод о том, что удаление иглы от поверхности на  $1\text{Å}$  приводит к уменьшению туннельного тока в 7 раз, т. е. почти на порядок. Расстояние между атомами составляет приблизительно  $3\text{Å}$ . Отсюда делается вывод, что большая часть туннельного тока течет через ближайший к сканируемой поверхности слой атомов, так как туннельный ток для второго слоя меньше в  $7^{-3} = 350$  раз. Для того чтобы существенная доля туннельного тока приходилась на второй слой атомов, форма конца иглы должна быть такой, чтобы диаметр второго слоя был бы в  $\sqrt{350} \approx 18$  раз больше, чем первого.

Рабочее значение туннельного тока равно примерно  $10^{-9}$  А. Обозначив через  $S$  площадку на игле, через которую протекает большая часть тока, получаем оценку для расстояния до подложки  $z$ , удовлетворяющее условию

$$\frac{S}{z} 7^{-z} = 10^{-3}. \quad (1)$$

Если условно принять, что площадь  $S$  равна площади атома ( $4\text{Å}^2$ ), то из этого неравенства следует, что расстояние, на котором должен двигаться кончик иглы для того, чтобы туннельный ток оказался равным  $10^{-9}$  А, составляет  $4\text{Å}$ . В литературе (в том

числе в [2]) гипотетически считается возможной такая ситуация, когда весь туннельный ток течет через атом, находящийся на конце иглы.

### Оценка размеров конца иглы

Случай, когда весь туннельный ток течет через иглу толщиной в один атом, представляется маловероятным, так как плотность тока окажется такой же, как если бы продолжительное время ток 10 000 А протекал по проводу диаметром 1 мм. Для медного провода, например, допустимая плотность тока около 20 А/мм<sup>2</sup>. Вольфрамовая нить в электрической лампе светится при пропускании через нее тока примерно 0,3—0,5 А. Для того чтобы проволока не окислилась, колба заполнена инертным газом. Оксиды всех металлов, за исключением олова, не являются проводниками, поэтому окисление конца иглы приведет к прекращению прохождения туннельного тока.

Чтобы уменьшить плотность тока на два порядка, во столько же раз необходимо увеличить площадь сечения проводника. Отсюда следует, что средний диаметр усика на конце иглы при туннельном токе 1 нА должен иметь диаметр порядка 5 нм.

Учет ограничений на плотность тока позволяет оценить снизу и размеры площадки, через которую туннельный ток попадает в иглу. Естественно предположить, что плотность тока через площадку не может быть более чем на порядок выше тока, протекающего через конец иглы, т. е. 300 А/мм<sup>2</sup>. При токе 10<sup>-9</sup> А площадка должна иметь диаметр не менее 2 нм. Если, как было показано выше, почти весь туннельный ток течет через один слой атомов, то, принимая во внимание размеры площадки, можно сделать вывод о том, что ближе к поверхности может находиться всего лишь несколько атомов. Это условие накладывает ограничение на радиус закругления иглы.

Для оценки радиуса закругления воспользуемся рис. 4. Здесь обозначены:  $r$  — радиус атома,  $u$  — расстояние между атомами,  $s$  — радиус площадки,  $R$  — радиус закругления иглы. Тогда

$$s^2 = R^2 - (R - (u + r))^2; R = \frac{s^2 + (u + r)^2}{2(u + r)}.$$

Принимая во внимание, что  $r = 0,1$  нм,  $u = 0,3$  нм,  $s = 1$  нм, находим  $R = 10$  нм. Полученная оценка радиуса закругления площадки существенно больше оценки диаметра иглы. Однако противоречия не возникает, так как эти величины не связаны друг с другом функциональной зависимостью.

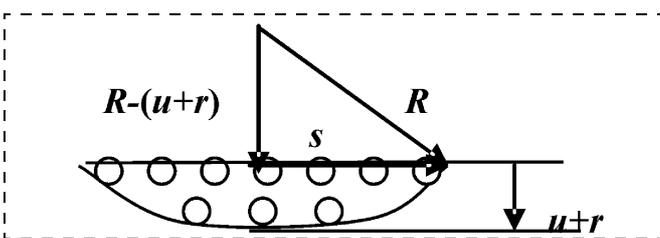


Рис. 4.

При некоторых технологиях производства игл на конце иглы получается сверхтонкий волосок. Ток, который может пропустить этот волосок, ограничен его толщиной. Тонкие медные проводники способны длительно пропускать ток порядка 10 А на каждый квадратный миллиметр сечения. Следовательно, через медный проводник диаметром 1 нм можно пропустить ток порядка  $10 \cdot 10^{-12}$  А. Чтобы длительно пропускать ток 10<sup>-9</sup> А, волосок должен иметь толщину несколько нанометров. Этот вывод находится в согласии с полученными выше оценками.

Аналогичные рассуждения можно провести относительно размеров области на поверхности, через которую проходит основная часть туннельного тока. Разница состоит в том, что область перемещается по поверхности вслед за иглой, и, следовательно, в каждой точке она существует кратковременно. Поэтому, хотя ее размер может быть в несколько раз меньше диаметра площадки на игле, она все же конечна и составляет доли нанометра.

Таким образом, сила туннельного тока является одним из ограничений чувствительности туннельного микроскопа. Детали, которые меньше диаметра площадки, через которую туннельный ток попадает на сканируемую поверхность ("пятна проводимости"), воспроизводятся с искажениями. Они как бы осредняются с соседними областями. Восстанавливать реальный рельеф поверхности с разрешением меньше диаметра "пятна проводимости" можно только при учете физических законов распространения туннельного тока.

Рассмотренные особенности воспроизведения рельефа поверхности туннельным микроскопом могут объяснить причину того, что стабильное изображение получается только после нескольких сканирований. По-видимому, это связано с тем, что форма иглы и субнанометровый рельеф поверхности изменяются (как бы отжигаются или оплавляются) под воздействием высокой плотности туннельного тока.

Уравнение (1) позволяет получить оценку на высоту сканирования. При диаметре площадки, через которую проходит туннельный ток, в 2 нм она оказывается равной около 0,6 нм (6 Å).

### Взаимодействие иглы с поверхностью

Особенности прохождения туннельного тока проявляются в получаемых изображениях поверхности. Туннельный ток протекает через слой атомов, поэтому он является интегральной величиной рельефа поверхности, находящегося под слоем атомов.

Рассмотрим, как влияют размеры конца иглы на получаемое изображение. На рис. 5—9 рассмотрены примеры огибания иглой поверхности для различных случаев.

Рис. 5 соответствует огибанию объекта, имеющего вид пирамиды, размер которой больше диаметра иглы. Непосредственно из рисунка можно сделать следующие выводы:

- ширина изображения рельефа больше пирамиды на ширину иглы и удвоенный размер туннельного зазора;
- на изображении нет острого угла;

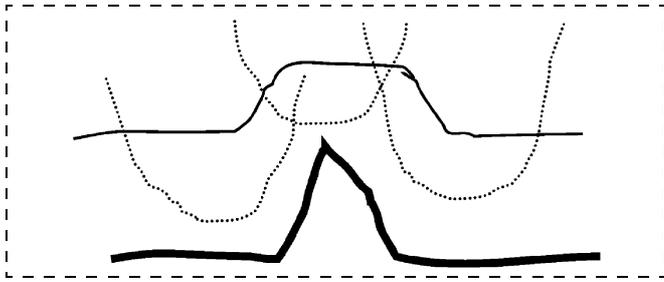


Рис. 5.

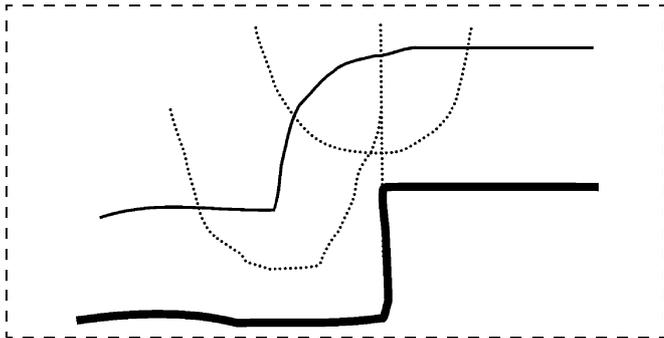


Рис. 6.

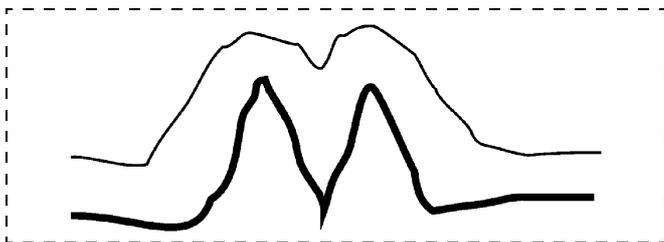


Рис. 7.

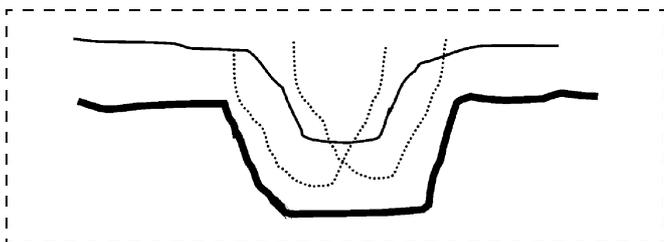


Рис. 8.

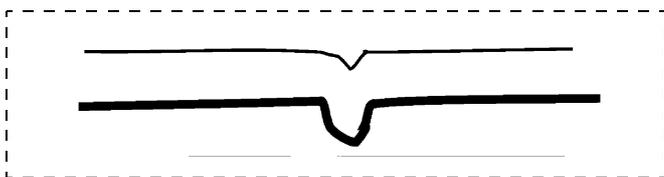


Рис. 9.

- относительная высота изображения пирамиды приблизительно равна истинной высоте пирамиды.

На рис. 6 рассмотрен случай огибания ступеньки. Из рисунка можно сделать следующие выводы:

- на изображении уступ имеет вид дуги;
- эта дуга совпадает с половиной поверхности иглы, перевернутой концом вверх;
- высота уступа на изображении равна его истинной высоте;
- дуга сдвинута относительно уступа против направления сканирования на половину толщины иглы и туннельный зазор (0,6 нм).

На рис. 7 изображен случай огибания двух пирамид, расстояние между которыми меньше размеров конца иглы. Из рисунка можно сделать вывод о том, что о наличии двух рядом расположенных пирамид можно судить по наличию щели на изображении рельефа. Глубина щели на порядок меньше реальной. С учетом шумов определить наличие небольшой щели достаточно сложно.

На рис. 8 показано изображение впадины, которая шире конца иглы. Рисунок позволяет сделать следующие выводы:

- впадины на изображении уже на ширину иглы и удвоенный размер туннельного зазора;
- глубина впадины равна глубине реальной впадины, только если ее ширина больше ширины конца иглы и удвоенного туннельного зазора.

На рис. 9 изображен случай, когда ширина впадины меньше диаметра иглы. Поскольку туннельный ток является интегральной характеристикой проводящего слоя атомов, ширина и глубина впадины на изображении окажется во много раз меньше, чем в реальности. Это позволяет сделать вывод о том, что без специальной обработки полученного изображения сложно увидеть такие детали, размер которых меньше не только "пятна проводимости", но и диаметра иглы.

### Измерение рельефа поверхности

Применим результаты теоретического исследования для анализа изображений рельефа поверхности, получаемого с помощью туннельного микроскопа.

На рис. 10 (см. третью сторону обложки) показан скан рельефа поверхности меди, который получен с помощью туннельного микроскопа НПО "Алмаз" [5]. Скан имеет размеры  $128 \times 128$  нм. На рис. 11 представлена палитра, с помощью которой кодируется высота поверхности. Для кодирования используются спектр всех цветов. На рисунке представлены ярко-

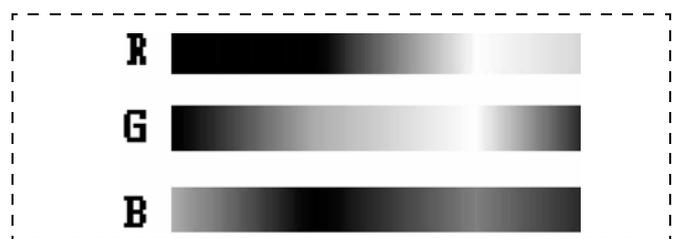


Рис. 11.



Рис. 12.

стные характеристики красного, зеленого и синего цветов палитры.

Рис. 12 дает изображение в монохроматическом свете. Яркость точки пропорциональна высоте. Рис. 12 отличается от рис. 10 тем, что в нем высота кодируется не цветом, а яркостью.

Для анализа изображений поверхности полезным оказалось представление рельефа в виде вертикальных срезов (рис. 13). По вертикали отложена высота рельефа, которая вычислена с помощью яркостной палитры. В нижней части изображения среза для каждой его точки по вертикали откладываются ошибки пересчета. Наблюдения показывают, что практически всегда они не превышают 1 пикселя. Это приводит к тому, что график ошибок представляют собой линию, практически не отличающуюся от прямой.

Рисунок показывает срез при сканировании в направлении слева направо. Вертикальные полосы расставлены с шагом 1 нм. Их яркость меняется с шагом 5 нм. Масштаб по вертикали и горизонтали одинаков. Длина отрезка, изображенного в верхней

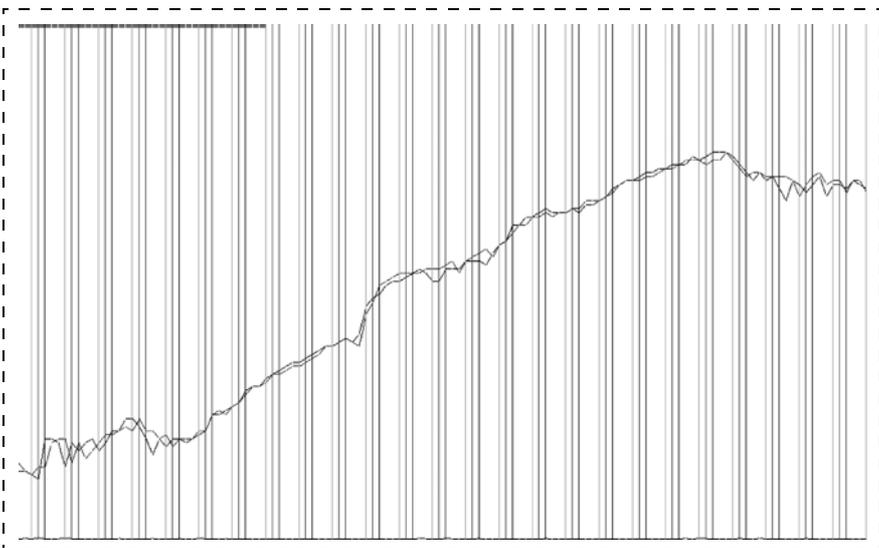


Рис. 13.

части рисунка, задает уровень, по которому выполнен текущий срез на рис. 10.

Кроме рельефа с заданным номером показан также предыдущий (вторая кривая). Возможно также одновременное изображение последующего. Это позволяет выделять ошибки, возникающие в измерительном тракте, так как если на соседних изображениях пик отсутствует, то, вероятно, он является ошибкой измерения.

Перейдем к обсуждению срезов рельефа. Рис. 13 позволяет сделать вывод о том, что рассмотренная математическая модель взаимодействия иглы с подложкой достаточно хорошо описывает наблюдаемые особенности изображения. Как и предсказывает теория, большинство пиков имеют сглаженные вершины. Напомним, что это связано с тем, что игла имеет конечный радиус закругления, в результате чего туннельный ток протекает через слой атомов иглы диаметром несколько нанометров. Для наклонных участков сглаженные участки представляют собой наклонные прямые.

В большинстве случаев рельеф на соседних срезах отличается не более чем на 1 нм, однако достаточно часто отклонения достигают 3—4 нм. Эти случаи находятся в противоречии с выводом о том, что рельеф должен иметь сглаженный характер. Можно предположить, что отклонения являются результатом ошибки измерения рельефа. Механизм их возникновения связан с тем, что в качестве высоты принимается осредненный сигнал, подающийся на двигатель вертикального перемещения иглы. Импульсные помехи в этом тракте приводят к скачкам в измерениях высоты. Следует также обратить внимание на то, что практически все скачки сосредоточены на горизонтальных участках. Это, по-видимому, связано с особенностями позиционной системы управления, в которой режимы колебаний имеют наибольшую амплитуду при нулевой уставке. Фактически достоверными являются только нижние зубцы изображения, так как система управления стремится не допустить контакта иглы с поверхностью.

Особенность изменения туннельного тока (в 7 раз на каждые 0,1 нм) приводит к тому, что

управление можно сравнить с отслеживанием рельефа твердой поверхности в непосредственной близости от нее при условии, что касание поверхности требуется полностью исключить. Известно, что возникающая при этом задача управления является достаточно сложной. Примеры возможных решений и результаты экспериментов для систем с программным управлением можно найти в работе [7].

Для того чтобы представить себе изменения в изображении, к которым приводит учет размеров иглы, графики срезов были скорректированы. В основе алгоритма коррекции положены следующие соображения.

Фактический рельеф поверхности располагается относительно поверх-

ности иглы на расстоянии, приблизительно равном сумме радиуса закругления и туннельного зазора. Обозначим это расстояние через  $d$ .

На рассматриваемом этапе исследований оказался достаточным следующий алгоритм. Измеренная кривая срезов представляет собой ломаную линию, узлы которой имеют одинаковый шаг по горизонтали.

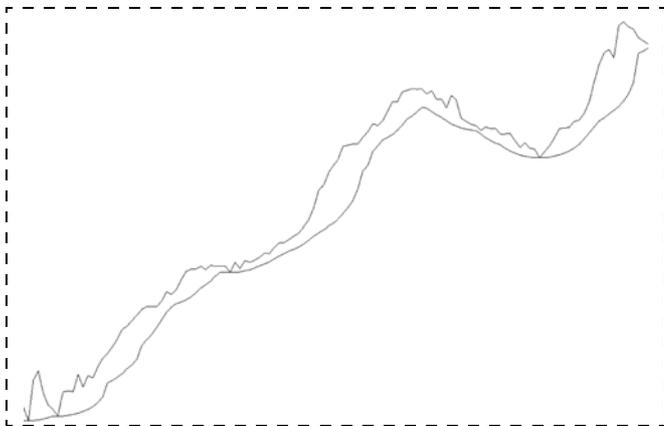


Рис. 14.

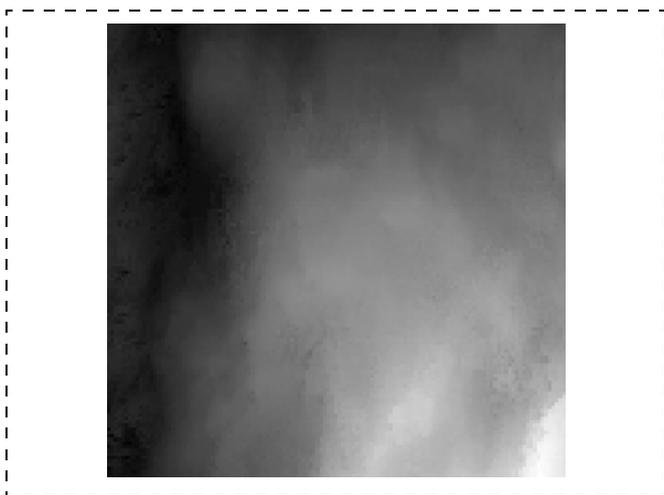


Рис. 15.

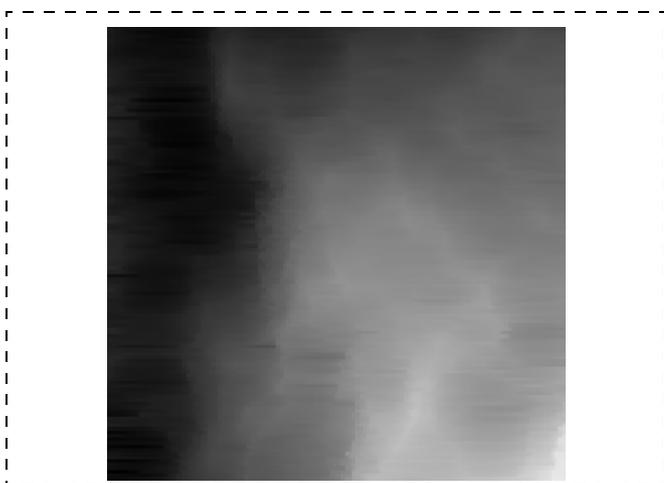


Рис. 16.

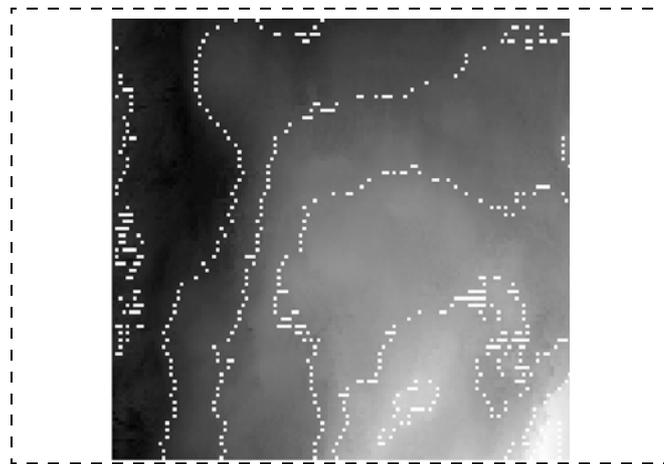


Рис. 17.

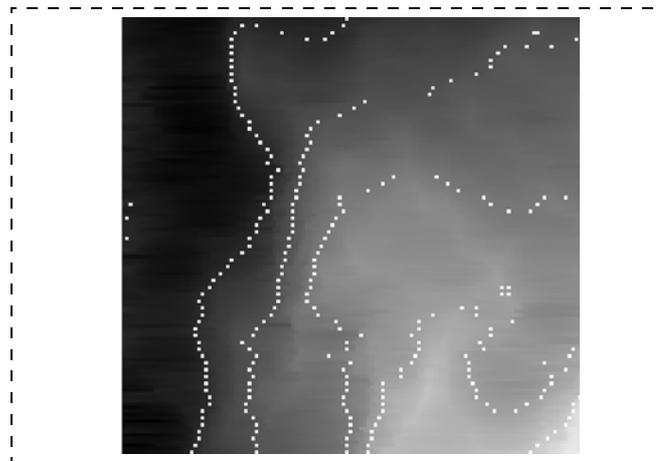


Рис. 18.

Каждый отрезок ломаной смещается по нормали вниз на  $d$ , и строится новая ломаная, которая является нижней границей всех получившихся точек. Затем полученный график поднимается на  $d$ , с тем чтобы скомпенсировать опускание горизонтальных участков, которые при сравнении исходной и построенной ломаной удобно располагать рядом. Значение  $d$  является варьируемым параметром и задается в начале работы корректирующей программы. На практике оно близко к радиусу закругления.

Возможность изменять значение  $d$  позволяет оценивать точность получаемого изображения. В частности, было найдено, что при  $d > 5$  нм исчезают пики неровностей, которые, как было сказано выше, скорее всего являются ошибками измерений.

На рис. 14 приведены изменения рельефа на срезах после учета радиуса закругления. Верхняя кривая позволяет получить представление о результатах измерения высоты рельефа поверхности. Нижняя кривая построена для случая  $d = 10$  нм. На рис. 15 и 16 показаны изменения в монохромном изображении, к которым приводит учет радиуса закругления иглы. Нетрудно заметить увеличение темных (вогнутых) областей и сужение светлых (выпуклых). Наглядно это видно после проведения линий уровня (на рис. 17 и 18 они проведены с шагом 20 нм). Исчезли так-

же пятна, связанные пиками колебаний высоты. На рис. 17 эти области целиком состоят из точек линий уровня.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что получаемое изображение имеет разрешение порядка нескольких нанометров. Детали, размер которых менее этого значения, по видимому, нельзя считать существующими в реальности.

## Выводы

Туннельная микроскопия является сравнительно дешевым средством получения изображений с нанометровым разрешением. Вместе с тем, проведенное исследование показывает, что для того чтобы достичь разрешения 1 нм и менее, необходим учет размеров конца иглы, физических процессов взаимодействия иглы с поверхностью и процессов управления движением иглы.

В статье даны оценки влияния особенностей протекания туннельного тока на разрешающую способность микроскопа.

Разработаны способы интерпретации изображений с учетом геометрии иглы. Эти методы могут использоваться для восстановления истинного релье-

фа поверхности и оценки возмущений, которые возникают в процессе сканирования.

*Работа выполнена в рамках программы 3.5 ОМН РАН.*

## Список литературы

1. **Миронов В. К.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004.
2. **Неволин В. Л.** Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2006.
3. **Дедков Г. В.** Физические аспекты взаимодействий зонд—поверхность в сканирующей зондовой микроскопии. Ч. 1. // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 2—12.
4. **Синицына О. В.** Обработка и анализ данных зондовой микроскопии. Обзор программного обеспечения // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 2—7.
5. **Карташев В. А., Бурухина Т. Ф.** Исследование влияния нерезонансных периодических возмущений на положение иглы туннельного микроскопа. Препринт ИПМ РАН. М.: ИПМ РАН, 2004.
6. **Бурухина Т. Ф., Карташев В. А.** Исследование зависимости отклонений иглы туннельного микроскопа от наклона его оси // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 9. С. 21—28.
7. **Гориневский А. М., Формальский А. М., Шнейдер А. Ю.** Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. М.: Наука, 1994.

УДК 621.797

**Е. С. Рембеза**, д-р физ.-мат. наук,  
**С. И. Рембеза**, д-р физ.-мат. наук,  
**Е. А. Ермолина, М. В. Гречкина**<sup>1</sup>,  
Воронежский государственный технический  
университет,  
<sup>1</sup> Воронежский государственный университет

## СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТА Sn—Y—O

*Приведены экспериментальные данные исследований элементного состава, морфологии поверхности, электрических и газочувствительных свойств пленок нанокompозитов Sn—Y—O, полученных методом реактивного ионно-лучевого распыления составной мишени. Показано, что добавка к диоксиду олова оксида иттрия снижает температуру максимальной газовой чувствительности пленок нанокompозитов к наличию паров этилового спирта, ацетона, изопропилового спирта и формальдегида в воздухе. Сделан вывод о перспективности применения пленок нанокompозитов Sn—Y—O для газовой сенсорики.*

## Введение

Нанокompозиты на основе диоксида олова являются перспективными материалами газовой сенсорики и могут быть использованы в качестве сенсорных элементов датчиков газов для мониторинга ок-

ружающей среды, обнаружения токсичных и взрывоопасных газов, в медицине и других областях обеспечения безопасной жизнедеятельности человека.

Известно, что значением газовой чувствительности можно управлять путем изменения размеров зерен поликристалла и исходной электропроводности пленок [1—3]. Так как адсорбция газа приводит к модуляции высоты потенциальных барьеров на границах зерен для дрейфа носителей заряда, то наиболее эффективны материалы, у которых дебаевская длина экранирования сравнима с радиусом зерна. Уменьшение размеров зерен в связи с этим условием приводит также к тому, что увеличивается вклад поверхности поликристаллов в общую электропроводность образца. Кроме того, повышение поверхностной активности наноразмерных поликристаллов может привести не только к увеличению их газовой чувствительности, но и к снижению энергетического порога реакции ионов газов с поверхностными состояниями, т. е. к уменьшению температуры максимальной чувствительности пленки к различным газам в воздухе [4].

Поскольку взаимодействие газа с поверхностью оксидного полупроводника характеризуется определенными значениями энергии адсорбции, то легирование позволяет варьировать эту величину так, чтобы вероятность взаимодействия измеряемого газа с поверхностью полупроводника превышала вероятность взаимодействия с остальными газами, при-

существующими в газовой среде, и таким образом улучшалась селективность измерения газа. Для повышения селективности в состав полупроводникового чувствительного элемента вводят легирующий материал — металл, полупроводник, диэлектрик или их комбинацию. При этом легирующий материал обеспечивает увеличение концентрации групп ионов, более активно взаимодействующих с измеряемым газом.

Целью работы является изучение влияния состава, морфологии и электрофизических свойств пленок Sn—Y—O на адсорбционную активность поверхностных состояний.

### Образцы и методика эксперимента

Пленки-наноконкомпозиты Sn—Y—O изготавливали методом реактивного ионно-лучевого распыления составной мишени из олова и неравномерно размещенных полосок иттрия в атмосфере  $Ag + O_2$ . Напылительная установка была изготовлена на основе вакуумного поста УВН-2М [5]. В зависимости от выбора состава мишени можно было изготавливать пленки с различным соотношением оксидов Sn и Y.

Толщину пленок измеряли на интерференционном микроскопе МИИ-4. Элементный состав наноконкомпозитов определялся на 15 образцах-спутниках, расположенных через 1,5 см вдоль подложки, с помощью рентгеновского микроанализатора JXA-840. В качестве эталонов были использованы образцы чистых металлов олова и иттрия. К сожалению, эта методика не позволяет определить точный фазовый состав исследуемых образцов, поэтому соотношение оксидов оценивалось расчетным путем по содержанию олова, кислорода и иттрия в разных образцах ( $x \leq 2$ ,  $y < 2$ ). Морфологию поверхности отожженных пленок изучали с помощью атомного силового микроскопа (АСМ) FemtoScan-001. Электросопротивление пленок измеряли четырехзондовым методом (установка ЦИУС-4) либо методом Ван-дер-Пау. Концентрацию и подвижность свободных носителей заряда в пленках определяли с помощью эффекта Холла методом Ван-дер-Пау.

Газовую чувствительность пленок определяли как отношение сопротивления пленки на воздухе  $R_B$  к сопротивлению пленки при напуске исследуемого газа известной концентрации в герметичную кювету  $R_T$ :  $S_g = R_B/R_T$  [1]. Объем кюветы составлял 10 л, концентрацию исследуемых газов в воздушной среде рассчитывали по формуле Клапейрона—Менделеева.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В результате выполненных исследований установлено, что пленки после изготовления методом ионно-лучевого напыления имеют преимущественно аморфную структуру. Для стабилизации поверхностного сопротивления и кристаллической структуры пленок  $SnO_2$ , легированных иттрием, была

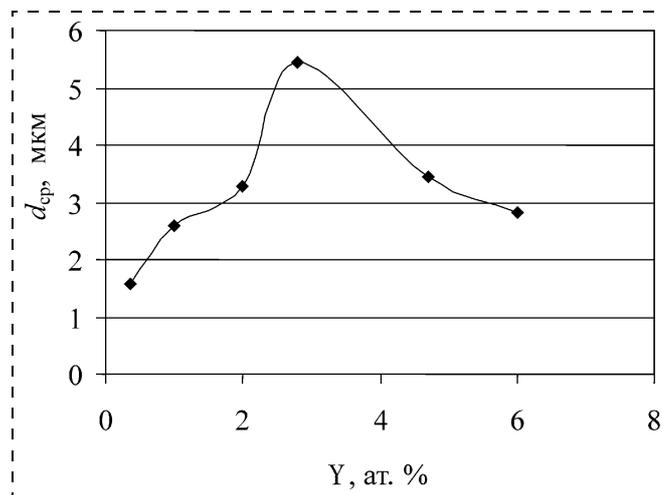


Рис. 1. Толщина пленок Sn—Y—O в зависимости от процентного содержания иттрия

применена отработанная ранее методика изотермического отжига [4]. Образцы отжигались на воздухе при температуре  $T = 400$  °C от 13 до 29 ч с контролем поверхностного сопротивления через каждый час. В результате отжига в течение первого часа сопротивление пленок, легированных 2...6 ат. % Y, уменьшается и уже после 5 ч начинает стабилизироваться. Изготовленные ионно-лучевым реактивным распылением пленки Sn—Y—O имеют толщину 1,6...4,3 мкм (рис. 1).

Элементное распределение металлов и кислорода в образцах наноконкомпозитов с различным содержанием металлооксидных примесей приведено на рис. 2. Данные микроанализа показывают, что концентрация примеси иттрия в исследованных пленках  $SnO_2$  изменяется от 0,4 до 6,0 ат. % Y. АСМ-исследования наноконкомпозитов Sn—Y—O дают похожие картины морфологии и распределения размера зерна в пленках с различным содержанием примеси (рис. 3, см. третью сторону обложки). Результаты исследований показывают, что композиты Sn—Y—O имеют наноструктуру со средним размером зерна от

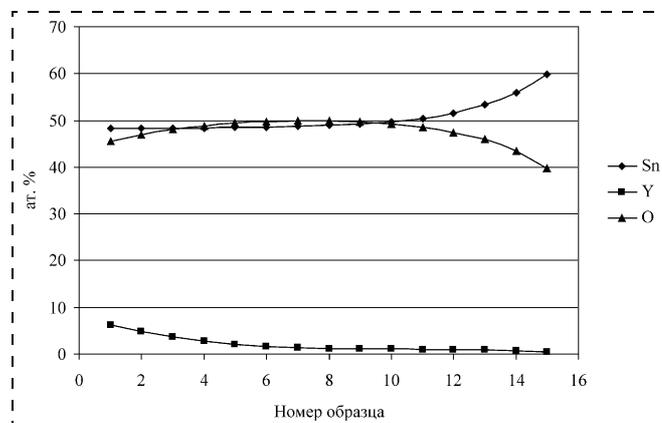


Рис. 2. Элементное распределение металлов и кислорода в образцах наноконкомпозитов Sn—Y—O

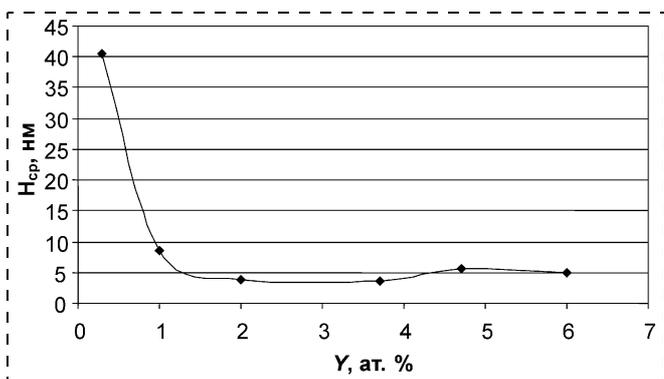


Рис. 4. Средняя высота зерен в пленке Sn—Y—O в зависимости от процентного содержания иттрия

5 до 40 нм. При увеличении содержания примеси размеры зерен в пленках уменьшаются (рис. 4). При легировании пленки SnO<sub>2</sub> иттрием с концентрацией более 2 ат. % средний размер зерна не изменяется и составляет около 5 нм. Средняя высота зерен в пленке была рассчитана исходя из проходов зонда при АСМ-исследованиях.

Оксид олова и оксид иттрия не образуют ни сплавов, ни твердых растворов. Зерна этих оксидов существуют в нанокристаллической пленке в виде конгломератов, как это видно на рис. 3. Присутствие примеси иттрия, по-видимому, затрудняет рост больших конгломератов зерен, как это было обнаружено нами ранее в других нанокомпозитах SnO<sub>2</sub>:SiO<sub>2</sub> и SnO<sub>2</sub>:MnO [4, 7].

Измерение концентрации и подвижности свободных носителей заряда показало, что при комнатной температуре исходные образцы характеризуются значениями концентрации  $n = 10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и подвижности  $\mu = 9 \dots 30 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Эти результаты дают возможность рассчитать значение дебаевской длины экранирования и сравнить ее с размерами нанокристаллов, чтобы оценить эффективность модуляции межзеренных потенциальных барьеров при измерении газовой чувствительности.

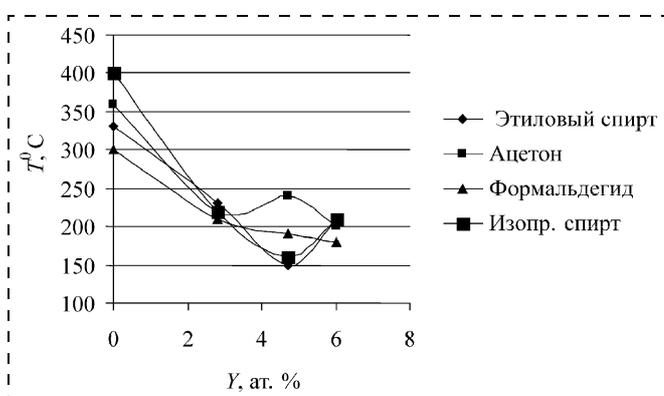


Рис. 5. Зависимость температуры максимальной чувствительности пленок Sn—Y—O к парам этилового спирта, ацетона, формальдегида и изопропилового спирта в воздухе от содержания иттрия в пленках

Исследовалась температурная зависимость газовой чувствительности пленок диоксида олова, не легированных и легированных иттрием до значений 2,8; 4,7 и 6 ат. %, к парам спирта, ацетона, изопропилового спирта и формальдегида. Известно, что не легированные пленки SnO<sub>2</sub> характеризуются максимумом газовой чувствительности к парам спирта при  $T = 330 \text{ }^\circ\text{C}$ , ацетона при  $T = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ , изопропилового спирта при  $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ , формальдегида при  $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  [6]. Пленки SnO<sub>2</sub>, легированные 2,8 ат. % Y, имеют максимальную чувствительность к парам спирта при температуре  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ацетона —  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ ; изопропилового спирта —  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ ; формальдегида —  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ . Увеличение содержания иттрия в пленках SnO<sub>2</sub> приводит к дальнейшему снижению температуры максимальной чувствительности всех исследованных газов (рис. 5). Причем этот эффект для каждого газа проявляется по-разному, что можно использовать для повышения селективности пленки к различным газам. Этот результат показывает, что исследованные пленки при их применении в датчиках газов позволят уменьшить значение потребляемой мощности датчика при контроле примесей исследованных газов в воздухе.

## Заключение

Методом реактивного ионно-лучевого напыления изготовлены пленки нанокompозита Sn—Y—O с содержанием примеси иттрия от 0,4 до 6,0 ат. %.

Исследованы морфология поверхности пленок в зависимости от содержания примеси иттрия. На основании результатов АСМ-исследований рассчитана средняя высота зерен в пленке в зависимости от процентного содержания иттрия. Содержание примеси иттрия заметно влияет на размер зерна поликристаллов. Увеличение концентрации Y приводит к уменьшению среднего размера зерна поликристаллов в пленках.

С помощью метода Холла измерены концентрация и подвижность свободных носителей заряда в пленках Sn—Y—O в зависимости от процентного содержания иттрия.

Исследованы газовая чувствительность пленок нанокompозитов Sn—Y—O к различным газам-восстановителям, а также зависимость температуры максимальной газовой чувствительности пленок Sn—Y—O к парам различных газов в воздухе при разных количествах легирующей примеси. Увеличение концентрации иттрия приводит к снижению температуры, при которой газовая чувствительность нанокompозита к различным газам максимальна, на  $100 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$ , что может быть использовано для улучшения селективности пленок к различным газам.

Таким образом, пленки Sn—Y—O являются перспективным материалом для чувствительных элементов микроэлектронных датчиков газов, так как имеют хорошую чувствительность и селективность к разным газам и позволяют контролировать газы при

более низких температурах по сравнению с нелегированными пленками SnO<sub>2</sub>.

*Авторы благодарят Ситникова А. В., Свистову Т. В. и Агапова Б. Л. за помощь в изготовлении и исследовании образцов.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 07-02-92102 и 08-02-99005.*

#### Список литературы

1. **Watson J., Ihokura K., Coles G. S. V.** The tin dioxide gas sensor // Meas. Sci. Technol. 1993. № 4. P. 711—719.
2. **Xu C., Tamaki J., Miura N., Yamazoe N.** Grain size effects on gas sensitivity of porous SnO<sub>2</sub> — based elements // Sensor and Actuators B. 1991. № 3. P. 147—155.
3. **Ippomatsu M., Ohnishi H., Sasaki H., Matsumoto T.** Study on the sensing mechanism of tin oxide flammable gas sen-

sor using the Hall effect // J. Appl. Phys. 1991. V. 69 (12). № 15. P. 8368—8374.

4. **Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Рембеза С. И., Комарова А. С., Дырда Н. Н.** Структура и электрофизические свойства нанокompозита SnO<sub>x</sub>:MnO<sub>y</sub> // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 4. С. 27—29.

5. **Золотухин И. В., Калинин Ю. Е., Стогней О. В.** Новые направления физического материаловедения. Воронеж: Изд. ВГУ, 2000. 360 с.

6. **Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Рембеза С. И., Комарова А. С., Дырда Н. Н.** Нанокompозиты SnO<sub>x</sub>:MnO<sub>y</sub> для микроэлектронных датчиков газов // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 11. С. 23—25.

7. **Рембеза Е. С., Рембеза С. И., Домашевская Э. П., Гречкина М. В., Агапов Б. Л.** Влияние атомного состава оксидных нанокompозитов на основе SnO<sub>2</sub> на их структуру // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 7. С. 25—28.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.382.8:518.5.001.57

**Ю. Б. Какурин**, аспирант,  
**А. Г. Захаров**, д-р техн. наук, проф.,  
ТТИ ЮФУ, г. Таганрог,  
**В. Н. Котов**, канд. техн. наук,  
НИИ МВС ЮФУ, г. Таганрог

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

*Представлены результаты моделирования процесса массопереноса в полупроводниковых структурах, содержащих локальные области с повышенным коэффициентом диффузии атомов примеси. Получены зависимости глубин залегания p—n-переходов от ширины области ускоренной диффузии, отношения значений коэффициентов диффузии в различных областях полупроводниковой структуры, а также от длительности процесса диффузии. Результаты моделирования могут представлять интерес для разработчиков элементов нано- и микросистемной техники как на этапе проектирования, так и на этапе их производства.*

Известно, что области нарушенной кристаллической структуры полупроводников, такие как границы зерен, дислокации, скопления вакансий, служат основными путями ускоренной диффузии.

Вследствие больших характеристических размеров таких областей диффузия по ускоренным путям, отличающаяся сравнительно малыми значениями энергии активации, является преобладающей уже при относительно низких температурах. Таким образом, диффузия по ускоренным путям может стимулировать деградацию электрофизических свойств полупроводниковых структур, а также отказ приборов и элементов интегральных схем, что обуславливает необходимость теоретических исследований в данной области. Вместе с тем, выявление особенностей протекания процессов ускоренного массопереноса дает возможность проектировать сенсорные элементы нано- и микросистемной техники с наперед заданными свойствами, например емкостные элементы, обладающие повышенными значениями барьерной емкости и коэффициентом перекрытия вольт-фарадной характеристики [1]. Кроме того, исследования процессов ускоренного массопереноса могут быть практически значимы при оптимизации параметров режимов операции геттерирования атомов нежелательных примесей [2, 3], а также при формировании изолирующих слоев на основе локальных поликристаллических областей [4].

Аномальное распределение диффузанта вдоль ускоренных путей рассматривалось рядом авторов [5—10]. Большинство математических описаний зернограничной диффузии основано на модели, впер-

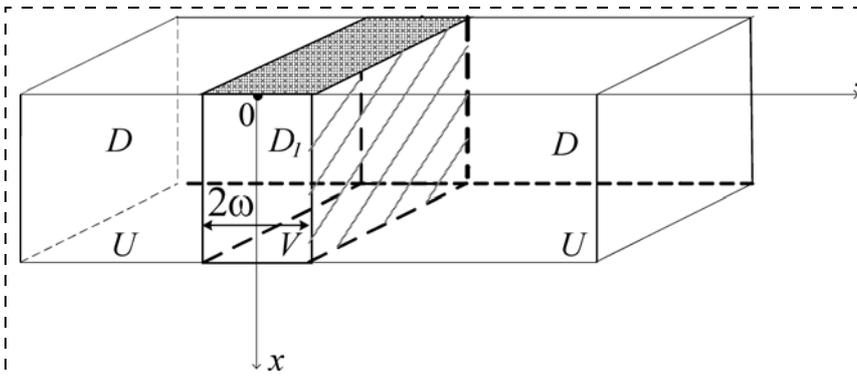


Рис. 1. Неоднородная полупроводниковая структура [8]

вые предложенной Фишером [5, 10]. Схематично полупроводниковую структуру, содержащую область ускоренной диффузии  $V$  шириной  $2\omega$ , можно представить, как показано на рис. 1.

В данной работе исследование процесса ускоренной диффузии в неоднородной полупроводниковой структуре проводилось на основе анализа результатов решения системы уравнений [8, 10] численным методом:

$$\frac{\partial C_U(x, y, t)}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 C_U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_U}{\partial y^2} \right] \text{ при } |y| \geq \omega; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_V(x, y, t)}{\partial t} = D_1 \left[ \frac{\partial^2 C_V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_V}{\partial y^2} \right] \text{ при } |y| \leq \omega, \quad (2)$$

с начальным условием

$$C(x, y, 0) = 0 \text{ при } x > 0 \quad (3)$$

и граничными условиями

$$C_{U, V}(0, y, t) = C_0, \quad (4)$$

$$C_{U, V}(\infty, y, t) = 0. \quad (5)$$

При этом необходимо выполнение условий непрерывности на границе областей  $U$  и  $V$   $y = \pm\omega$ , т. е.

$$C_V(x, y, t) = C_U(x, y, t) \text{ при } y = \pm\omega; \quad (6)$$

$$D_1 \frac{\partial C_V(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{|y|=\omega} = D \frac{\partial C_U(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{|y|=\omega}. \quad (7)$$

В выражениях (1–7)  $C_U, C_V$  — концентрации примесей в областях  $U$  и  $V$  соответственно;  $C_0$  — концентрация примеси в постоянном источнике.

В первом приближении предполагалось, что влияние структуры полупроводника на процесс диффузии является статическим, следовательно, отличие каждой области друг от друга сводится к различию в значениях коэффициентов диффузии одной и той же примеси [8].

Решение краевой задачи (1–7) выполнялось с использованием метода конечно-разностной аппроксимации [11]. Для получения разностного уравнения необходимо:

- заменить области непрерывного изменения аргументов дискретными множествами точек  $X = \{x_i, i = 0, 1, \dots, m, m+1, x_0 = 0, x_m = N, x_i < x_{i+1}\}$ ,  $Y = \{y_j, j = 0, 1, \dots, m, m+1, y_0 = 0, y_m = N, y_j < y_{j+1}\}$ ;

- заменить систему дифференциальных уравнений разностными уравнениями.

Таким образом, для равномерной двумерной прямоугольной координатной сетки с шагом  $\Delta x = x_{i+1} - x_i$  и  $\Delta y = y_{j+1} - y_j$  проблема численного решения краевой задачи (1–7) сводится к решению системы разностных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{C_{i,j,k+1} - C_{i,j,k}}{\Delta t} = \left( \frac{C_{i+1,j,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{C_{i,j+1,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} \right); \\ \frac{C_{i,j,k+1} - C_{i,j,k}}{\Delta t} = D_1 \left( \frac{C_{i+1,j,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{C_{i,j+1,k} - 2C_{i,j,k} + C_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} \right); \end{cases} \quad (8)$$

$$C_{i,j,1} = 0 \quad (i \geq 2);$$

$$C_{1,j,k} = C_0;$$

$$C_{i_{\max},j,k} = 0;$$

$$C_{i,j,k} = (D_1 C_{i,j+1,k} + D C_{i,j-1,k}) / (D + D_1);$$

$$C_{i,j,k} = (D_1 C_{i,j-1,k} + D C_{i,j+1,k}) / (D + D_1),$$

где  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  — шаг по переменной  $t$ .

Результаты вычислительного эксперимента по исследованию массопереноса в пластине кремния, содержащей область ускоренной диффузии примеси,

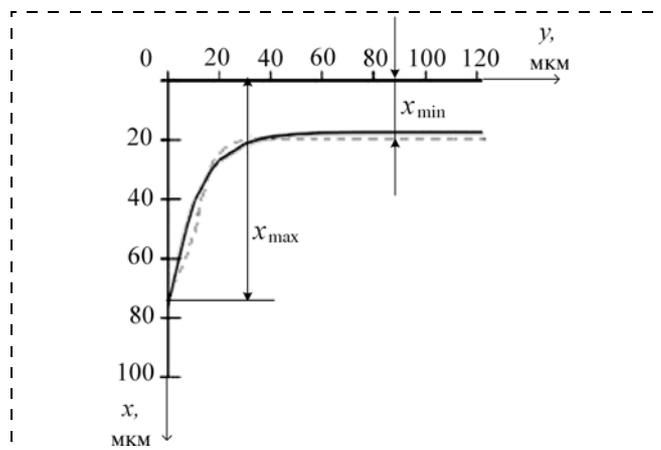


Рис. 2. Результаты моделирования концентрационных профилей атомов бора в кремнии:

----- численное решение; — — аналитическое решение [6]

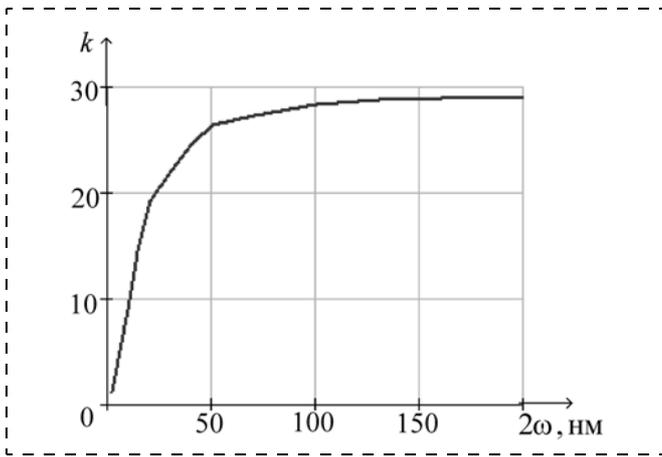


Рис. 3. Распределения концентраций примесных атомов для различных значений ширины области ускоренной диффузии  $2\omega$ : а —  $2\omega = 40$  нм; б —  $2\omega = 100$  нм

представлены на рис. 2—5. На рис. 2 показаны линии равной концентрации атомов бора, полученные с помощью численного решения системы уравнений (8) и аналитического решения [6].

Данные распределения были получены для системы, состоящей из областей  $U$  с коэффициентом диффузии  $D$  и  $V$  с повышенным коэффициентом диффузии  $D_1$  бесконечно малой толщины, т. е.

$2\omega \ll \sqrt{D_1 t}$ . Поскольку задача симметричная, на рис. 2 показаны графики для области  $0 < y < \infty$ . При вычислениях использовались следующие значения коэффициентов диффузии  $D = 2,6 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup>/с и  $D_1 = 5 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с, соответствующие температуре  $T = 1200$  °С [8],  $\omega = 10$  нм.

Как видно из рис. 2, глубины залегания  $p$ — $n$ -перехода в областях  $U$  и  $V$ , рассчитанные с помощью численного и аналитического решений, находятся в хорошем соответствии. Моделирование процесса массопереноса при варьировании параметров  $D$ ,  $D_1$ ,  $\omega$  обуславливает необходимость проведения се-

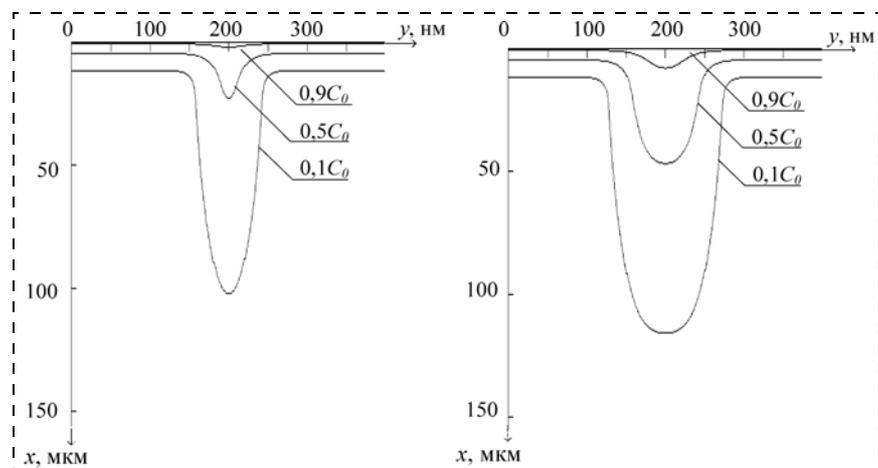
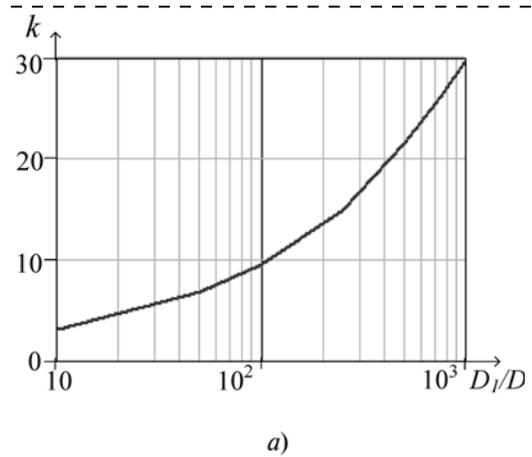
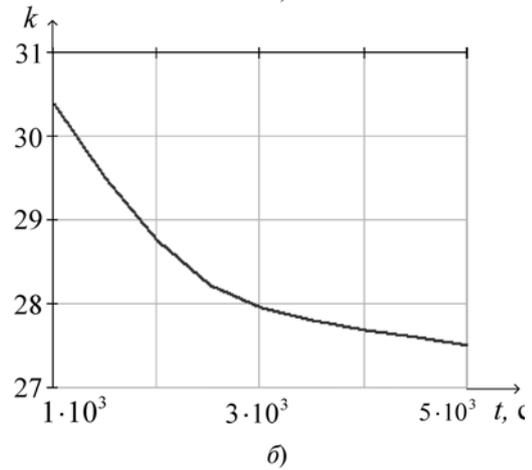


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $k$  от ширины области  $2\omega$  для времени процесса диффузии  $t = 1000$  с при  $D_1/D = 10^3$



а)



б)

Рис. 5. Зависимость коэффициента  $k$  от отношения:

а — коэффициентов диффузии  $D_1/D$  для  $t = 5 \cdot 10^3$  с; б — времени диффузионного процесса при  $D_1/D = 10^3$

рии расчетов системы (8). Результат расчета для одного варианта начальных и граничных условий может быть использован в качестве нулевого приближения для следующего варианта начальных и граничных условий.

Условие  $2\omega \ll \sqrt{D_1 t}$  являлось одним из приближений, при котором получено аналитическое решение краевой задачи (1—7) [10], в то же время численное решение, разработанное нами, свободно от него, что позволяет использовать его при исследовании диффузии в неоднородных полупроводниковых структурах, имеющих различные характеристические размеры областей с  $D_1$ .

На рис. 3 представлены распределения для двух значений величины  $2\omega$ : 40 и 100 нм, при этом середины областей  $V$  смещены вдоль оси  $y$  на 200 нм. Длительность процесса диффузии составила  $t = 5000$  с. Видно

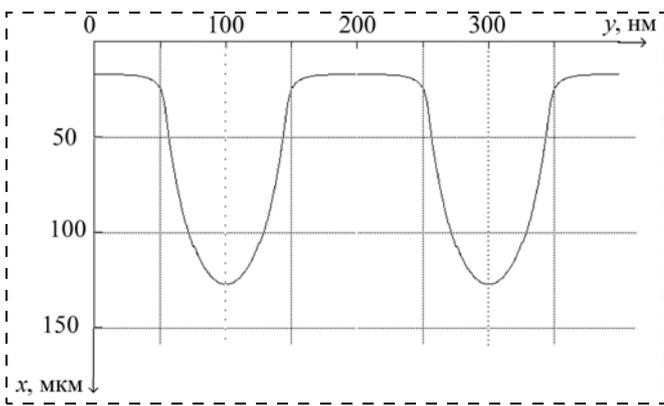


Рис. 6. Линия равной концентрации при диффузии атомов бора в кремнии *n*-типа при  $t = 5000$  с, содержащем две области ускоренной диффузии шириной  $2\omega = 50$  нм

заметное влияние ширины области ускоренной диффузии на значения глубины проникновения атомов примеси.

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента

$$k = \frac{x_{\max}}{x_{\min}},$$

характеризующего отношение максимальной глубины залегания *p-n*-перехода  $x_{\max}$  в области *V* к соответствующему значению  $x_{\min}$  в области *U*, как показано на рис. 2, от ширины  $2\omega$ .

В дальнейшем процесс диффузии в рассматриваемой неоднородной полупроводниковой структуре был проанализирован на основе полученных зависимостей коэффициента *k* от отношения коэффициентов диффузии  $D_1/D$  и времени процесса *t*, при  $2\omega = 100$  нм, изображенных на рис. 5.

Зависимость коэффициента *k* от времени *t*, приведенная на рис. 5, может быть объяснена действием механизма боковой диффузии. С увеличением времени диффузии этот механизм становится более выраженным, так как за счет накопления примесных атомов в области ускоренной диффузии формируется градиент концентрации.

На рис. 6 показано распределение концентрации атомов бора в пластине кремния *n*-типа, содержащей две области ускоренной диффузии, которые смещены вдоль оси *y* на 100 и 300 нм соответственно. Вид изоконцентрационной кривой, представленной на рис. 6, позволяет сделать вывод о возможности прогнозирования электрофизических свойств *p-n*-переходов со сложными концентрационными профилями. В частности, емкостные свойства таких переходов экспери-

ментально исследованы в работе [12], в которой приведены основные параметры варикапов, сформированных диффузией атомов бора в дислокационном кремнии.

Таким образом, полученные результаты моделирования процесса массопереноса в неоднородных полупроводниковых структурах могут представлять интерес для разработчиков элементов нано- и микросистемной техники как на этапе проектирования, так и на этапе их производства.

#### Список литературы

1. Сеченов Д. А., Захаров А. Г., Беспятов В. В. Влияние дислокационной структуры, сформированной электроискровым разрядом в кремнии, на параметры диффузионных *p-n*-переходов // Электронная обработка материалов. — 1976. — № 4 (70). — С. 20—24.
2. Захаров А. Г., Сеченов Д. А., Беспятов В. В., Котов В. Н. Геттерирование дефектов в кремнии электроискровой обработкой // Электронная обработка материалов. — 1989. — № 1 (145). — С. 9—11.
3. Захаров А. Г., Филипенко Н. А., Какурин Ю. Б. Геттерирование атомов металлов в гетероструктуре полупроводник — металл — полупроводник // Материалы Международной научно-технической конференции "Математические модели и алгоритмы для имитации физических процессов". — Таганрог: Изд-во ТГПИ, 2006. — С. 260—263.
4. Сеченов Д. А., Арушанов А. П., Блинов Ю. Ф., Захаров А. Г. Легирование локальных поликристаллических областей // Активируемые процессы технологии микроэлектроники: сб. науч. тр. — Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1979. — Вып. 5. — С. 140—144.
5. Fisher I. C. Calculation of diffusion penetration curves for surface and grain boundary diffusion // I. Appl. Phys. — 1951. — Vol. 22. — № 1. — P. 74—77.
6. Whipple R. T. Concentration contours in grain boundary diffusion. // Phys. Mag. — 1954. — Vol. 45. — № 10. — P. 1225—1236.
7. Minkes J., Wuttig M. Exact solution for a model of dislocation pipe diffusion // Physical review B. — 1970. — Vol. 2. — № 6. — P. 1619—1623.
8. Блинов Ю. Ф., Захаров А. Г., Молчанов Ю. И., Сеченов Д. А. Расчет распределения примесей при диффузии в кристалле твердого тела с неоднородными слоями // Изв. вузов. Физика. — 1977. — № 10. — С. 104—108.
9. Старк Дж. П. Диффузия в твердых телах / Пер. с англ. под ред. Л. И. Трусова. — М.: Энергия, 1980. — 240 с.
10. Каур И., Густ В. Диффузия по границам зерен и фаз / Пер. с англ. под ред. Л. С. Швиндлермана. — М.: Машиностроение, 1991. — 448 с.
11. Самарский А. А. Введение в численные методы. — М.: Лань, 2005. — 288 с.
12. Сеченов Д. А., Захаров А. Г., Беспятов В. В. Полупроводниковые конденсаторы на основе дислокационного кремния // Материалы III Всесоюзной конференции по проблеме "Однородные вычислительные системы и среды". — Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1972. — С. 417—420.

**В. К. Дорошевич**, канд. техн. наук,  
ФГУ "22 ЦНИИИ Минобороны России"

## ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА И УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ

*Приведены требования к технологическому процессу изготовления микросхем с обычным и повышенным уровнем качества, а также народнохозяйственного назначения.*

Технологический процесс изготовления микросхем должен удовлетворять требованиям стандартов, общим техническим условиям на интегральные микросхемы, на микросхемы с обычным и повышенным уровнем качества, а также народнохозяйственного назначения с дополнениями, изложенными ниже.

На предприятиях устанавливаются и поддерживаются в рабочем состоянии процедуры и методы планирования, подготовка и проверка качества функционирования технологического процесса (ТП) изготовления микросхем и обеспечения выполнения ТП в управляемых условиях, в том числе:

- порядок и ответственные за планирование и подготовку ТП к изготовлению конкретных типов микросхем при общем планировании производства микросхем;
- порядок, процедура и методы контроля, управления и регулирования ТП;
- порядок проведения работ по совершенствованию ТП;
- порядок процедуры и методы проведения оценки настроенности, точности и стабильности ТП.

Условия межоперационного хранения должны соответствовать технологической документации (ТД) со следующими дополнениями:

- при перемещении пластин со сформированными структурами с одной операции на другую и вне технологических помещений необходимо предусмотреть контейнерную систему, исключая контактирование пластин с окружающей средой и непосредственное касание их оператором; не допускается непосредственный контакт оператора с пластинами (касание руками);
- хранение пластин и незагерметизированных микросхем в технологическом процессе осуществляется в инертной среде газообразного азота или осушенного воздуха;

- длительность технологического цикла от приемы партии пластин до герметизации микросхем, включая сроки межоперационного хранения, не должна превышать шести недель.

На предприятиях разрабатывают документы, регламентирующие систему статистического контроля базовых технологических операций и систему статистического регулирования как отдельных технологических операций, так и технологического процесса в целом. Статконтроль осуществляется не только на операциях по изготовлению кристалла, но и на сборочных операциях, в том числе при контроле электропараметров. Эти документы предусматривают порядок сбора, обработки, анализа и хранения результатов технологических операций и операционного контроля, анализа и установления причин брака, порядок учета результатов контроля при разработке и проведении корректирующих мероприятий и управляющих воздействий в системе статистического регулирования, а также правила оценки стабильности статистической обработки, выбора контролируемых параметров внутри базовых технологических процессов или процента выхода годных. Перечень этих параметров должен быть установлен в технической документации.

На предприятиях разрабатывают документы, регламентирующие действие системы, предотвращающей возможность изготовления продукции с нарушением требований ТД.

Для непрерывного контроля операций технологического процесса, уровней надежности, радиационной стойкости и выхода годных изготовитель внедряет в производство контроль:

- исходных материалов и материалов фотошаблонов;
- параметров технологического оборудования для изготовления пластин;
- степени концентрации легирующих материалов;
- поперечного сечения профиля диффузии и эпитаксиального слоя;
- толщины слоя пассивации;
- толщины нанесения слоя металлизации;
- ширины линий при фотолитографии и травлении;
- температуры и продолжительности процесса пассивации;
- температуры и продолжительности процесса диффузии;
- продолжительности и температуры процессов спекания отжига;
- надежности и радиационных характеристик, включая данные, полученные с помощью типовых оценочных схем;
- плотности дефектов фотошаблонов;
- процесса фотолитографии;
- процесса ионной имплантации;
- процесса обработки обратной стороны пластин;

— приемки пластин по результатам зондирования, в том числе оценки радиационной стойкости имитационными методами;

— толщины окисного слоя.

Для контроля базовых технологических операций с целью обеспечения надежности, радиационной стойкости и выхода годных готовой продукции изготовитель внедряет:

— критерии приемки пластин (качества, радиационной стойкости);

— контроль крепления кристалла;

— межсоединения кристалла и корпусов (проволочные соединения, "перевернутый" кристалл и т. д.);

— контроль герметичности;

— контроль маркировки;

— контроль операций по переделке;

— контроль выводов;

— контроль атмосферы в производственных помещениях и контроль степени их чистоты;

— контроль технологических операций, критичных в части обеспечения радиационной стойкости, в том числе с использованием имитационных методов.

При этом в соответствующих элементах производства целесообразно предусмотреть уточнения в части:

- наличия в технологических и контрольных картах указаний по корректирующим мероприятиям;
- хранения документированных результатов контроля с указанием срока хранения результатов контроля;
- оценки положительных межоперационных запасов;
- ведения учета выполнения и контроля основных требований, значений и характеристик производственного процесса.

В процессе производства осуществляется контроль технологической дисциплины. Предприятие обеспечивает необходимые условия и средства для проведения этого контроля. При выявлении в процессе контроля нарушений от установленных требований к ТП проводятся следующие мероприятия:

— устанавливается степень влияния нарушений на качество микросхем, характер и причина их появления;

— приостанавливаются работы на технологических операциях (ТО), связанных с выявленными нарушениями;

— разрабатываются мероприятия по приведению ТП в соответствие с предъявляемыми требованиями, изъяты из производства микросхемы, изготовленные с нарушением требований конструкторской документации (КД) и ТД.

По результатам проведенного анализа и необходимых мероприятий совместным решением из-

готовителя и представителя заказчика решаются следующие вопросы:

- возобновление работ по ТО; приемка и отгрузка микросхем;

- проведение дополнительного контроля, отбраковок и испытаний микросхем, изготовленных с нарушением, а также ранее принятых микросхем, изготовленных до проведения мероприятий.

На предприятии осуществляется планирование и проведение работ по совершенствованию ТП:

- повышению точности, настроенности и стабильности ТП;

- снижению трудоемкости, доли ручного труда, повышению автоматизации и экономической эффективности операций изготовления и контроля;

- снижению доли дефектности микросхем, повышению производственных запасов по параметрам и др.

Технологический процесс изготовления микросхем повышенного уровня качества и радиационностойких предусматривает дополнительные по отношению к микросхемам с обычным уровнем качества следующие технологические и контрольные операции:

- диагностический неразрушающий контроль, в том числе имитационными методами, и отбраковочные испытания для выявления и отбраковки потенциально ненадежных, не радиационностойких микросхем;

- дополнительный операционный контроль на ТО;

- ужесточенный операционный контроль на отдельных важнейших операциях;

- более оперативное статистическое регулирование.

В процессе производства микросхем службы предприятия изготовителя и представитель заказчика (ПЗ) осуществляют систематический контроль за соблюдением ТП. При обнаружении нарушений приемка микросхем приостанавливается. Микросхемы, изготовленные с нарушением ТП, с производства снимают и изолируют, и микросхемы, изготовленные с нарушением и находящиеся на приемке у ПЗ, возвращают изготовителю без права их предъявления как микросхем повышенного уровня качества. После приведения производства в соответствие с установленными ТП руководство предприятия-изготовителя ставит об этом в известность ПЗ (письменно), после чего изготовление и приемка микросхем могут быть возобновлены.

В автоматизированном производстве микросхем может реализоваться новая методология проведения процессов, в основе которой — широкое использование методов внутримодульного контроля (ВМК), позволяющих включать сведения о

свойствах и кинетике образования структур непосредственно в ходе технологических процессов.

Основные задачи ВМК:

1. Контроль следующих размеров: толщины слоев; глубины щелей при локальном травлении; толщины локально осажденных областей и полноты удаления слоев при жидкостном, плазменном и реактивно-ионном травлении. Диапазон контролируемых толщин и глубин травления от единиц нанометров до единиц микрометров, при этом допустимые погрешности не превышают 5 % от номинала, а при субмикронных проектных нормах и нанометровых толщинах слоев требуемые точности становятся сопоставимыми с постоянными решетки.

2. Контроль структурного совершенства и состояния поверхностей структур и слоев.

3. Контроль температуры структур и обрабатываемых поверхностей, необходимый для обеспече-

ния воспроизводимости процессов, настройки и отладки модулей.

Для автоматизированного комплекса длительность технологического цикла значительно сокращается.

При автоматизированном производстве обеспечиваются:

- изготовление фотошаблонов на базе данных для проектирования микросхемы с целью исключения в них ошибок;
- изготовление кристаллов на основе оперативного статистического контроля режимов технологических операций, электрических параметров, структур для контроля надежности, оценочных схем для контроля процесса изготовления, замены реальной схемы при оценке надежности.

УДК 621.382.049.77 + 531:546.621-31

**Н. И. Мухуров**, д-р техн. наук,  
**Г. И. Ефремов**, канд. техн. наук,  
**С. П. Жвавий**, д-р физ.-мат. наук,  
Институт физики им. Б. И. Степанова  
Национальной академии наук Беларуси

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЛЕ С АВТОНОМНЫМИ ДЕРЖАТЕЛЯМИ

*Предложена концепция формирования электростатических реле с отдельно выполненными якорем и упругими держателями. Выявлены особенности и закономерности взаимодействия активных электростатических и реактивных механических сил. Показано существенное преимущество предложенной схемы по сравнению с традиционными монолитными, состоящее в повышении основных технико-экономических показателей и расширении функциональных возможностей.*

### Введение

Микроэлектромеханические системы с электростатическим принципом актуации находят широкое применение в различных отраслях техники. В частности, перспективно их применение в качестве переключающих контактных реле в устройствах регулирования, управления и связи [1–3]. Большая востребованность электростатических реле (ЭСР) обуславливает необходимость постоянного повышения их технико-экономических показателей, в числе которых основное направление занимает снижение управляющего напряжения  $U$ .

В данной работе эта задача рассматривается применительно к ЭСР плоскопараллельной конструкции (ЭСР ПК), состоящей (рис. 1) из диэлектрических металлизированных основания 1 с неподвижным электродом 2, якоря 3 с подвижным электродом 4, упругих держателей 5, соединяющих якорь с основанием [4–6]. В этом ЭСР напряжение срабатывания определяется по формуле [7]

$$U_p = 0,385 \sqrt{\frac{2kEIq}{\epsilon_0 L^3 S} t_0^3}, \quad (1)$$

где  $E$  — модуль упругости материала держателя;  $I = cd^3/12$  — момент инерции сечения держателя;  $L$ ,  $c$ ,  $d$  — длина, ширина, толщина держателя;  $k$  — коэффициент закрепления концов держателя,  $k = 3$  для консольного держателя (КД) и  $k = 12$  для балочного держателя (БД), оба конца которого жестко соединены с деталями ЭСР;  $q$  — число держателей;  $S$  — площадь электрода;  $t_0$  — межэлектродное расстояние;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

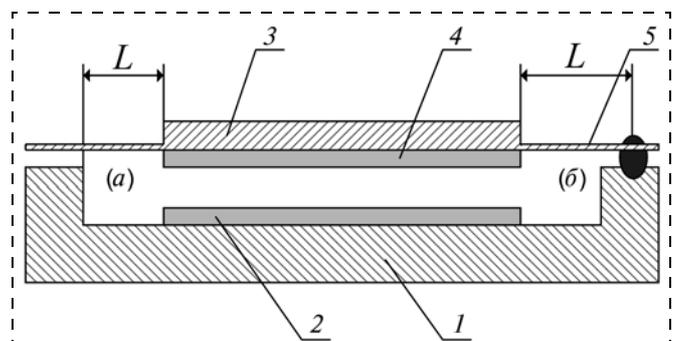


Рис. 1. ЭСР ПК с упругими консольным (а) и балочным (б) держателями длиной  $L$

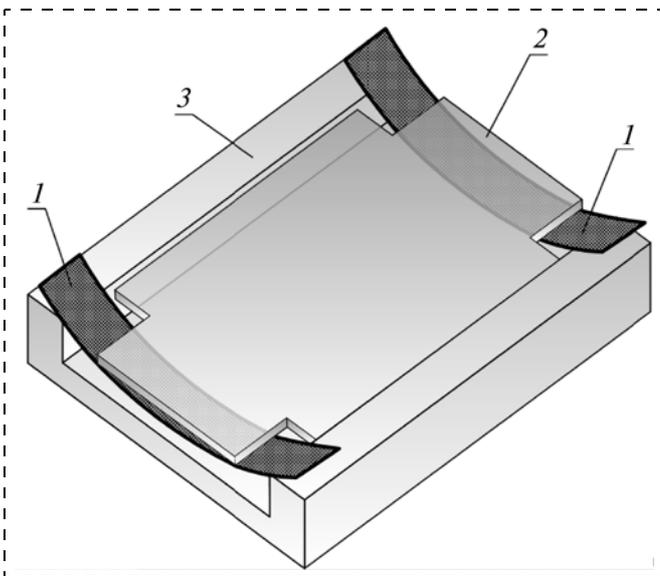


Рис. 2. ЭСР ПК с автономными держателями 1, плоским жестким якорем 2, основанием 3

Из формулы (1) следует, что держатели оказывают определяющее влияние на  $U_p$ , и совершенствование их конструктивного исполнения, направленное на уменьшение реактивной механической силы  $P$ , позволит получить весьма значительный положительный эффект. Представляется, что такую возможность может дать реализация принципа раздельного формирования якоря и упругих элементов. В схеме, приведенной на рис. 2, автономные держатели (АД), представляющие собой плоскую узкую и длинную ленточку малого сечения, свободно опираются концами на выступы основания и поддерживают средней частью верхней плоскости свободно лежащий на них жесткий якорь. Замена жестких соединений АД с основанием и якорем опорами, которые можно отнести к шарнирным, увеличение длины упругих элементов обеспечат снижение реактивной силы  $P_0$  и рабочего напряжения  $U_p$ .

### Вывод основных соотношений

На рис. 3 представлена расчетная схема ЭСР АД с автономным держателем 1, общей длиной  $l$  и участками держателя, размещенными между опорой и точкой контактирования держателя с якорем, длиной  $a$ , жестким якорем 2, основанием 3 с опорными площадками 4, содержащими электрические контакты и исключающими замыкание электродов в конечном положении.

АД показан в трех последовательных положениях: прямолинейном исходном состоянии при  $U = 0$  и изогнутом промежуточном и конечном состояниях при смещении якоря на  $y_1 = t_0/3$  и на  $y_{1\max} = 0,9t_0$  соответственно. Перемещение якоря в интервале  $0 \dots y_1$  под воздействием электростатических сил осуществляется

в управляемом режиме при увеличении напряжения от 0 до  $U_p$  (1). Дальнейшее движение якоря происходит в неуправляемом режиме коллапса практически при постоянном значении  $U$  и заканчивается замыканием контактных групп.

Особенностью кинематики схемы является увеличенный прогиб  $y_2$  центрального сечения АД при равенстве прогиба  $y_1$  сечения, контактирующего с якорем, значению смещения якоря. Возможность свободного увеличенного перемещения середины держателя обеспечивается выполнением под ним специальной канавки 5 глубиной  $H > y_{2\max}$ . Электростатические силы, действующие на плоский якорь, благодаря его жесткости представляют равномерно распределенную суммарную нагрузку со значением  $F$ , которая преобразуется в сосредоточенные силы  $F/4$  в точках контакта якоря с АД.

Введем относительные величины перемещения якоря в межэлектродном промежутке  $m = y/t_0$  и соотношения длин участков АД  $n = l/a > 2$ ,  $n_x = l/x$ . По методу начальных параметров [8], учитывая, что параметры  $y_0$  и  $M_0$  равны нулю, находим параметры деформируемого под действием электростатических сил  $F$  автономного держателя: вначале реактивную силу опор  $P_0$ , угол поворота  $\theta_0$  сечения над опорой при  $x = 0$  и затем остальные показатели напряженного состояния АД:

$$P_0 = \frac{F}{4} = P; \quad (2)$$

$$\theta_0 = \frac{Pa^2}{2EI}(n-1); \quad (3)$$

упругая линия половины держателя, в которой согласно методу последний член учитывается при  $n/n_x > 1$ ,

$$y_x = \frac{Pa^3}{6EI} \left[ 3(n-1)\frac{n}{n_x} - \frac{n^3}{n_x^3} + \left(\frac{n}{n_x} - 1\right)^3 \right]; \quad (4)$$

прогиб в середине держателя

$$y_2 = \frac{Pa^3}{24EI}(3n^2 - 4), \quad (5)$$

прогиб в точке А, расположенной на расстоянии  $a$  от начала АД,

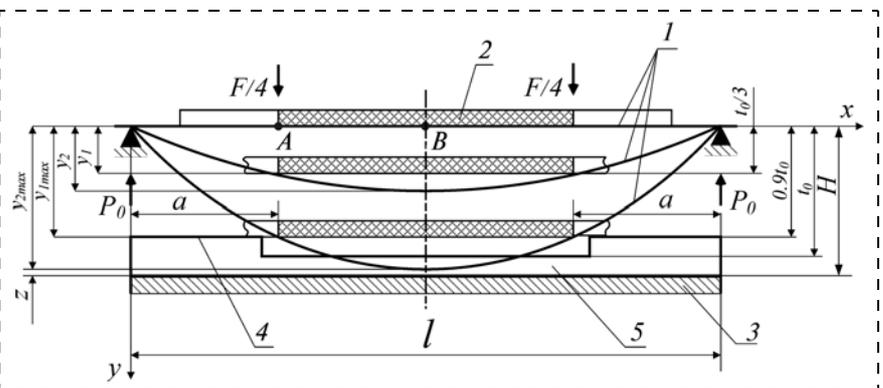


Рис. 3. Расчетная схема ЭСР с автономным держателем

$$y_1 = \frac{Pa^3}{6EI}(3n-4); \quad (6)$$

реактивная сила в контактной точке

$$P = \frac{6EI t_0 n^3}{l^3(3n-4)} m. \quad (7)$$

Наибольшее значение прогибов ограничивается пределом прочности.

Электростатические силы также представим с учетом относительного изменения межэлектродного расстояния:

$$F = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2t_0^2(1-m)^2}. \quad (8)$$

Расчет традиционных конструкций электромеханических систем основывается на равенстве активных электростатических и реактивных механических сил [6, 7]:

$$F = 4P. \quad (9)$$

В данной конструкции расчет отличается тем, что помимо силового соотношения учитывается равенство перемещений не средней точки держателя, а промежуточной, расположенной на расстоянии  $a$  от начала координат. Из выражений (7)–(9) определяем теоретические зависимости электрического напряжения от конструктивных параметров в полном цикле равновесного режима:

для варианта  $l = \text{const}$

$$U_l = \sqrt{\frac{48 E I t_0^3}{\epsilon_0 S l^3}} \sqrt{\frac{n^3}{3n-4}} \sqrt{m(1-m)^2} \quad (10)$$

и для варианта  $a = \text{const}$ :

$$U_a = \sqrt{\frac{48 E I t_0^3}{\epsilon_0 S a^3}} \sqrt{\frac{1}{3n-4}} \sqrt{m(1-m)^2}. \quad (11)$$

Эти зависимости представим в следующем едином обобщенном виде:

$$U = C_1 C_2 U^*. \quad (12)$$

Символы в выражении (12) соответствуют математическим выражениям в (10), (11), размещенным в той же последовательности. В (12)  $C_1$  — конструктивная константа, содержащая элементы, остающиеся неизменными в процессе функционирования реле;  $C_2$  — геометрическая константа, учитывающая размерное соотношение участков держателя;  $U^*$  — базовая функция. В нее входят переменные в цикле величины, представленные в относительном виде, и она характеризует закономерность изменения напряжения при срабатывании реле в равновесном режиме при  $C_1 = C_2 = 1$  и идентична соответствующей формуле традиционных плоскопараллельных систем [7, 9]. Графически, независимо от любых сочетаний конструктивных и физических параметров устройств, она выражается кривой типа параболы с

нулевым значением  $U^*$  при  $m = 0$  и при  $m = 1$ , и со значением  $U_0^* = U_{\text{max}}^* = 0,385$  при  $m = m_0 = 1/3$ . Соответствующее значение  $U_{\text{max}}$  при реальных значениях  $C_1$  и  $C_2$  является в релейных системах рабочим напряжением срабатывания  $U_p$ , после которого начинается коллапсирование якоря в крайнее нижнее по схеме положение.

### Анализ взаимосвязи электромеханических и конструктивных параметров

Особенность рассматриваемой конструктивной схемы в выражениях (10), (11) учитывается геометрической константой  $C_2$ , которая за счет легко осуществляемого изменения соотношения длин участков автономного держателя позволяет в широких пределах варьировать значением рабочего напряжения  $U_p$ . Так, в пределах  $n = 3 \dots 10$  при  $a = \text{const}$   $C_{2a}$  снижается с 0,45 до 0,2, а при  $l = \text{const}$   $C_{2l}$  возрастает с 2,3 до 6,2 (рис. 4), соответственно изменяются значения напряжений. Разный характер изменения  $C_2$  объясняется тем, что при увеличении  $n$  в варианте  $a = \text{const}$  общая длина держателя  $l$  увеличивается и его упругость повышается, тогда как при  $l = \text{const}$  значение  $a$  уменьшается и при той же  $F$  приводит к уменьшению прогиба держателя. Это можно рассматривать как увеличение его жесткости.

При расчете конструкции с определенными значениями  $l$  и  $a$  по формулам (10) и (11) будет получен одинаковый результат, т. е. равенство  $U_l$  и  $U_a$ . При проектировании учет особенностей зависимости  $C_2(n)$  (рис. 4) даст возможность корректировки  $U$  в нужном направлении.

Рассчитанные по формуле (11) зависимости  $\frac{U_a}{U_{1a}}$  ( $n, m$ ) представлены графически на рис. 5 и 6, из которых следует, что базовые кривые имеют идентичный вид, и  $n$  эффективно влияет на снижение напряжения  $U_a$  в диапазоне  $n = 2,5 \dots 5$  (при этом  $U_{ap}$  уменьшается в  $\sim 1,75$  раза).

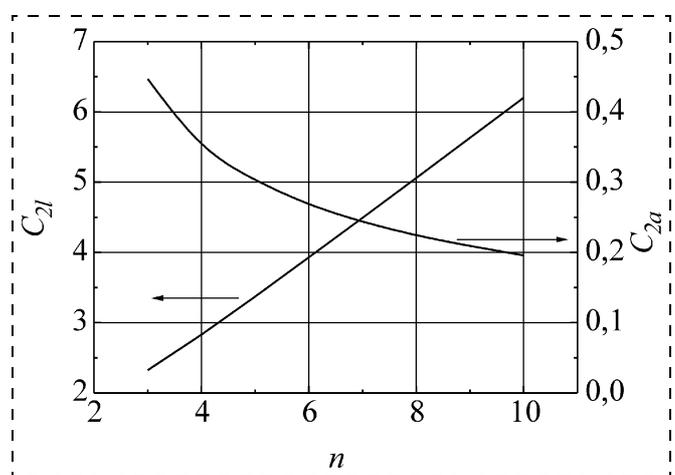


Рис. 4. Зависимость геометрических констант  $C_{2a}$  и  $C_{2l}$  от относительной длины  $n$  участков АД

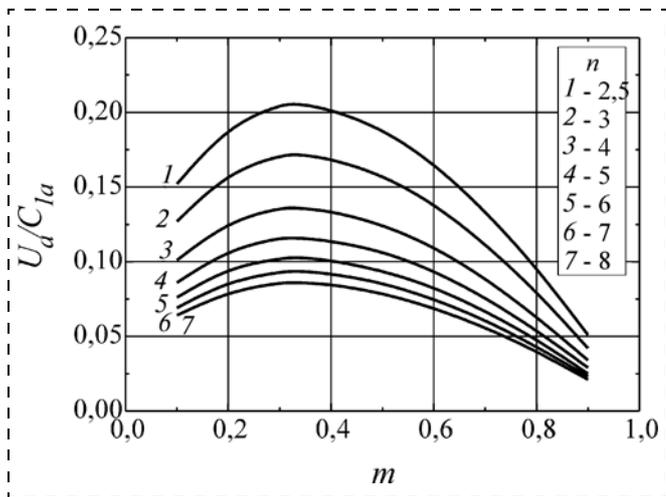


Рис. 5. Зависимость напряжения  $U_d/C_{1a}$  от  $n$  и  $m$

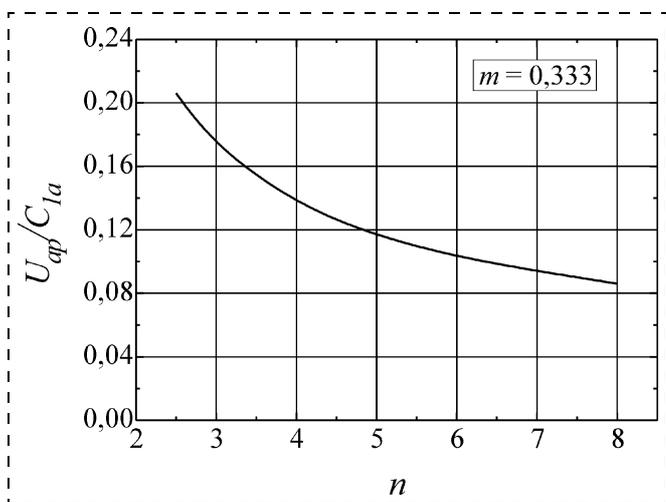


Рис. 6. Зависимость рабочего напряжения от  $n$

Для сопоставления значений рабочих напряжений схемы с автономными держателями  $U_a$  и схем с балочными  $U_b$  и консольными  $U_k$  держателями приведем соответствующие формулы:

$$U_b = \sqrt{\frac{96 E I t_0^3}{\varepsilon_0 L^3 S}} \sqrt{m(1-m)^2}; \quad (13)$$

$$U_k = \sqrt{\frac{24 E I t_0^3}{\varepsilon_0 L^3 S}} \sqrt{m(1-m)^2}. \quad (14)$$

Полагая в (11), (13), (14) конструктивные параметры одинаковыми и  $L = a$ , определяем отношения

$$\frac{U_b}{U_6} = 1; \quad \frac{U_k}{U_6} = \sqrt{\frac{24}{96}} = 0,5;$$

$$\frac{U_a}{U_6} = \sqrt{\frac{48}{96}} \sqrt{\frac{1}{3n-4}} = \sqrt{\frac{1}{2(3n-4)}}. \quad (15)$$

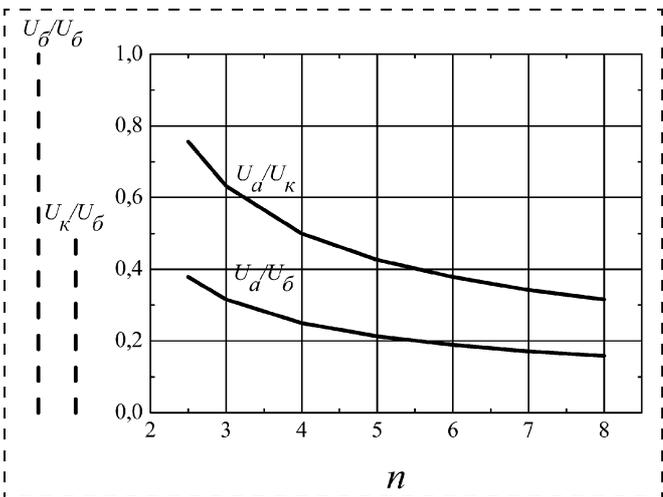


Рис. 7. Сопоставление напряжений в ЭСР с держателями: автономными  $U_a$ , консольными  $U_k$ , балочными  $U_b$

Из результатов расчетов (рис. 7) следует, что автономные держатели в диапазоне  $n = 2,5 \dots 5$  снижают отношение  $U_a/U_b$  соответственно с 0,38 до 0,16, т. е. в 2,6...4,7 раз,  $U_a/U_k$  — в 1,30...2,35 раз. Уменьшение  $n < 2,5$  нереально для практической реализации, увеличение  $n > 5$  не дает существенного повышения эффективности автономных держателей, но увеличивает габаритные размеры.

В высокочастотных линиях связи, регулировки и других системах большое значение имеет перепад напряжений от включения  $U_{вкл}$  до отключения  $U_{откл}$  микрореле, так как он во многом определяет продолжительность цикла. Конструктивно снижения  $U_{вкл}/U_{откл}$  можно достичь [7] за счет уменьшения межконтактного расстояния  $t_k$ , соответствующего значению  $m = 0,35 \dots 0,45 > m_0 = 0,333$ . Отношение  $U_{вкл}/U_{откл}$  при этом не превышает 1,1, что, однако, существенно снизит значение контактного усилия  $Q$ . Конструкция микрореле с АД позволяет эффективно повысить этот параметр. Решение задачи достигается созданием дополнительного электростатического поля  $F_1$  в промежутке "АД — дно канавки 5", имеющего потенциал, равный основному полю. Силы  $F_1$ , воздействуя на АД при фиксированном положении якоря, уменьшают реактивную силу, приложенную к АД, соответственно увеличивая контактное усилие  $Q$ .

Учитывая (4), (7), (8), (9), находим, что требуемое контактное усилие определяется из соотношения

$$Q = F - [P - F_1(z)] =$$

$$= F - \left[ P - 2\varepsilon_0 c U^2 \int_0^{1/2} \frac{dx}{(y_{2\max} + z - y_x)^2} \right], \quad (16)$$

откуда по заданному значению  $F_1(z)$  вычисляется соответствующее значение минимального межэлектродного расстояния  $z$  между АД и электродом (см. рис. 3). При этом значение  $F_1$  может варьироваться от 0 до  $P$ . Изменение значения  $F_1$  может быть

осуществлено выбором необходимой площади электродов дополнительного поля за счет сечения средней части АД. Прогибы такого ступенчатого держателя на шарнирных опорах, нагруженного сосредоточенными силами  $P$  на концах среднего участка, определяются по табличным формулам теории упругости [8].

ЭСР АД дают также возможность расширения функциональной области применения за счет формирования на диэлектрических держателях, имеющих в данной конструкции прогиб  $y_{2\max}$  значительно больше  $t_0$ , пьезо- и тензочувствительных слоев. Так, например, у автономного держателя длиной  $l = 10 \cdot 10^{-3}$  м и толщиной  $d = 30 \cdot 10^{-6}$  м при прогибе  $y_2 = 40 \cdot 10^{-6}$  м значение упругих относительных деформаций внешних поверхностей достигает  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ , что вполне достаточно для подключения контрольной или исполнительной аппаратуры.

Наряду с улучшением технических характеристик ЭСР АД повышается надежность устройств за счет исключения ступенчатости толщины диэлектрических пластин якоря, которая обуславливает высокую концентрацию внутренних механических напряжений в местах перепада сечений диэлектрика, особенно опасную при режимах работы на высоких частотах. Применение металлических АД резко снижает плотность тока и сокращает вероятность перегорания на этом участке управляющей цепи.

ЭСР АД существенно упрощают технологию изготовления деталей и сборку узлов, повышают процент выхода при производстве, т. е. позволяют улучшить экономические показатели.

Параметры ЭСР АД конкретной конструкции:  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $E = 1,4 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>;  $S = 20 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $c = 1 \cdot 10^{-3}$  м;  $d = 15 \cdot 10^{-6}$  м;  $l = 4 \cdot 10^{-3}$  м;  $a = 10^{-3}$  м;  $t_0 = 15 \cdot 10^{-6}$  м;  $m = 0 \dots 0,9$ ;  $m_0 = 1/3$ ;  $U^* = 0,385$ ;  $n = 4$ ;  $q = 4$ .

Расчетные параметры:

$$I = 281 \cdot 10^{-21} \text{ м}^4.$$

а) при  $m_0 = 1/3$ ,  $P_1 = 147,5 \cdot 10^{-6}$  Н;  $U_{ap} = 25,8$  В;  $F = 4P_1 = 589 \cdot 10^{-6}$  Н;  $y_1 = 5 \cdot 10^{-6}$  м;  $y_2 = 6,9 \cdot 10^{-6}$  м  $> t_0$ ,  $m_0 = 5 \cdot 10^{-6}$  м;  $Q = 0$ ;

б) при  $m = 0,9$ ,  $U_{ap} = \text{const} = 25,8$  В;  $P_1 = 398 \cdot 10^{-6}$  Н;  $F = 26\,182 \cdot 10^{-6}$  Н;  $F/4P_1 = 66$ ;  $y_1 = 13,5 \cdot 10^{-6}$  м;  $y_2 = 18,5 \cdot 10^{-6}$  м;  $Q = 24\,590 \cdot 10^{-6}$  Н;

в) при  $m = 0,4$ ,  $U_{ap} = \text{const} = 25,8$  В;  $P = 177 \cdot 10^{-6}$  Н;  $F = 727 \cdot 10^{-6}$  Н;  $Q = 19 \cdot 10^{-6}$  Н;  $y_2 = 8,25 \cdot 10^{-6}$  м.

$F_1$ , Н	$Q$ , Н	$z$ , м		
		$a = 4/5$	$a = 4/4$	$a = 4/3$
0,25P	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$9,659 \cdot 10^{-6}$	$9,327 \cdot 10^{-6}$	$8,879 \cdot 10^{-6}$
0,50P	$3,73 \cdot 10^{-4}$	$6,436 \cdot 10^{-6}$	$6,161 \cdot 10^{-6}$	$5,799 \cdot 10^{-6}$
0,75P	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$5,032 \cdot 10^{-6}$	$4,804 \cdot 10^{-6}$	$4,494 \cdot 10^{-6}$
1,00P	$7,27 \cdot 10^{-4}$	$4,231 \cdot 10^{-6}$	$4,016 \cdot 10^{-6}$	$3,741 \cdot 10^{-6}$

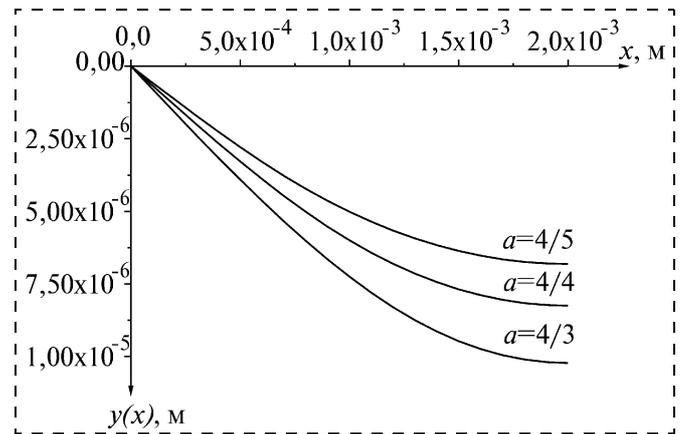


Рис. 8. Упругие линии АД  $y(x)$

Упругие линии держателей  $y(x)$  при оптимальных значениях  $n$  представлены на рис. 8.

С учетом действия сил  $F_1$  для  $a = (l/4) \cdot 10^{-3}$  м находим, что для получения  $Q = (727; 550; 373; 196) \cdot 10^{-6}$  Н, т. е. при  $F_1(z) = 1P; 3P/4; 2P/4; P/4$  значение  $z$  должно быть  $(4; 4,8; 6,2; 9,3) \cdot 10^{-6}$  м соответственно (см. таблицу).

## Заключение

Электростатические реле с автономными держателями за счет уменьшения жесткости упругих элементов имеют пониженные в 1,3—4,7 раза значения напряжения срабатывания по сравнению с традиционными конструкциями, а за счет прикладывания дополнительного электростатического поля в среднем обеспечивают повышение в 20...30 раз контактных усилий при относительных значениях перемещения якоря в межэлектродном промежутке  $m = 0,4 \dots 0,6$  и могут быть применены в перспективных разработках.

## Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI в. // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
2. Grace R. H. New opportunities for MEMS // Design news. 2001. November. P. 81.
3. Vaezi-Nejad S. M. A random walk in sensors: recent advances and market opportunities // Meas. + Contr. — 1998. 31. № 3. P. 80—86.
4. Пат. 2667 РБ, МПК5 Н 01Н 59/00. Электростатическое микрореле / Григоришин И. Л., Ефремов Г. И., Мухуров Н. И.
5. Пат. 4305033 ФРГ. МПК НОШ 59/00. Микромеханическое реле с гибридным приводом / Сименс А. Г.
6. Chan E. K., Dutton R. W. Effects of capacitors, resistors and residual charge on the static and dynamic performance of electrostatically-actuated devices // Proc. of SPIE. — 1999.
7. Ефремов Г. И., Мухуров Н. И. Функциональные возможности электростатических микрореле по результатам моделирования // Труды науч.-техн. конф. "Кибернетика и технологии XXI века". Воронеж, 2001. С. 499—508.
8. Пономарев С. П. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. М.: Наука, Ф. М. Л. 1956. 569 с.
9. Efremov G. I., Mukhurov N. I. Modeling of Electrostatic Microrelay Duty Cycle // Proc. of SPIE. 2000. V. 4407. P. 322—326.

Е. М. Белозубов, канд. техн. наук,  
Н. Е. Белозубова,  
НИИ физических измерений, г. Пенза

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР И ВИБРОУСКОРЕНИЙ

Представлены термоэлектрическая и математическая модели неинформативного преобразования термоЭДС в выходной сигнал тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления при воздействии нестационарных температур и виброускорений в изделиях ракетной и авиационной техники.

Воздействия нестационарных температур и виброускорений во многих случаях являются критическими факторами, определяющими характеристики датчиков давления при их использовании в ракетной и авиационной технике. В настоящее время для измерения давлений в изделиях ракетной техники при экстремальных условиях эксплуатации наиболее широко используются тонкопленочные тензорезисторные датчики давления (ТТДД) [1]. При всем многообразии конструктивно-технологических решений, применяемых при создании ТТДД для экстремальных условий эксплуатации, в их структуре можно выделить общие подсистемы и элементы, определяющие характер термоэлектрических явлений при воздействии нестационарных температур и виброускорений. К ним можно отнести:

- чувствительный элемент в виде МЭМС-структуры;
- выводные проводники;
- адгезионное покрытие гермовыводов;
- гермовыводы;
- провода кабельной перемычки;
- контакты разъема.

Выводные проводники предназначены для соединения контактных площадок МЭМС-структуры с гермовыводами (через адгезионное покрытие). Гермовыводы обеспечивают соединение герметизированной МЭМС-структуры с внешними элементами. Провода кабельной перемычки соединяют гермовыводы с контактами разъема.

Характеристики ТТДД во многом определяются характеристиками их МЭМС-структур. На основе созданной в работе [2] термоэлектрической модели тензоэлементов, из которых состоят тензорезисторы МЭМС-структуры, ее термоэлектрическую модель можно представить в виде, представленном на рис. 1. На этом рисунке условно изображено по одному тензоэлементу в тензорезисторе. Фактически в каж-

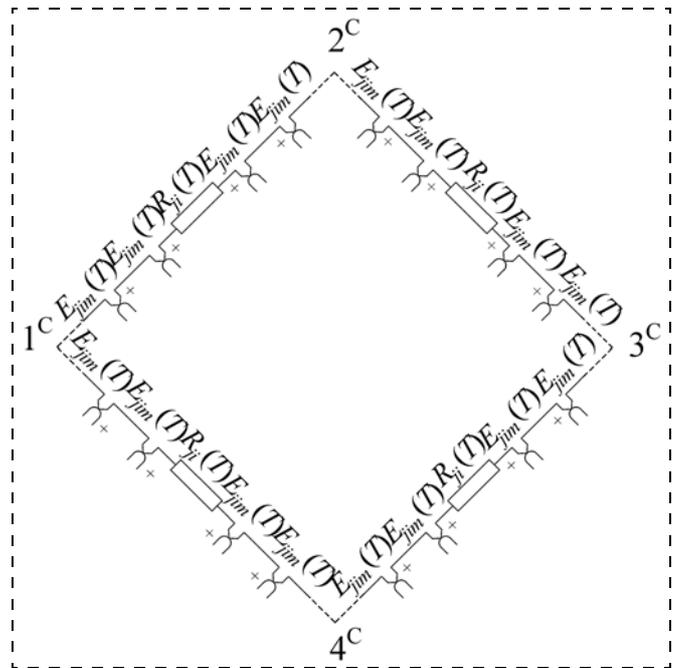


Рис. 1. Термоэлектрическая модель МЭМС-структуры ТТДД

дом тензорезисторе современных ТТДД используется от 1 до 20 тензоэлементов.

На рис. 1 обозначено:  $E_{jim}(T)$  —  $m$ -я термоЭДС  $i$ -го тензоэлемента  $j$ -го тензорезистора;  $T$  — температура;  $R_{ji}(T)$  — сопротивление  $i$ -го тензоэлемента  $j$ -го тензорезистора; 1<sup>C</sup>, 2<sup>C</sup>, 3<sup>C</sup>, 4<sup>C</sup> — контактные площадки МЭМС-структуры. Полученную в работе [2] модель неинформативного преобразования термоЭДС МЭМС-структуры ТТДД в выходной сигнал представим в виде

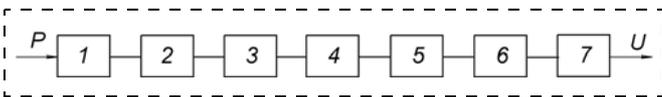
$$U_{\text{вых.с}}(T) = \sum_{j=1}^4 \left\{ \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{m=1}^M E_{jim}(T) + \int_{T_{iH}}^{T_{iK}} \sigma_{\alpha ji} dT \right] \right\} \times$$

$$\times \left[ \sum_{j=1}^4 R_j(T) \right]^{-1} [R_4(T) + R_1(T)] +$$

$$+ \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{m=1}^M E_{1im}(T) + \int_{T_{iH}}^{T_{iK}} \sigma_{\alpha 1i} dT \right] +$$

$$+ \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{m=1}^M E_{4im}(T) + \int_{T_{iH}}^{T_{iK}} \sigma_{\alpha 4i} dT \right], \quad (1)$$

где 4 — число тензорезисторов в мостовой измерительной схеме МЭМС-структуры;  $I$  — число тензоэлементов в тензорезисторе;  $M$  — число термоэлектрических структур в тензоэлементе;  $E_{jim}(T)$  —  $m$ -я термоЭДС  $i$ -го тензоэлемента  $j$ -го тензорезистора;  $T_{jiH}$  — температура в начале  $i$ -го тензоэлемента  $j$ -го тензорезистора;  $T_{jiK}$  — температура в конце  $i$ -го тензоэлемента  $j$ -го тензорезистора;  $\sigma_{\alpha ji}$  — коэффициент Томсона для материала  $i$ -го тензоэлемента  $j$ -го тен-



**Рис. 2. Структурная схема ТТД с точки зрения термоэлектрических неоднородностей:**

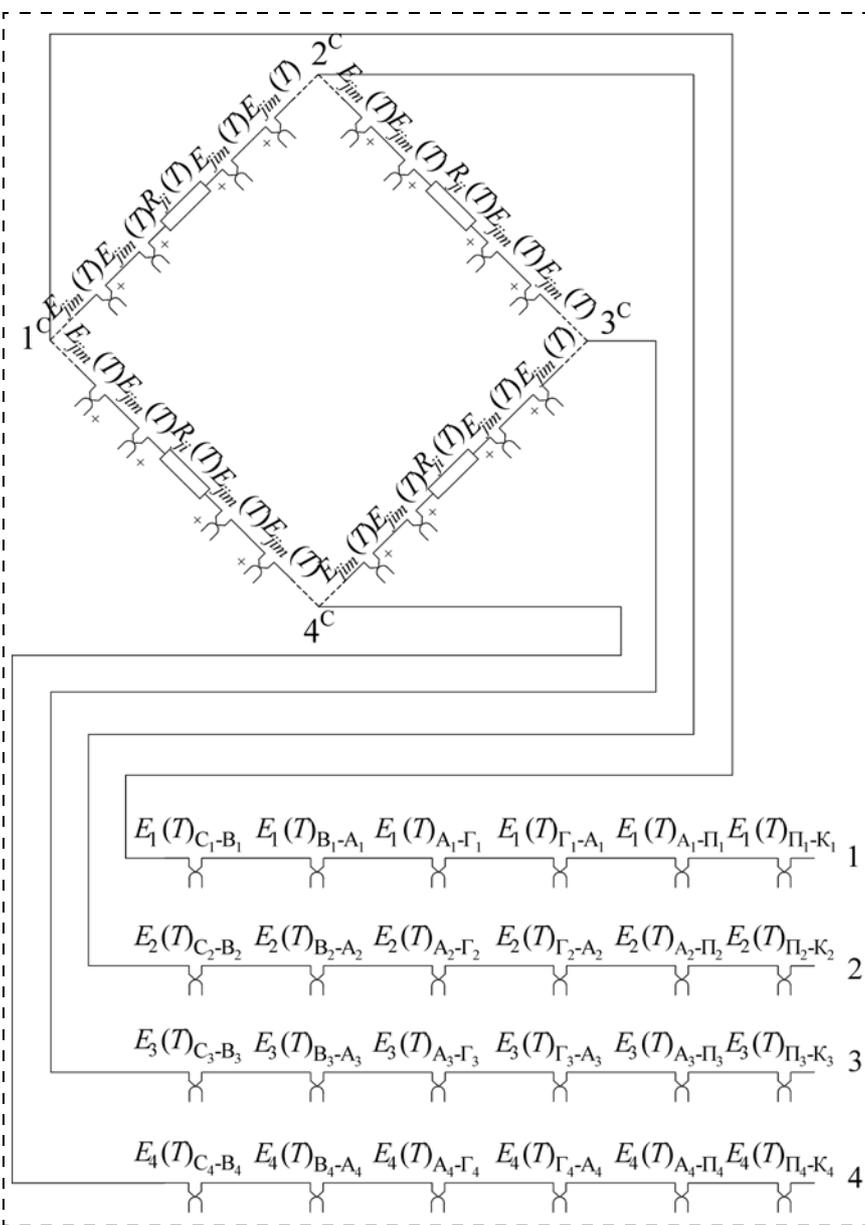
1 — МЭМС-структура; 2 — граница "контактная площадка МЭМС-структуры — выводной проводник"; 3 — граница "выводной проводник — адгезионное покрытие гермовывода"; 4 — граница "адгезионное покрытие гермовывода — гермовывод"; 5 — граница "гермовывод — адгезионное покрытие гермовывода"; 6 — граница "адгезионное покрытие гермовывода — провод кабельной перемычки"; 7 — граница "провод кабельной перемычки — контакт разъема"

зорезистора;  $R_j(T) = \sum_{i=1}^I R_{ji}$  — сопротивление  $j$ -го тензорезистора.

В реальных условиях эксплуатации не только МЭМС-структуры, но и все другие элементы и под-

системы ТТД подвергаются воздействию нестационарной температуры измеряемой среды, нестационарной температуры окружающей среды и виброускорений. Как было установлено ранее, воздействие виброускорений приводит к дополнительному изменению температуры подсистем и элементов ТТД. При этом возникающая в результате воздействия виброускорений температура носит нестационарный характер. Поэтому в выражении (1) и далее температура  $T$  в общем случае является функцией от нестационарной температуры измеряемой среды  $T_{н.и}$ , нестационарной температуры окружающей среды  $T_{н.о}$  и виброускорений  $W$ , т. е.  $T = f(T_{н.и}, T_{н.о}, W)$ . С точки зрения термоэлектрических неоднородностей структурную схему ТТД, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях, можно представить в виде, изображенном на рис. 2.

В соответствии с термоэлектрической моделью МЭМС-структуры и структурной схемой ТТД термоэлектрическую модель всего ТТД можно представить в виде, изображенном на рис. 3.



**Рис. 3. Термоэлектрическая модель ТТД**

На рис. 3 обозначено:  $E_1(T)_{C_1-B_1}$ ,  $E_2(T)_{C_2-B_2}$ ,  $E_3(T)_{C_3-B_3}$ ,  $E_4(T)_{C_4-B_4}$  — термоЭДС на границе "контактная площадка МЭМС-структуры — выводной проводник" соответственно первой, второй, третьей, четвертой цепей;  $E_1(T)_{B_1-A_1}$ ,  $E_2(T)_{B_2-A_2}$ ,  $E_3(T)_{B_3-A_3}$ ,  $E_4(T)_{B_4-A_4}$  — термоЭДС на границе "выводной проводник — адгезионное покрытие гермовывода" соответственно первой, второй, третьей, четвертой цепей;  $E_1(T)_{A_1-G_1}$ ,  $E_2(T)_{A_2-G_2}$ ,  $E_3(T)_{A_3-G_3}$ ,  $E_4(T)_{A_4-G_4}$  — термоЭДС на границе "адгезионное покрытие гермовывода — гермовывод" соответственно первой, второй, третьей, четвертой цепей;  $E_1(T)_{G_1-A_1}$ ,  $E_2(T)_{G_2-A_2}$ ,  $E_3(T)_{G_3-A_3}$ ,  $E_4(T)_{G_4-A_4}$  — термоЭДС на границе "гермовывод — адгезионное покрытие гермовывода" соответственно первой, второй, третьей, четвертой цепей;  $E_1(T)_{A_1-P_1}$ ,  $E_2(T)_{A_2-P_2}$ ,  $E_3(T)_{A_3-P_3}$ ,  $E_4(T)_{A_4-P_4}$  — термоЭДС на границе "адгезионное покрытие гермовывода — провод кабельной перемычки" соответственно первой, второй, третьей, четвертой цепей;  $E_1(T)_{P_1-K_1}$ ,  $E_2(T)_{P_2-K_2}$ ,  $E_3(T)_{P_3-K_3}$ ,  $E_4(T)_{P_4-K_4}$  — термоЭДС на границе "провод кабельной перемычки — контакт разъема" соответственно первой, второй, третьей, четвертой цепей; 1, 2,

3, 4 — контакты разъема, причем 1, 3 — измерительные цепи, 2, 4 — цепи питания.

При источнике питания, отключенном от контактов 2 и 4 разъема датчика, элементы второй и четвертой цепей электрически не замкнуты, следовательно, они не будут влиять на выходной сигнал ТТДД. При источнике питания, подключенном к контактам 2 и 4 разъема датчика, влияние сигналов, вызванных термоэлектрическими явлениями, будет проявляться в изменении напряжения питания ТТДД. В реальных конструкциях ТТДД термоЭДС, вызванные термоэлектрическими явлениями во второй и четвертой цепях, в 500—1000 раз меньше напряжения питания, поэтому их влиянием можно пренебречь. В связи с этим можно в соответствии с термоэлектрической моделью ТТДД и с учетом выражения (1) записать выражение для математической модели неинформативного преобразования термоЭДС в выходной сигнал ТТДД при воздействии нестационарных температур и виброускорений:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вых}}(T) = & \sum_{j=1}^4 \left\{ \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{m=1}^M E_{jim}(T) + \int_{T_{iH}}^{T_{iK}} \sigma_{\alpha ji} dT \right] \right\} \times \\
 & \times \left[ \sum_{j=1}^4 R_j(T) \right]^{-1} [R_4(T) + R_1(T)] + \\
 & + \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{m=1}^M E_{1im}(T) + \int_{T_{iH}}^{T_{iK}} \sigma_{\alpha 1i} dT \right] + \\
 & + \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{m=1}^M E_{4im}(T) + \int_{T_{iH}}^{T_{iK}} \sigma_{\alpha 4i} dT \right] + E_1(T)_{C_1-B_1} + \\
 & + \int_{T_{B_1H}}^{T_{B_1K}} \sigma_{\alpha B_1} dT + E_1(T)_{B_1-A_1} + \int_{T_{A_1H}}^{T_{A_1K}} \sigma_{\alpha A_1} dT + \\
 & + E_1(T)_{A_1-\Gamma_1} + \int_{T_{\Gamma_1H}}^{T_{\Gamma_1K}} \sigma_{\alpha \Gamma_1} dT + E_1(T)_{\Gamma_1-A_1} + \\
 & + \int_{T_{A_{11}H_1}}^{T_{A_{11}K_1}} \sigma_{\alpha A_1} dT + E_1(T)_{A_1-\Pi_1} + \int_{T_{\Pi_1H}}^{T_{\Pi_1K}} \sigma_{\alpha \Pi_1} dT + \\
 & + E_1(T)_{\Pi_1-K_1} - E_3(T)_{C_3-B_3} - \int_{T_{B_3H}}^{T_{B_3K}} \sigma_{\alpha B_3} dT - \\
 & - E_3(T)_{B_3-A_3} - \int_{T_{A_1H}}^{T_{A_1K}} \sigma_{\alpha A_3} dT - E_3(T)_{A_3-\Gamma_3} - \\
 & - \int_{T_{\Gamma_3H}}^{T_{\Gamma_3K}} \sigma_{\alpha \Gamma_3} dT - E_3(T)_{\Gamma_3-A_3} - \int_{T_{A_{31}H}}^{T_{A_{31}K}} \sigma_{\alpha A_3} dT - \\
 & - E_3(T)_{A_3-\Pi_3} - \int_{T_{\Pi_3H}}^{T_{\Pi_3K}} \sigma_{\alpha \Pi_3} dT + E_3(T)_{\Pi_3-K_3}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где  $T = f(T_{н.и}, T_{н.о}, W)$ ;  $T_{B_1H}, T_{B_3H}$  — температура в начале выводного проводника соответственно первой и третьей цепей;  $T_{B_1K}, T_{B_3K}$  — температура в конце выводного проводника соответственно первой и третьей цепей;  $\sigma_{\alpha B_1}, \sigma_{\alpha B_3}$  — коэффициент Томпсона для материала выводного проводника соответственно первой и третьей цепей;  $T_{A_1H}, T_{A_3H}$  — температура в начале адгезионного покрытия гермовывода, расположенного со стороны выводных проводников, соответственно первой и третьей цепей;  $T_{A_1K}, T_{A_3K}$  — температура в конце адгезионного покрытия гермовывода, расположенного со стороны выводных проводников, соответственно первой и третьей цепей;  $\sigma_{\alpha A_1}, \sigma_{\alpha A_3}$  — коэффициент Томпсона для материала адгезионного покрытия соответственно первой и третьей цепей;  $T_{A_{11}H}, T_{A_{31}H}$  — температура в начале адгезионного покрытия гермовывода, расположенного со стороны проводов кабельной перемычки, соответственно первой и третьей цепей;  $T_{A_{11}K}, T_{A_{31}K}$  — температура в конце адгезионного покрытия гермовывода, расположенного со стороны проводов кабельной перемычки, соответственно первой и третьей цепей;  $T_{\Gamma_1H}, T_{\Gamma_3H}$  — температура в начале гермовывода (без адгезионного покрытия) соответственно первой и третьей цепей;  $T_{\Gamma_1K}, T_{\Gamma_3K}$  — температура в конце гермовывода (без адгезионного покрытия) соответственно первой и третьей цепей;  $\sigma_{\alpha \Gamma_1}, \sigma_{\alpha \Gamma_3}$  — коэффициент Томпсона для материала гермовывода (без адгезионного покрытия) соответственно первой и третьей цепей;  $T_{\Pi_1H}, T_{\Pi_3H}$  — температура в начале провода кабельной перемычки соответственно первой и третьей цепей;  $T_{\Pi_1K}, T_{\Pi_3K}$  — температура в конце провода кабельной перемычки соответственно первой и третьей цепей;  $\sigma_{\alpha \Pi_1}, \sigma_{\alpha \Pi_3}$  — коэффициент Томпсона для материала провода кабельной перемычки соответственно первой и третьей цепей.

Для проведения качественного анализа влияния нестационарных температур и виброускорений разъема рассмотрим полученную модель при достаточно малых различиях температур элементов. В этом случае, условно пренебрегая нелинейным характером распределения температур в пределах конкретных элементов, можно представить выражение для упрощенной математической модели неинформативного преобразования термоЭДС в выходной сигнал ТТДД в виде

$$\begin{aligned}
U_{\text{ВЫХ}}(T) = & \sum_{j=1}^4 \left\{ \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{m=1}^M S_{jim}(T_{jim} - T_{j-1, i-1, m-1}) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \sigma_{\alpha ij}(T_{jik} - T_{jih}) \right] \right\} \left\{ \sum_{j=1}^4 R_{j0}[1 + \alpha_j \Delta T_j] \right\}^{-1} \times \\
& \times \{ [R_{40}[1 + \alpha_4 \Delta T_4] + R_{10}[1 + \alpha_1 \Delta T_1]] + \\
& + \sum_{44=1}^I \left[ \sum_{m=1}^M S_{1im}(T_{1im} - T_{1, i-1, m-1}) + \sigma_{\alpha 1i}(T_{1ik} - T_{1ih}) \right] + \\
& + \sum_{i=1}^I \left[ \sum_{m=1}^M S_{4im}(T_{4im} - T_{4, i-1, m-1}) + \sigma_{\alpha 4i}(T_{4ik} - T_{4ih}) \right] + \\
& + S_{C-B}(T_{C_1-B_1} - T_{C_3-B_3}) + \sigma_{\alpha B}[(T_{B_1K} - T_{B_1H}) - \\
& - (T_{B_3K} - T_{B_3H})] + S_{B-A}(T_{B_1-A_1} - T_{B_3-A_3}) + \\
& + \sigma_{\alpha A}[(T_{A_1K} - T_{A_1H}) - (T_{A_3K} - T_{A_3H})] + \\
& + S_{A-\Gamma}(T_{A_1-\Gamma_1} - T_{A_3-\Gamma_3}) + \sigma_{\alpha \Gamma}[(T_{\Gamma_1K} - T_{\Gamma_1H}) - \\
& - (T_{\Gamma_3K} - T_{\Gamma_3H})] + S_{\Gamma-A}(T_{\Gamma_1-A_1} - T_{\Gamma_3-A_3}) + \\
& + \sigma_{\alpha A}[(T_{A_1K} - T_{A_1H}) - (T_{A_3K} - T_{A_3H})] + \\
& + S_{A-\Pi}(T_{A_1-\Pi_1} - T_{A_3-\Pi_3}) + \sigma_{\alpha \Pi}[(T_{\Pi_1K} - T_{\Pi_1H}) - \\
& - (T_{\Pi_3K} - T_{\Pi_3H})] + S_{\Pi-K}(T_{\Pi_1-K_1} - T_{\Pi_3-K_3}), (3)
\end{aligned}$$

где  $S_{jim}$  — коэффициент термоЭДС контактирующих материалов  $m$ -й термоэлектрической структуры  $i$ -го тензоэлемента  $j$ -го тензорезистора;  $T_{jim}$  — температура контактирующих материалов  $m$ -й термоэлектрической структуры  $i$ -го тензоэлемента  $j$ -го тензорезистора;  $R_{j0}$  — сопротивление  $j$ -го тензорезистора при начальной среднеинтегральной температуре  $j$ -го тензорезистора;  $\alpha_j$  — температурный коэффициент сопротивления  $j$ -го тензорезистора;  $\Delta T_j$  — изменение среднеинтегральной температуры  $j$ -го тензорезистора;  $S_{C-B}$ ,  $S_{B-A}$ ,  $S_{A-\Gamma}$ ,  $S_{\Gamma-A}$ ,  $S_{A-\Pi}$ ,  $S_{\Pi-K}$  — коэффициенты термоЭДС контактирующих материалов соответственно "контактная площадка — выводной проводник", "выводной проводник — адгезионное покрытие гермовывода", "адгезионное покрытие гермовывода — гермовывод", "гермовывод — адгезионное покрытие гермовывода", "адгезионное покрытие гермовывода — провод кабельной перемычки", "провод кабельной перемычки — контакт разъема";  $T_{C_1-B_1}$ ,  $T_{C_3-B_3}$ ,  $T_{B_1-A_1}$ ,  $T_{B_3-A_3}$ ,  $T_{A_1-\Gamma_1}$ ,  $T_{A_3-\Gamma_3}$ ,  $T_{\Gamma_1-A_1}$ ,  $T_{\Gamma_3-A_3}$ ,  $T_{A_1-\Pi_1}$ ,  $T_{A_3-\Pi_3}$ ,  $T_{\Pi_1-K_1}$ ,  $T_{\Pi_3-K_3}$  — температура на границе "контактная площадка МЭМС-структуры — выводной проводник", "выводной проводник — адгезионное покрытие гермовывода", "адгезионное покрытие гермовывода — гермовывод", "гермовывод — адгезионное покрытие гермовывода", "адгезионное покрытие гермовывода — провод кабельной перемычки", "провод кабельной перемычки —

контакт разъема" соответственно первой и третьей цепей.

Воздействие нестационарной температуры измеряемой среды на МЭМС-структуру ТГДД достаточно подробно рассмотрено в [2]. Анализ модели (3) при воздействии нестационарных температур (в том числе — вызванных виброускорениями) на ТГДД показывает, что выходной сигнал датчика зависит как от поведения МЭМС-структуры, так и от поведения схемы соединения контактных площадок тонкопленочной тензоструктуры с контактами разъема. Кроме того, анализ полученной модели позволяет сделать вывод, что выходной сигнал датчика при воздействии нестационарных температур зависит от коэффициентов термоЭДС соответствующих контактирующих материалов, от разности температур соответствующих контактирующих материалов в измерительных цепях, а также от изменения температур элементов в этих цепях.

В идеальной конструкции ТГДД, т. е. в которой элементы имеют абсолютно идентичные геометрические и физико-химические характеристики при воздействии нестационарного температурного поля, направленного вдоль его оси, выходной сигнал ТГДД будет равен нулю при отключенном источнике питания. Так как при реальном изготовлении ТГДД всегда допускаются некоторые отклонения геометрических характеристик (формы, размеров элементов, их взаимного расположения) и отклонения физико-химических характеристик элементов, приводящие к появлению дополнительных термоэлектрических неоднородностей, то выходной сигнал с датчика при воздействии на него нестационарной температуры (при отсутствии напряжения питания) не будет равен нулю. При воздействии нестационарной температуры окружающей среды, направленной не вдоль продольной оси датчика, в нем возникает трехмерное, неравномерное, несимметричное температурное поле. В этом случае даже при отсутствии отклонений геометрических и физико-химических характеристик элементов ТГДД выходной сигнал (при отсутствии напряжения питания) не будет равен нулю.

В соответствии с законом Фурье плотность теплового потока [1]

$$q = -\lambda \text{grad} T, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала;

$$\text{grad} T = \frac{\partial T}{\partial n} = \nabla T. \quad (5)$$

Непосредственно из закона Фурье следует, что при конкретном значении теплового потока градиент температуры обратно пропорционален коэффициенту теплопроводности:

$$\text{grad} T = q \lambda^{-1}. \quad (6)$$

Тогда после преобразований получаем выражения для разностей соответствующих температур:

$$\begin{aligned}
& (T_{jim} - T_{j-1, i-1, m-1}) = \\
& = \lambda_{jim}^{-1} - (j-1, i-1, m-1) (\Phi_{jim} - \Phi_{j-1, i-1, m-1}) \times \\
& \quad \times q_{jim} - (j-1, i-1, m-1);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(T_{jiK} - T_{jiH}) &= \lambda_{jiK-jjH}^{-1} (\Phi_{jiK} - \Phi_{jiH}) q_{jiK-jjH}; \\
\Delta T_j &= \lambda_j^{-1} \Phi_j q_j; \quad \Delta T_4 = \lambda_4^{-1} \Phi_4 q_4; \\
\Delta T_1 &= \lambda_1^{-1} \Phi_1 q_1; \quad (T_{1im} - T_{1,i-1,m-1}) = \\
&= \lambda_{1im-(1,i-1,m-1)}^{-1} (\Phi_{1im} - \Phi_{1,i-1,m-1}) \times \\
&\quad \times q_{1im-(1,i-1,m-1)}; \\
(T_{1iK} - T_{1iH}) &= \lambda_{1iK-1iH}^{-1} (\Phi_{1iK} - \Phi_{1iH}) q_{1iK-1iH}; \\
(T_{4im} - T_{4,i-1,m-1}) &= \lambda_{4im-(4,i-1,m-1)}^{-1} \times \\
&\quad \times (\Phi_{4im} - \Phi_{4,i-1,m-1}) q_{4im-(4,i-1,m-1)}; \\
(T_{4iK} - T_{4iH}) &= \lambda_{4iK-4iH}^{-1} (\Phi_{4iK} - \Phi_{4iH}) q_{4iK-4iH}; \\
(T_{C_1-B_1} - T_{C_3-B_3}) &= \lambda_{(C_1-B_1)-(C_3-B_3)}^{-1} \times \\
&\quad \times (\Psi_{C_1-B_1} - \Psi_{C_3-B_3}) q_{(C_1-B_1)-(C_3-B_3)}; \quad (7) \\
(T_{B_1K} - T_{B_1H}) &= \\
&= \lambda_{B_1K-B_1H}^{-1} (\Psi_{B_1K} - \Psi_{B_1H}) q_{B_1K-B_1H}; \\
(T_{B_3K} - T_{B_3H}) &= \\
&= \lambda_{B_3K-B_3H}^{-1} (\Psi_{B_3K} - \Psi_{B_3H}) q_{B_3K-B_3H}; \\
(T_{B_1-A_1} - T_{B_3-A_3}) &= \lambda_{(B_1-A_1)-(B_3-A_3)}^{-1} \times \\
&\quad \times (\Psi_{B_1-A_1} - \Psi_{B_3-A_3}) q_{(B_1-A_1)-(B_3-A_3)}; \\
(T_{A_1K} - T_{A_1H}) &= \\
&= \lambda_{A_1K-A_1H}^{-1} (\Psi_{A_1K} - \Psi_{A_1H}) q_{A_1K-A_1H}; \\
(T_{A_3K} - T_{A_3H}) &= \\
&= \lambda_{A_3K-A_3H}^{-1} (\Psi_{A_3K} - \Psi_{A_3H}) q_{A_3K-A_3H}; \\
(T_{A_1-\Gamma_1} - T_{A_3-\Gamma_3}) &= \lambda_{(A_1-\Gamma_1)-(A_3-\Gamma_3)}^{-1} \times \\
&\quad \times (\Psi_{A_1-\Gamma_1} - \Psi_{A_3-\Gamma_3}) q_{(A_1-\Gamma_1)-(A_3-\Gamma_3)}; \\
(T_{\Gamma_1K} - T_{\Gamma_1H}) &= \\
&= \lambda_{\Gamma_1K-\Gamma_1H}^{-1} (\Psi_{\Gamma_1K} - \Psi_{\Gamma_1H}) q_{\Gamma_1K-\Gamma_1H}; \\
(T_{\Gamma_3K} - T_{\Gamma_3H}) &= \\
&= \lambda_{\Gamma_3K-\Gamma_3H}^{-1} (\Psi_{\Gamma_3K} - \Psi_{\Gamma_3H}) q_{\Gamma_3K-\Gamma_3H}; \\
(T_{\Gamma_1-A_1} - T_{\Gamma_3-A_3}) &= \lambda_{(\Gamma_1-A_1)-(\Gamma_3-A_3)}^{-1} \times \\
&\quad \times (\Psi_{\Gamma_1-A_1} - \Psi_{\Gamma_3-A_3}) q_{(\Gamma_1-A_1)-(\Gamma_3-A_3)}; \\
(T_{A_1-\Pi_1} - T_{A_3-\Pi_3}) &= \lambda_{(A_1-\Pi_1)-(A_3-\Pi_3)}^{-1} \times \\
&\quad \times (\Psi_{A_1-\Pi_1} - \Psi_{A_3-\Pi_3}) q_{(A_1-\Pi_1)-(A_3-\Pi_3)};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(T_{\Pi_1K} - T_{\Pi_1H}) &= \\
&= \lambda_{\Pi_1K-\Pi_1H}^{-1} (\Psi_{\Pi_1K} - \Psi_{\Pi_1H}) q_{\Pi_1K-\Pi_1H}; \\
(T_{\Pi_3K} - T_{\Pi_3H}) &= \\
&= \lambda_{\Pi_3K-\Pi_3H}^{-1} (\Psi_{\Pi_3K} - \Psi_{\Pi_3H}) q_{\Pi_3K-\Pi_3H}; \\
(T_{\Pi_1-K_1} - T_{\Pi_3-K_3}) &= \lambda_{(\Pi_1-K_1)-(\Pi_3-K_3)}^{-1} \times \\
&\quad \times (\Psi_{\Pi_1-K_1} - \Psi_{\Pi_3-K_3}) q_{(\Pi_1-K_1)-(\Pi_3-K_3)};
\end{aligned}$$

где  $\Phi = (X^2 + Y^2)^{0,5}$ ,  $\Psi = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{0,5}$ .

Анализ упрощенной модели неинформативного преобразования с учетом полученных выражений для разностей температур показывает, что для минимизации влияния температур и виброускорений на датчики давления с тонкопленочными МЭМС-структурами необходимы в идеале: минимальный коэффициент термоЭДС контактирующих материалов; максимальный коэффициент теплопроводности всех элементов конструкции; минимальные расстояния между соответствующими элементами и минимальные плотности тепловых потоков между этими элементами. В качестве первоочередных конкретных мероприятий, актуальных для тонкопленочных тензорезисторных датчиков, можно назвать следующие:

- гермовыводы или их части, расположенные симметрично оси гермовыводов, должны быть выполнены из материала, который имеет минимальную контактную разность потенциалов с материалами выводных проводников и проводов, соединяющих гермовыводы с внешней измерительной схемой;
- мембрана, периферийное основание, корпус, выводные проводники, гермовыводы, провода или их части, расположенные симметрично их продольным осям, должны быть выполнены из материала с высокой теплопроводностью.

Воздействие виброускорений может привести к уходу выходного сигнала датчика при неравномерном нагреве от виброперемещений элементов измерительной цепи или (и) при различии их термоэлектрических характеристик. Поэтому уменьшение влияния виброускорений на выходной сигнал ТТДД может быть достигнуто за счет уменьшения виброперемещений элементов измерительной цепи, например, с помощью закрепления кабельной перемычки на корпусе ТТДД или другом его элементе, например накидной гайке, что одновременно повысит вибропрочность конструкции.

#### Список литературы

1. Мокров Е. А., Белозубов Е. М. Базовая системная модель нового поколения тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления для ракетной и авиационной техники // Датчики и системы. 2005. № 6. С. 10–14.
2. Мокров Е. А., Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Модель неинформативного преобразования термоЭДС МЭМС-структур тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления при воздействии нестационарных температур // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 53–60.
4. Куинн Т. Температура: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 448 с.
5. Белевцев А. В. и др. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие / Под общ. ред. А. В. Каржавина. Обнинск. 2003. 56 с.

**В. В. Лихошерст**, аспирант,  
 ГОУ ВПО "Тульский государственный  
 университет"

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ПРЯМОГО И КОМПЕНСАЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ

*Проведен анализ характеристик микромеханического акселерометра при его работе в режиме прямого и компенсационного измерений. При рассмотрении работы микроакселерометра в компенсационном режиме проанализированы характеристики прибора с двумя различными схемами реализации контура жесткой обратной связи.*

### Введение

При проектировании новых или модернизации уже имеющихся чувствительных элементов микромеханических приборов, в частности микроакселерометров (МА), в целях улучшения характеристик прибора (диапазон измеряемых ускорений, полоса пропускания, масштабный коэффициент) чаще всего разрабатывается новая или модернизируется существующая схема электронной части прибора. Наиболее известным способом улучшения характеристик прибора является создание контура обратной связи. Цель данной статьи — провести сравнительный анализ характеристик микроакселерометров единого конструктивного исполнения с различными схемами реализации электронной части МА.

### Постановка задачи

При сравнительном анализе характеристик МА рассматривается чувствительный элемент (ЧЭ), показанный на рис. 1. ЧЭ представляет собой инерционную массу (ИМ) 1, подвешенную на упругих элементах 2 и имеющую в своем составе четыре пары емкостных гребенчатых преобразователей 3. Особенностью преобразователя является несимметричное расположение подвижных гребенок относительно неподвижных (рис. 2).

Конструкция имеет следующие параметры:

- Исходный диапазон измерения . . . . . 10 g;
- Масса . . . . .  $1,184 \cdot 10^{-7}$  кг;
- Жесткость элементов упругого подвеса . . . 11,35 Н/м;
- Емкость преобразователей (половины всех преобразователей) . . . . . 3,9 пФ;

Зазоры между гребенками:

- тыловой . . . . . 10 мкм;
- фронтальный . . . . . 2 мкм;

Демпфирование газовое.

В процессе анализа рассматриваются три типа исполнения акселерометров, построенных на базе ЧЭ, представленного на рис. 1.

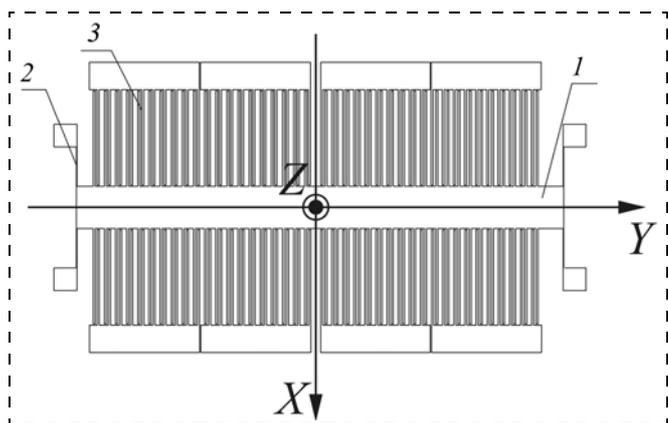
1. Акселерометр прямого измерения (структурная схема представлена на рис. 3).

2. Акселерометр компенсационного измерения с управлением по преобразованному сигналу (рис. 4).

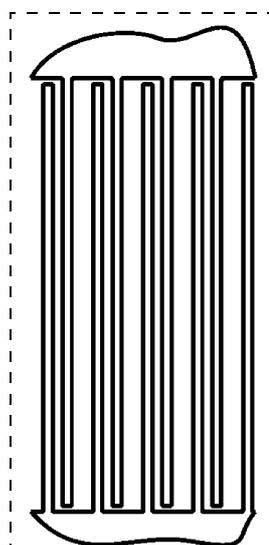
3. Акселерометр компенсационного измерения с непосредственным управлением по частотно-модулированному сигналу (рис. 5).

На рис. 3—5 приняты следующие сокращения в названиях блоков и величин:

ГС — генератор сигналов; ЧЭ — чувствительный элемент микромеханического акселерометра; ПП — емкостный преобразователь перемещения; ПС — емкостный преобразователь силы; СД — синхронный детектор; БСС — блок согласования сигналов.



**Рис. 1. Конструкция микроакселерометра:**  
 1 — инерционная масса; 2 — упругие элементы; 3 — емкостные преобразователи (число гребенок преобразователей сокращено для "читаемости" рисунка)



**Рис. 2. Элементы емкостного преобразователя**

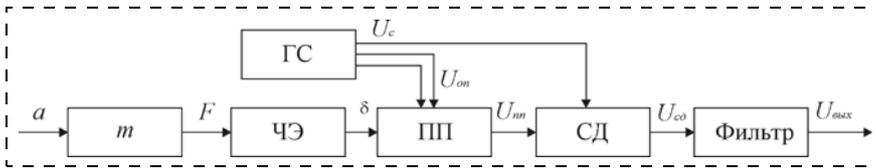


Рис. 3. Структурная схема акселерометра прямого измерения

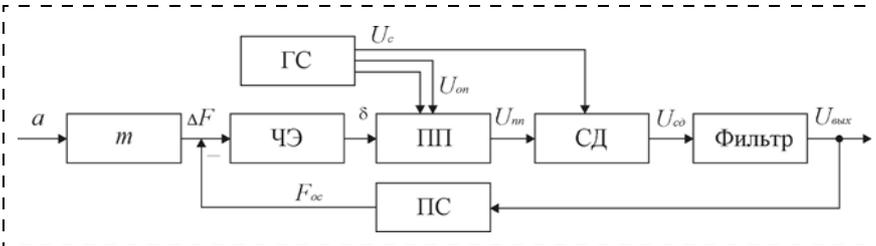


Рис. 4. Структурная схема акселерометра компенсационного измерения с управлением по преобразованному сигналу

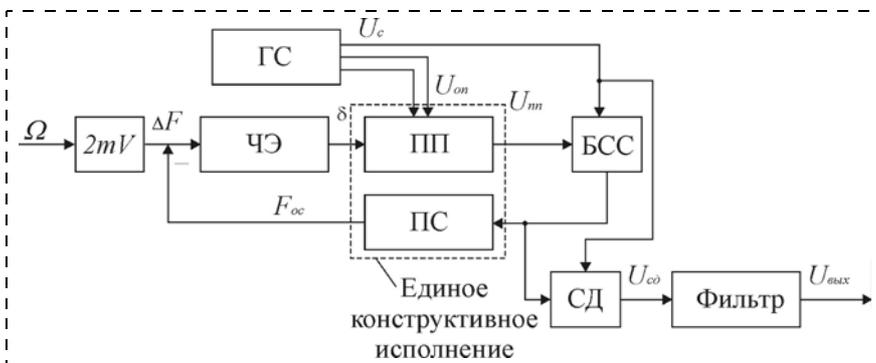


Рис. 5. Структурная схема акселерометра компенсационного измерения с непосредственным управлением по частотно-модулированному сигналу

$a$  — ускорение, воздействующее на МА;  $\delta$  — перемещение ИМ относительно среднего положения;  $F$  — сила действующего ускорения;  $F_{oc}$  — сила, развиваемая преобразователем силы цепи обратной связи (ОС);  $\Delta F$  — разностная сила;  $U_c$  — частотная последовательность импульсов срабатывания ДС и БСС;  $U_{оп}$  — напряжение питания ПП;  $U_{пп}$  — напряжение на выходе преобразователя перемещения;  $U_{сд}$  — напряжение на выходе синхронного детектора;  $U_{вых}$  — напряжение на выходе датчика.

Принцип работы схемы, представленной на рис. 3, рассмотрен в работе [1] и заключается в следующем. При действии ускорения ИМ прибора отклоняется на некоторое значение, вследствие чего происходит изменение амплитуды заряда емкостей преобразователя перемещения. В результате на выходе преобразователя будет иметь место частотно-модулированный сигнал по огибающей, повторяющий перемещение ИМ, и симметричный относительно нуля. Для демодуляции данный сигнал подается на вход синхронного детектора, который в общем случае выполняет роль двухполупериодного фазочувствительного выпрямителя. Для выделения огибающей сигнал подается на фильтр.

Отличием схемы на рис. 4 от схемы, приведенной на рис. 3, является то, что сигнал с выхода фильтра прикладывается к одному из плечей преобразователя силы таким образом, чтобы усилие, развиваемое преобразователем, было направлено в сторону, противоположную направлению движения ИМ.

Принцип работы схемы, приведенной на рис. 5, изложен в работе [2] и заключается в том, что каждый полупериод приложения напряжения к емкостному преобразователю разделен на два периода: малой длительности — период измерения, и большей длительности — период управления. Таким образом, и съем сигнала, и управление перемещением ИМ осуществляются в каждый период приложения напряжения к преобразователю, что позволяет увеличить точность, быстродействие и эффективность работы ОС.

В схеме, приведенной на рис. 3, все преобразователи используются как преобразователи перемещения. В схеме на рис. 4 30 % от общего числа преобразователей используются в качестве преобразователей перемещения, остальные — преобразователей силы. В схеме рис. 5 все преобразователи используются и как преобразователи силы, и как преобразователи перемещения.

Сравнительный анализ проводится по следующим параметрам:

- амплитуда перемещения ИМ при действии постоянного ускорения;
- время выхода на режим;
- масштабный коэффициент;
- линейность выходной характеристики.

### Математическая модель и результаты моделирования

Движение ИМ рассматривается как движение ее центра масс и только в направлении оси чувствительности прибора. Уравнение, описывающее это движение, имеет вид [1]:

$$m\ddot{y} + k_{dy}\dot{y} + G_y y = ma_y + F_3(y, U), \quad (1)$$

где  $m$  — масса, участвующая в движении;  $y$  — обобщенная координата движения;  $k_{dy}$  — коэффициент демпфирования;  $G_y$  — суммарная жесткость элементов подвеса;  $F_3(y, U)$  — электростатическая сила как функция перемещения и напряжения, при-

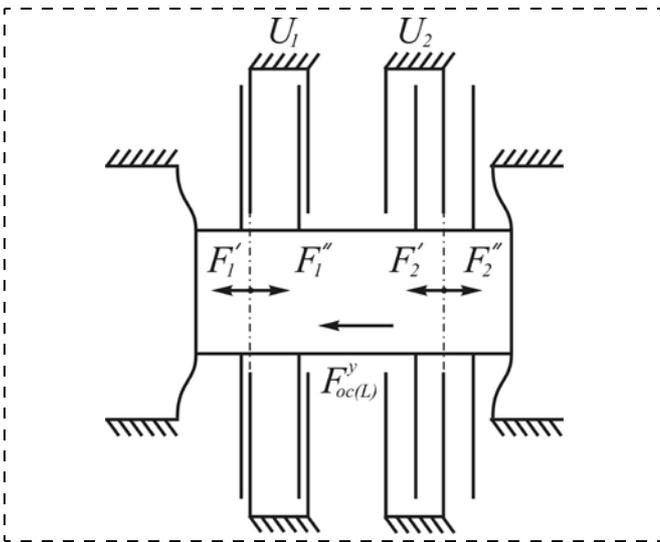


Рис. 6. Упрощенное изображение ИМ, смещенной под действием ускорения

ложенного к обкладкам, как преобразователей перемещения, так и преобразователей силы.

Выражения для определения коэффициента демпфирования, суммарной жесткости подвеса и массы ЧЭ приведены в работе [1].

Уравнение (1) справедливо для всех рассматриваемых в данной статье схем исполнения акселерометров при соответствующей записи функции, определяющей направление и значение электростатической силы, приложенной к ИМ акселерометра.

Получим выражения для определения электростатической силы, развиваемой емкостным преобразователем (см. рис. 2), для схем, приведенных на рис. 3–5.

Для схемы на рис. 5 при получении выражения для электростатической силы воспользуемся упрощенным изображением ЧЭ МА, смещенным в результате действия ускорения (рис. 6).

Согласно рис. 6 выражения для составляющих электростатической силы, создаваемой цепью ОС, будут иметь вид:

$$F_1' = \frac{1}{2} \frac{n\epsilon\epsilon_0 S U_1^2}{2(\delta_f - \delta)^2}; F_1'' = \frac{1}{2} \frac{n\epsilon\epsilon_0 S U_1^2}{2(\delta_t + \delta)^2};$$

$$U_1 = U - \Delta U;$$

$$F_2' = \frac{1}{2} \frac{n\epsilon\epsilon_0 S U_2^2}{2(\delta_t - \delta)^2}; F_2'' = \frac{1}{2} \frac{n\epsilon\epsilon_0 S U_2^2}{2(\delta_f + \delta)^2};$$

$$U_2 = U + \Delta U,$$

где  $\epsilon$ ,  $\epsilon_0$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды и диэлектрическая постоянная;

$S$  — площадь перекрытия гребенчатых структур преобразователя;  $n$  — число гребенчатых структур, участвующих в создании силы;  $\delta_f$ ,  $\delta_t$ ,  $\delta$  — фронтальный, тыловой зазоры и текущее перемещение соответственно;  $U$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $\Delta U = k_{oc}\delta$  — опорное напряжение питания преобразователя силы, управляющие напряжения на каждой из секций преобразователя и смещение напряжения соответственно.

Сила, действующая в направлении перемещения ИМ (схлопывающая сила), будет определяться выражением

$$F_{S(L)} = \frac{1}{2} \frac{n\epsilon\epsilon_0 S U^2}{\delta_0^2} \times$$

$$\times \left( \frac{(1 - \Delta \bar{U})^2 (\bar{\delta}_{ot} - \bar{\delta})^2 + \left(1 + \frac{1}{n}\right) (1 + \Delta \bar{U})^2 (1 - \bar{\delta})^2}{(\bar{\delta}_{ot} - \bar{\delta})^2 (1 - \bar{\delta})^2} \right);$$

$$\Delta \bar{U} = \frac{\Delta U}{U}; \bar{\delta}_{ot} = \frac{\delta_t}{\delta_f}; \bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_f}; \delta_o = \delta_f \quad (2)$$

где  $\Delta \bar{U}$  — величина, характеризующая отношение управляющего напряжения к опорному напряжению питания преобразователя силы;  $\bar{\delta}_{ot}$  — величина, характеризующая отношение тылового зазора к фронтальному;  $\bar{\delta}$  — величина, характеризующая отношение текущего перемещения к фронтальному зазору.

Сила, направленная противоположно перемещению ИМ (возвращающая сила), имеет вид:

$$F_{V(L)} = \frac{1}{2} \frac{n\epsilon\epsilon_0 S U^2}{\delta_0^2} \times$$

$$\times \left( \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right) (1 - \Delta \bar{U})^2 (1 + \bar{\delta})^2 + (1 + \Delta \bar{U})^2 (\bar{\delta}_{ot} + \bar{\delta})^2}{(\bar{\delta}_{ot} + \bar{\delta})^2 (1 + \bar{\delta})^2} \right). \quad (3)$$

Исходя из полученных выражений запишем формулу, определяющую суммарное значение электростатической силы преобразователя цепи обратной связи при линейном управлении:

$$F_{oc(L)}^y = F_{S(L)} - F_{V(L)}. \quad (4)$$

Для схемы, приведенной на рис. 3, структура выражения останется аналогичной, различие будет

заключаться в напряжении, прикладываемом к обкладкам, — оно будет постоянным:

$$F_{nn}^y = \frac{1}{2} \frac{n\varepsilon\varepsilon_0 S U_{\text{оп}}^2}{\delta_0^2} \times \left[ \frac{(\bar{\delta}_{ot} - \bar{\delta})^2 + (1 - \bar{\delta})^2}{(1 - \bar{\delta})^2 (\bar{\delta}_{ot} - \bar{\delta})^2} - \frac{(1 + \bar{\delta})^2 + (\bar{\delta}_{ot} + \bar{\delta})^2}{(1 + \bar{\delta})^2 (\bar{\delta}_{ot} + \bar{\delta})^2} \right]. \quad (5)$$

Для схемы на рис. 4 выражение для определения электростатической силы, развиваемой преобразователем силы, будет иметь следующий вид:

$$\bar{F}_{\text{ос}(R)}^y = \begin{cases} -\frac{\Delta \bar{U}^2 [(\bar{\delta}_{ot} - |\bar{\delta}|)^2 + (1 + |\bar{\delta}|)^2]}{(\bar{\delta}_{ot} - |\bar{\delta}|)^2 (1 + |\bar{\delta}|)^2} & \text{при } U_{\text{вых}} > 0; \\ \frac{\Delta \bar{U}^2 [(\bar{\delta}_{ot} - |\bar{\delta}|)^2 + (1 + |\bar{\delta}|)^2]}{(\bar{\delta}_{ot} - |\bar{\delta}|)^2 (1 + |\bar{\delta}|)^2} & \text{при } U_{\text{вых}} < 0. \end{cases} \quad (6)$$

Выражение для определения суммарной силы, развиваемой как преобразователем перемещения, так и преобразователем силы, имеет вид:

$$F_s^y = \frac{0,15 n \varepsilon \varepsilon_0 S U_{\text{оп}}^2}{\delta_0^2} \times \left[ \frac{(\bar{\delta}_{ot} - \bar{\delta})^2 + (1 - \bar{\delta})^2}{(1 - \bar{\delta})^2 (\bar{\delta}_{ot} - \bar{\delta})^2} - \frac{(1 + \bar{\delta})^2 + (\bar{\delta}_{ot} + \bar{\delta})^2}{(1 + \bar{\delta})^2 (\bar{\delta}_{ot} + \bar{\delta})^2} \right] + \frac{0,35 n \varepsilon \varepsilon_0 S U_{\text{оп}}^2}{\delta_0^2} F_{\text{ос}(R)}^y. \quad (7)$$

Для схем, приведенных на рис. 4, 5, важным моментом является определение коэффициента передачи цепи обратной связи.

Для схемы на рис. 4 коэффициент передачи обратной связи определим исходя из требований к колебательности системы и значению перерегулирования, которое на основании моделирования равно 1,5.

Для схемы на рис. 5 на основании анализа статической силовой характеристики получено, что статический коэффициент передачи, обеспечивающий нелинейность характеристики на уровне 0,15 %, имеет значение 0,546. Для расчета коэффициента передачи в динамике воспользуемся формулой [2]

$$k_{\text{ос}}^{\text{din}} = \frac{k_N k_{\text{ос}}^{\text{stat}}}{1 - \frac{2\tau_0}{T}} \left[ \frac{k_{\text{ос}}^{\text{stat}}}{2e^{-\lambda_0 \tau_0} \text{sh}(\Delta \lambda \tau_0)} + \frac{\tau_0}{T} \right], \quad (8)$$

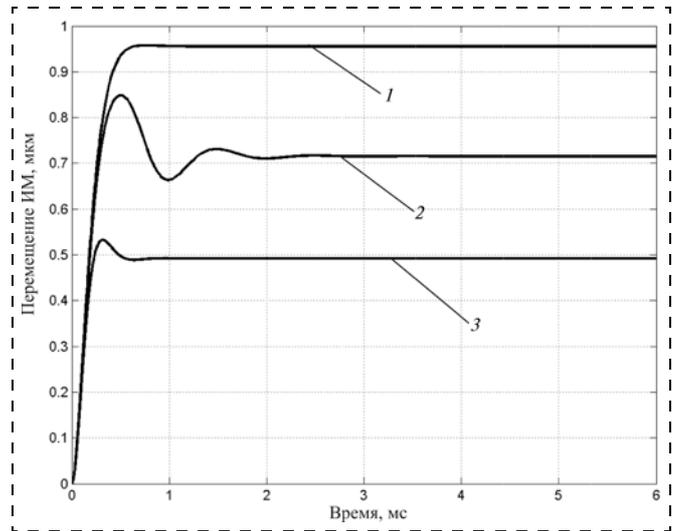


Рис. 7. Перемещение ИМ при действии постоянного ускорения 10g:

1 — МА прямого измерения; 2 — МА компенсационного измерения (схема рис. 4); 3 — МА компенсационного измерения (схема рис. 5)

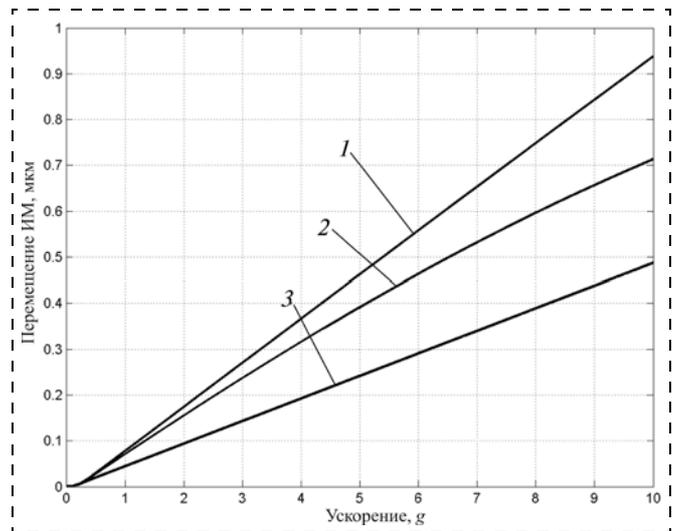


Рис. 8. Перемещение ИМ МА при действии линейно меняющегося ускорения от 0 до 10g:

1 — МА прямого измерения; 2 — МА компенсационного измерения (схема рис. 4); 3 — МА компенсационного измерения (схема рис. 5)

где  $k_N = (1,3...1,4)$  — поправочный коэффициент;  $k_{\text{ос}}^{\text{stat}}$  — относительный статический коэффициент передачи;  $T$  — период частоты генератора опорного сигнала;  $\lambda_0 = \frac{1}{RC_0}$  ( $R$  — добавочное сопротивление преобразователя,  $C_0$  — начальная емкость преобразователя при перемещении, равно нулю);  $\tau_0$  — длительность импульса  $U_c$ ,  $\Delta \lambda$  — максимальное изменение частоты преобразователя, вызванное перемещением ИМ.

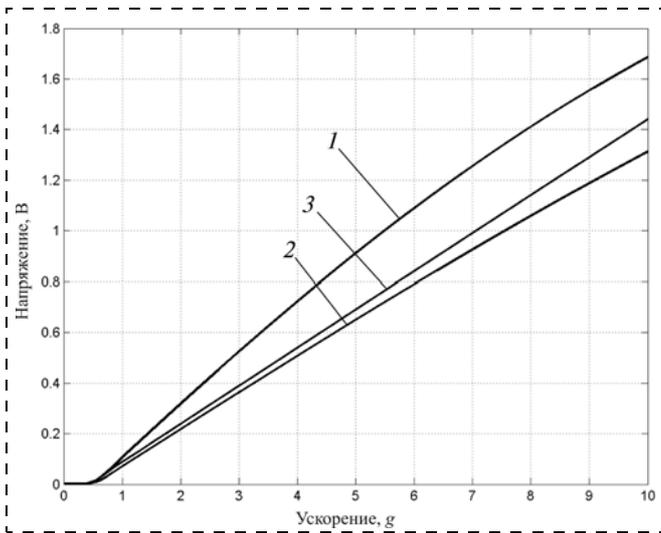


Рис. 9. Изменение напряжения на выходе МА при действии линейно меняющегося ускорения от 0 до 10g:

1 — МА прямого измерения; 2 — МА компенсационного измерения (схема рис. 4); 3 — МА компенсационного измерения (схема рис. 5)

Таблица 1  
Параметры электронных схем управления МА

Параметр	Схемы МА		
	Рис. 3	Рис. 4	Рис. 5
Частота генератора опорного сигнала, кГц	350 000	400 000	50 000
Амплитуда, В	5	5	5
Частота синхроимпульсов, Гц	350 000	400 000	100 000
Длительность, мкс	—	—	2
Коэффициент усиления цепи ОС	—	0,25	2,148
Полоса пропускания фильтра, рад/с	1000	1000	1000
Порядок фильтра, структура	3, Баттерворта	3, Баттерворта	3, Баттерворта

В результате расчета получено, что при имеющихся параметрах преобразователя значение коэффициента передачи равно 2,148.

Параметры электронной схемы управления, обеспечивающие работоспособность МА, приведены в табл. 1.

На рис. 7—9 представлены результаты моделирования.

## Выводы

Введение жесткой ОС (рис. 7—9) позволяет уменьшить амплитуду перемещения ИМ и, следовательно, расширить диапазон измеряемых уско-

Результаты моделирования

Параметр	Схемы МА		
	Рис. 3	Рис. 4	Рис. 5
Время переходного процесса, мс	Менее 1	Не более 2,5	Не более 1
Значение перерегулирования, %	—	18	Не более 5
Амплитуда перемещения при 10g, мкм	~0,96	~0,715	~0,5
Коэффициент передачи, мВ/g*	132	170	142
Нелинейность характеристики, %	Менее 0,2	Более 3	Менее 0,2

\* Без учета падения напряжения при передаче сигнала с микроструктуры на плату электроники и обратно, и без учета других факторов, сказывающихся на уменьшении коэффициента передачи.

рений. Время выхода на режим и значения перерегулирования в приборе с ОС, построенной по схеме рис. 4, больше, чем в схеме рис. 5. Для обеспечения допустимого уровня нелинейности выходной характеристики необходимо использовать схему управления, при которой напряжения различной амплитуды прикладываются к обоим плечам преобразователя силы. Это приведет к уменьшению эффективности работы обратной связи (см. рис. 7), но значительно уменьшит нелинейность выходной характеристики прибора. В табл. 2 приведены параметры, полученные в процессе моделирования.

На основании параметров, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод, что схема рис. 5 является более приемлемой при разработке и модернизации МА, потому что по сравнению с МА по схеме рис. 3 позволяет расширить диапазон измеряемых ускорений в 1,5—1,9 раза и увеличить коэффициент передачи на 8 % и по сравнению со схемой рис. 4 обеспечивает малую нелинейность выходной характеристики.

*Работа выполнена при поддержке гранта губернатора Тульской области в сфере науки и техники, свидетельство № 19-2006.*

## Список литературы

1. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. — М.: Машиностроение, 2007. — 400 с.
2. **Лихошерст В. В., Распопов В. Я.** Контур жесткой обратной связи в микромеханических приборах и расчет его параметров // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 4. С. 30—33.

УДК 620.193./197 + 621.52

Е. А. Деулин, д-р техн. наук, проф.,  
МВТУ им. Н. Э. Баумана

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ ГАЗОВ О МАТЕРИАЛ ТРУБЫ КАК ПРИЧИНЫ "ВОДОРОДНОЙ БОЛЕЗНИ" МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

*Автором теоретически предсказано и экспериментально доказано, что процесс взаимодействия микро-частиц, содержащихся в потоке транспортируемого газа, со стенками газопровода подобен процессу "сухого трения" твердых поверхностей и увеличивает в 10–300 раз (!) концентрацию водорода, обычно содержащегося в металле трубопроводов. Согласно теории аварийные разрушения магистральных трубопроводов возникают в результате процесса физически стимулированного газообмена на критических участках поверхностей этих трубопроводов. Распределение концентрации атомов водорода и ее изменение исследовалось с помощью установки ВИМС-анализа САМЕСА-4f.*

### Введение

Целью работы являлось исследование процесса "наводороживания" металлических (в основном стальных) труб магистральных газопроводов в результате проникновения в материал трубы водорода, вызывающего в дальнейшем коррозионное растрескивание под напряжением" стенок трубы и ее усталостное или механическое разрушение. Представлено физико-техническое обоснование и описана теоретическая модель этого процесса. Показано, что причинами сокращения долговечности элементов магистральных трубопроводов являются:

- изменения структуры внутренней поверхности трубопровода в критических областях (например, в зоне сварных швов) трубопроводов, благоприятствующие процессу наводороживания;
- сорбция молекул воды, водорода, дейтерия и других газов на внутренних поверхностях трубопроводов, их растворение и диффузия в металле трубопроводов с дальнейшим (очень малозаметным и медленным) процессом ухудшения свойств металла;

- постепенное развитие процесса наводороживания (т. н. "водородной болезни") металла трубопровода при течении газов в трубе в результате трения потока газов о внутреннюю поверхность трубы.

### 1. Теоретические основы механостимулированной диффузии водорода в материалах пары трения и их ожидаемый результат

Механостимулированная диффузия водорода в металлах пары трения — процесс растворения водорода, сорбированного на поверхностях контактирующих поверхностей, вглубь контактирующих материалов, впервые теоретически был предсказан в 1997 г. [1] и только в 1998 г. проверен и экспериментально подтвержден автором и Р. А. Невшупой [2], которыми было проведено исследование предсказанного Е. А. Деулиным процесса усиленной диффузии водорода (или дейтерия) в материалы контактирующей пары. По причинам своей продолжительности, а также большого числа факторов, влияющих на ход процесса, процесс взаимодействия этих газов с твердым телом не изучен до конца. На молекулярном уровне предсказанный [1] процесс можно представить состоящим из последовательно чередующихся стадий, повторяющихся при каждом цикле контактного взаимодействия, как это показано на рис. 1, где в виде последовательных диаграмм изменения температур (см. столбец диаграмм слева) и изменения молекулярной концентрации (см. столбец справа) представлены этапы этих процессов, происходящих при контактном взаимодействии. Исходная концентрация  $C_0$  газов, растворенных в конструкционных материалах (которая обычно достаточно велика), составляет, например, для системы "H<sub>2</sub> — сталь 12X18H10T"  $C_0 = C_H = 4 \cdot 10^4$  Па (или в других единицах  $C_H = 5 \cdot 10^{20}$  ат/см<sup>3</sup>) [3]. Исходная концентрация  $C_0$  газов, сорбированных на контактирующих поверхностях, зависит от температуры поверхности  $T$ , остаточного давления  $P$ , и в простейшем виде определяется уравнением Ленгмюра в виде коэффициента заполнения поверхности сорбированным газом (или "коэффициента покрытия")  $\theta$  [4]:

$$\theta = \frac{bP}{1 + bP}, \quad (1)$$

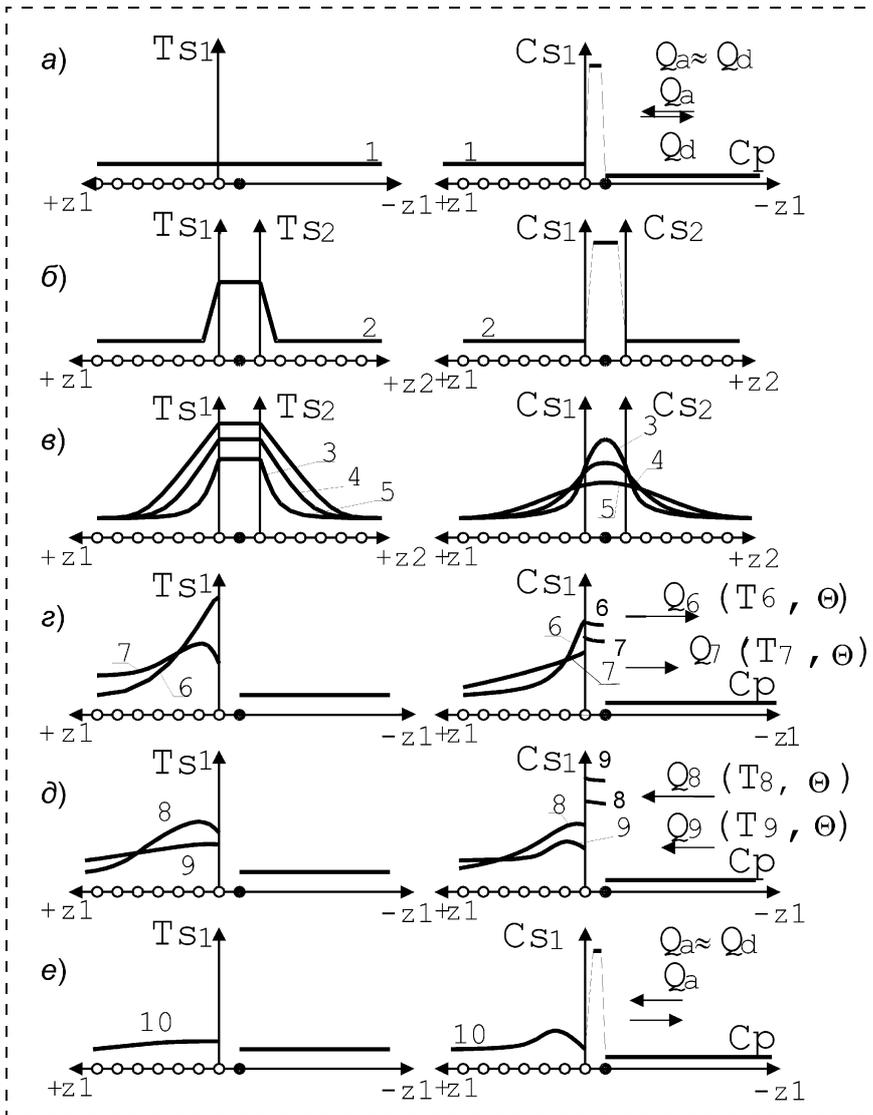


Рис. 1. Эпюры распределения температур (левый столбец) и объемных концентраций газа в системе "газ—твердое тело" (правый столбец) при контактном взаимодействии твердых тел:

$T_{S1}, T_{S2}, C_{S1}, C_{S2}$  — температуры и концентрации газа у поверхностей контактирующих твердых тел № 1 и 2 соответственно;  $z_1, z_2$  — расстояния от поверхностей вглубь контактирующих тел;  $Q_i$  —  $i$ -й удельный поток газа сорбируемого ( $Q_{ad}$ ) или десорбируемого ( $Q_{di}$ ) на поверхности; нумерация эпюр (параметров  $T_{S1}, T_{S2}, C_{S1}, C_{S2}$  (№ 1—10)) указана в порядке их чередования в процессе трения

где  $b = \frac{\alpha \tau_s}{N_0 \sqrt{2\pi m k T}}$ ;  $P$  — остаточное давление газа

над поверхностью;  $\alpha$  — коэффициент прилипания;  $\tau_s$  — время сорбции, с;  $N_0$  — концентрация адсорбционных центров на поверхности,  $m^{-2}$ ;  $m$  — молекулярная масса газа,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж · К<sup>-1</sup> — постоянная Больцмана;  $T$  — температура сорбции (температура поверхности), К.

На эпюре 1, рис. 1, а, справа схематично показана ожидаемая эпюра распределения объемных концентраций газа в системе "газ — твердое тело" перед началом контактирования. Так, характерная концентрация водорода, "естественно" растворенного в коррозионно-стойкой стали, составляет  $C_H = 5 \cdot 10^{20}$  ат/см<sup>3</sup> [3], в то время как расчетная [5]

концентрация водорода в его первом сорбированном на поверхности монослое составляет  $C_H = 3 \cdot 10^{28}$  ат/см<sup>3</sup>.

На эпюре 2 (также справа) схематично показана теоретически ожидаемая эпюра распределения объемной концентрации газа, "зажатого" (точнее квазирастворенного) между контактирующими поверхностями твердых тел.

На эпюре 2 (слева) схематично показана теоретически ожидаемая эпюра распределения температур в зоне между контактирующими поверхностями твердых тел. Высокая температура газа, "зажатого" (точнее механически сорбированного в результате принудительной сорбции) между контактирующих твердых поверхностей, объясняется выделением энергии сорбции, являющейся, как известно, экзотермическим процессом.

Высокая температура газа, зажатого (или квазирастворенного) между контактирующих поверхностей твердых тел, и очень высокий градиент концентрации  $dC_H/dz$ , где  $dC_H = (3 \cdot 10^{28} - 5 \cdot 10^{20})$  ат · см<sup>-3</sup> сорбированных молекул газа (в нашем примере  $dC/dz > 10^{13}$  Па/м), создают условия для роста потока газа, диффундирующего вглубь материала контактирующих твердых тел.

На эпюре рис. 1, б слева показано распределение температур ( $T_{S1}, T_{S2}$ ), кривая 2, в момент начала контактирования. Теплота, выделяющаяся в результате трения (у нас в результате принудительной сорбции), нагревает

молекулы газа, зажатые в пространстве между контактирующими поверхностями ("Flash temperature", которая, по оценке И. В. Крагельского, может превышать 130 °С). Предварительно "естественно" сорбированный [4] на поверхностях газ, оказавшийся после контактирования в "квазирастворенном" состоянии, образует громадный градиент объемной концентрации по нормали к контактирующим поверхностям (эпюра 2, рис. 1, б, справа), в нашем примере  $dC/dz > 10^{13}$  Па/м. В процессе контактирования нанопервохностей они продолжают нагреваться, при этом тепловой фронт движется вглубь материалов контактирующей пары вдоль осей  $z_1, z_2$  в приповерхностные слои, в соответствии с эпюрами распределения температуры 3, 4, 5, слева. Большой градиент концентрации "ква-

зирстворенного газа" в зоне контакта и высокая температура у поверхности создают условия для роста потока газа, диффундирующего вглубь твердого тела (эпюры 3, 4, 5, справа).

Окончание процесса контактирования (рис. 1, *з*) характеризуется, с одной стороны, высокой температурой поверхности, вышедшей из контакта (рис. 1, *з* слева, кривая б), а с другой стороны, — высокой концентрацией газа у поверхности, еще не успевшего продиффундировать вглубь твердого тела, вышедшего из контакта (эпюра б, справа), что, согласно уравнению (1), смещает баланс системы в сторону уменьшения количества газа  $\theta$ , сорбированного на поверхности. При этом доминировать начинает процесс десорбции газа  $Q_6$ , десорбирующего с поверхности, мгновенно вышедшей из контакта при трении. По мере охлаждения поверхности (эпюра 7 слева) и уменьшения десорбции поток газовой выделенной уменьшается ( $Q_7$ ), система "поверхность—сорбат", опять же мгновенно, при ее дальнейшем охлаждении проходит через равновесное состояние (см. эпюры  $T_{S1}$  8, 9, слева) и начинает сорбировать газ (потоки  $Q_8$  и  $Q_9$ ) до тех пор, пока вновь не установится соответствие (равновесие) между увеличивающимся коэффициентом покрытия поверхности сорбатом  $\theta$  и температурой поверхности  $T_{S1}$ . Увеличение показателя  $\theta$  происходит также за счет обратной диффузии газа из приповерхностных слоев, где образовалась максимальная концентрация растворенного газа (эпюры 7, 8, 9 справа). Перед началом следующего цикла контактирования, (рис. 1, *е*) распределение температур в системе "поверхность — сорбат" возвращается практически к исходному состоянию, а характерная волна в распределении концентрации растворенного газа (кривая 10, справа) характеризуется количеством газа, принудительно "закачанное" в приповерхностный объем твердого тела в результате трения. Таким образом, в результате сделанного анализа мы приходим к выводу о том, что естественно сорбированный на поверхностях газ при трении должен закачиваться в приповерхностные слои пар трения.

### 1.1. Первые экспериментальные результаты исследования процесса механостимулированной диффузии

Основной задачей проведения первых экспериментов [2, 6] представленной выше теории [1] являлось сравнение распределения концентраций  $D_2$  и  $H_2$  в образцах из подшипниковой стали до и после процесса трения, в атмосфере, содержащей малое давление (менее  $10^{-1}$  Па) этих газов. Следует заметить, что давление этих газов, как компонентов газового потока, транспортируемого внутри магистральных трубопроводов, автором не изучено, хотя представленные далее результаты указы-

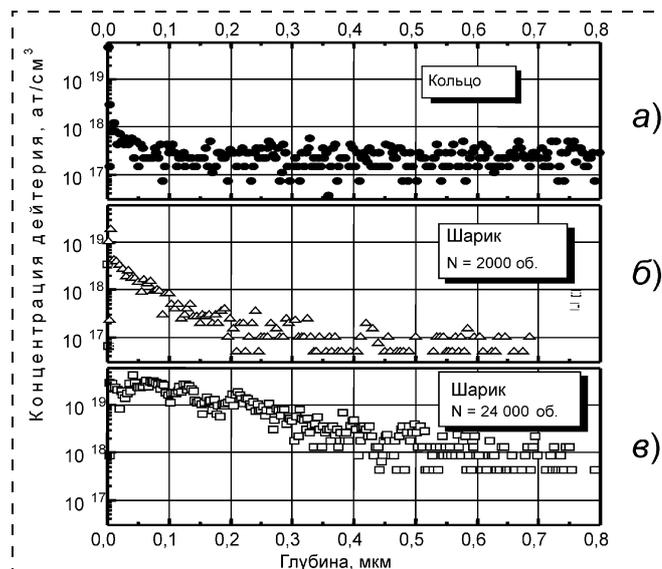


Рис. 2. Анализ распределения концентраций дейтерия в шарике подшипника, работавшего под нагрузкой:

*а* — верхний график, базовый, для не работавшей поверхности кольца; *б* — средний график — после наработки  $N = 2000$  об.; *в* — нижний график для шарика, работавшего под нагрузкой,  $N = 24\,000$  об

вают на значительное влияние водорода, содержащегося в транспортируемом потоке газа.

В первом эксперименте [2] после напуска дейтерия в вакуумную камеру до достижения заданного давления  $P_D = 5 \cdot 10^{-1}$  Па включался привод исследуемого подшипника, скорость вращения которого составляла  $n = 196$  об/мин, а приведенная нагрузка на подшипник составляла  $F = 240$  Н (нагрузка на один шарик  $F_z = 34,3$  Н). Результаты анализа газосодержания не работавшей базовой поверхности кольца подшипника (рис. 2, верхний график) показывают, что характер кривой не имеет экстремума, а наибольшая концентрация растворенного газа находится непосредственно на поверхности, что позволяет говорить о малой скорости "естественной" диффузии дейтерия внутрь твердого тела. Анализ распределения концентрации дейтерия в шарике, работавшем под нагрузкой, полученной после наработки подшипника, равной  $N_2 = 2000$  об., показывает, что наибольшая концентрация дейтерия (рис. 2, средняя диаграмма), составила  $C_{\max 2} = 5 \cdot 10^{18}$  ат·см $^{-3}$  на глубине  $X_2 \approx 0,03$  мкм при общей глубине проникновения фронта диффузии  $X = 0,2$  мкм. Анализ распределения концентраций дейтерия в шарике, работавшем под нагрузкой, полученной после наработки  $N_1 = 24\,000$  об (рис. 2, нижняя диаграмма), показывает, что имеет место распределение концентрации растворенного газа, подобное по значению и форме распределению концентрации, представленному в теоретической модели на рис. 1

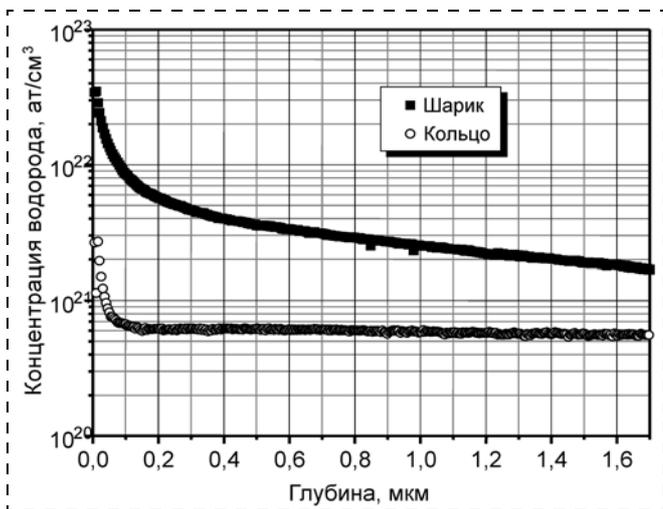


Рис. 3. Анализ распределения концентраций водорода в элементах шарикоподшипника после наработки  $N = 2000$  об: нижний график — базовый, для не работавшей поверхности кольца, верхний график — для шарика, работавшего под нагрузкой

(см. кривую 10, справа). Наибольшая концентрация дейтерия для рассматриваемого случая составила  $C_{\max 2} = 5 \cdot 10^{18}$  ат·см<sup>-3</sup> на глубине  $X_2 \approx 0,2$  мкм при общей глубине проникновения фронта диффузии  $X = 0,5$  мкм.

Во втором эксперименте [6] исследовалось механически стимулированное растворение водорода, содержащегося в естественной земной атмосфере (в которой, как известно, парциальное давление водорода составляет  $P_{H_2} = 5 \cdot 10^{-2}$  Па). Результаты второго эксперимента представлены на рис. 3.

Сопоставление распределения концентрации уровней естественно растворенного водорода  $C_H = 4 \cdot 10^{20}$  ат·см<sup>-3</sup> (рис. 3, нижняя кривая) с уровнем естественно растворенного дейтерия  $D$   $C_D = 2 \cdot 10^{17}$  ат·см<sup>-3</sup> (см. рис. 2 верхняя кривая) указывает на соответствие указанных концентраций парциальным давлениям этих газов в естественной атмосфере. В то же время результаты второго эксперимента (рис. 3, верхняя кривая) показывают, что распределение концентрации водорода в результате механостимулированной диффузии имеет такой же характер распределения, как и распределение концентрации дейтерия, при этом наибольшая концентрация растворенного водорода  $C_{H_{\max}} = 4 \cdot 10^{22}$  ат·см<sup>-3</sup> находится на глубине проникновения  $0,1$  мкм при общей глубине фронта

диффузии  $X > 1,7$  мкм, что близко к показателям дейтерия. Представленные результаты убедительно доказывают наличие процесса механостимулированной диффузии водорода и дейтерия в материал пары трения при работе этой пары в среде остаточной атмосферы, даже при очень малых парциальных давлениях (менее  $10^{-1}$  Па), как водорода, так и дейтерия. Эксперименты показали, что концентрация механостимулированного растворенного водорода возрастает не менее чем в 100 раз (от  $C_H = 4 \cdot 10^{20}$  ат·см<sup>-3</sup> до  $C_{H_{\max}} = 4 \cdot 10^{22}$  ат·см<sup>-3</sup>), а концентрация растворенного механостимулированного дейтерия возрастает не менее чем в 25 раз (от  $C_D = 2 \cdot 10^{17}$  ат·см<sup>-3</sup> до  $C_{D_{\max 2}} = 5 \cdot 10^{18}$  ат·см<sup>-3</sup>).

## 2. Наводораживание металла трубопровода при трении газового потока о трубу

Автором было выдвинуто предположение о том, что наводораживание металла трубопровода при течении потока газа внутри трубопровода может происходить по той же схеме, которая была представлена на рис. 1, и которая имеет место при так называемом "сухом" [7] трении металлических поверхностей друг о друга.

Автор считает сделанное предположение справедливым, учитывая, что течение газа по трубопроводу сопровождается контактными взаимодействиями на наноуровне пылинок и молекул газа со стенкой трубы. Как представлено на рис. 4, при этом общая физическая картина нановзаимодействий аналогична описанным и представленным на рис. 1 процессам и также сопровождается растворением атомов водорода и дейтерия, касающихся металла трубопроводов и сорбируемых на стенках трубы при движении потока газов внутри трубы. Для экспериментальной проверки высказанной

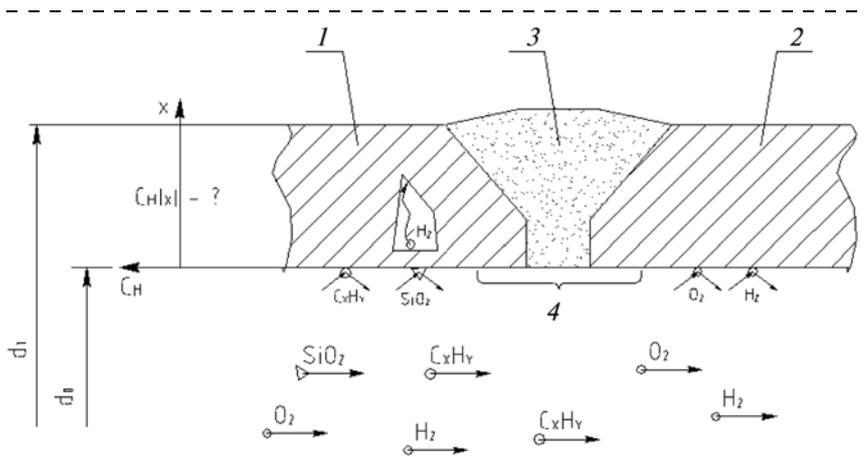


Рис. 4. Схема взаимодействия молекул и микрочастиц пыли (условно обозначены фигурками) газового потока с внутренней стенкой газопровода в околосварной зоне трубопровода:

1, 2 — звенья трубопровода; 3 — сварной шов; 4 — околосварная зона;  $d_0, d_1$  — внутренний и наружный диаметры трубопровода соответственно;  $X$  — расстояние, проходящее диффундирующими молекулами водорода от места растворения — внутренней поверхности стенки трубы

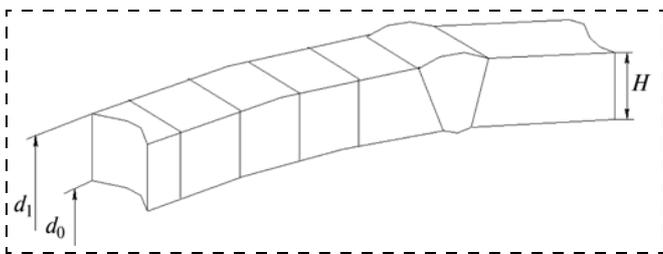


Рис. 5. Схема поперечной разделки "составляющей части" исходного образца на "доли" (направления вертикальной поперечной резки показаны тонкими линиями), толщина исходного образца  $H = 20$  мм

Таблица 1

Размеры стандартных труб по ГОСТ 20295—85

$d_1$ , мм	530	630	720	820	1020	1420	1620
$d_0$ , мм	520	620	700	800	1000	1380	1580
$L$ , мм	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000

автором гипотезы из околосварной зоны трубы магистрального трубопровода, отслужившего 20 лет, был вырезан образец, схема которого представлена на рис. 5.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований процесса наводороживания металла трубопроводов в результате взаимодействия потока газа с транспортной трубой магистрального трубопровода. По мнению специалистов [8], околосварная зона трубопроводов является наиболее опасной с точки зрения вероятности коррозионного растрескивания и разрушения. Типовые размеры стандартных труб магистральных трубопроводов приведены в табл. 1, где  $L$  — длина трубы, равная 10 м.

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что диаметр больших труб близок к человеческому росту, а толщина стенки трубы (параметр  $X$ , рис. 4) достигает 20 мм. Для экспериментальной проверки высказанной гипотезы из околосварной зоны трубы магистрального трубопровода, отслужившего 20 лет, был вырезан испытуемый образец, представленный на рис. 5. Этот образец был вырезан в лаборатории РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина из околосварной зоны трубы магистрального трубопровода, отслужившего 20 лет. Околосварная зона была выбрана как потенциально наиболее опасная с позиций "наводороживания". Схема попереч-

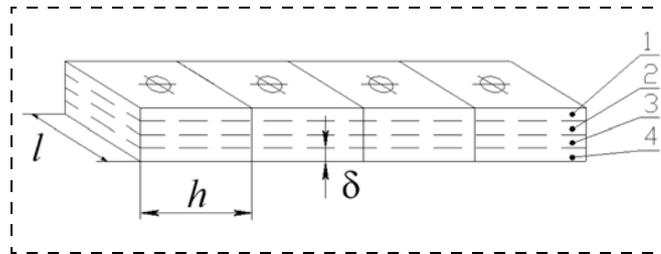


Рис. 6. Схема поперечной разделки "составляющей части" образца на "доли" (направления вертикальной поперечной резки показаны тонкими линиями), схема полойной разделки "долей" на четыре слоя "окончательных" образцов показана горизонтальными штриховыми линиями. Размеры "окончательного" образца: длина  $l = 24$  мм, ширина  $p = 10$  мм, толщина  $\delta = 3$  мм

ной разделки этого образца, названного "исходным", на "составляющие части" также видна на рис. 5. Марка стали образца (трубы) и ее состав приведены в табл. 2.

## 2.1. Экспериментальное исследование процесса наводороживания при течении газа в трубопроводе

Схема поперечной разделки "составляющей части" образца на "доли" и относительное расположение "окончательных" образцов в "исходном" образце и относительное расположение их поверхностей, относительно которых проводился анализ методом ВИМС (вторичной ионной масс-спектрографии), показаны на рис. 6. Нумерация образцов и их поверхностей идет "сверху вниз", т. е. от наружной поверхности трубы к внутренней.

## 2.2. Методика выполнения экспериментальных исследований процесса наводороживания магистрального трубопровода

Как следует из задач исследования, методика была выбрана такой, чтобы обеспечить возможность получения результатов точного водородосодержания в материале исследуемой трубы на различных, строго определенных глубинах проникновения (диффузии) газа (водорода), отсчитываемых от внутренней поверхности трубы. Для химического анализа и определения концентрации водорода, растворенного на заданном расстоянии  $X$  от внутренней поверхности трубы, был выбран метод вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС-анализ). Особенность метода состоит в том, что анализ

Таблица 2

Химический состав стали испытанного образца (трубы)

Марка стали или тип	Содержание элементов, %							
	C	Mn	Si	Nb	V	S	P	Mo
10Г2ФБ	0,09—0,12	1,55—1,75 Не более	0,15—0,35	0,02—0,04	0,09—0,12	0,006	Не более 0,020	—

химического состава исследуемого материала и атомарной концентрации растворенных в нем газов проводится тонким ионным пучком (диаметром 0,1...0,2 мкм), постепенно создающим в исследуемом материале цилиндрическую зону ("шахту") глубиной  $X$  (от 0,1 до 15 мкм) для анализа химического состава материала на этой глубине. Реальная особенность использованной ВИМС-установки состояла в том, что технически доступная глубина анализа (параметр  $X$ ) находилась в диапазоне 1...10 мкм, занимая при этом 0,5...8 ч рабочего времени. Другой особенностью ВИМС-анализа является то, что, по определению, он является качественным методом. С учетом вышеуказанных факторов были сформулированы основные позиции методики эксперимента.

1. Разделка исходного образца трубы на "окончательные" образцы должна учитывать разные "масштабные" факторы ВИМС-метода ( $X_1 = 1...10$  мкм) и диапазона зоны исследования трубопровода ( $X_2 = 1...20$  мм).

2. Ориентация окончательных образцов в исходном должна учитывать ориентацию результатов исследования (векторов отсчета параметров  $X_1$  и  $X_2$ ).

3. Геометрия и чистота поверхности окончательных образцов должна соответствовать технологическим требованиям ВИМС-анализа.

4. Для получения при эксперименте количественных показателей (вместо качественных) с помощью ВИМС-анализа было необходимо провести "калибровку" используемой установки ВИМС-анализа с помощью заданной имплантации ионов водорода (дейтерия) в одном из исследуемых образцов.

Как видно из рис. 4—6, схема разделки образца, изготовленного из отслужившей свой срок трубы газопровода, была тщательно методически подготовлена. При этом учитывалось, что глубина проникновения (диффузии) водорода вдоль оси  $X$  (см. рис. 4), как показывает уравнение нестационарной диффузии (второй закон Фика), очень медленно меняется со временем:

$$C_0(x, t) = (C_{\text{surfH}} - C_i) \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) + C_i \quad (2)$$

где  $C_0$  — концентрация атомов диффундирующего газа (водорода) на глубине  $x$  в момент времени  $t$ ;  $C_{\text{surfH}}$  — концентрация атомов водорода в первом монослое сорбата;  $C_i$  — начальная концентрация водорода в объеме металла;  $D$  — коэффициент диффузии;  $x$  — расстояние от поверхности вглубь металла;  $t$  — время.

Для различных остаточных давлений с помощью расчета по формуле (2) получена картина изменения кривых распределения концентрации водорода по глубине со временем. Пример диаграмм

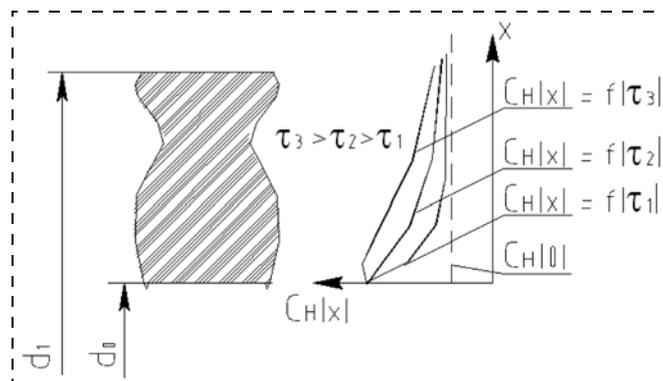


Рис. 7. Расчетные кривые изменения со временем ( $t_1 = 1$  мес.,  $t_2 = 1$  год,  $t_3 = 10$  лет) распределения концентраций водорода, растворенного в металле трубы по глубине  $X$ , начиная от внутренней поверхности трубы, рассчитанные по формуле (2)

мы расчетного распределения концентрации водорода  $C_H(x)$ , растворенного в стенке трубы по глубине  $X$  после 20 лет эксплуатации, представлен на рис. 7. Уровень концентрации  $C_H(0)$ , соответствующий исходной (базовой) концентрации водорода в материале трубы, показан штриховой линией.

Как видно из результатов расчета распределения концентрации водорода  $C_H(x)$ , растворенного в стенке трубы по глубине  $X$  после 20 лет эксплуатации, представленного на рис. 8, схема разделки образца трубы газопровода, представленная на рис. 4—6, была выбрана такой, чтобы обеспечить возможность получения результатов концентрации водорода в материале исследуемой трубы на различных, строго определенных глубинах  $X$  его проникновения в металл трубопровода, начиная от внутренней поверхности трубы. Штриховая линия соответствует сравнительной (базовой) концентрации водорода в материале трубы  $C_H(0)$ , заложенной при ее изготовлении, и концентрации водорода

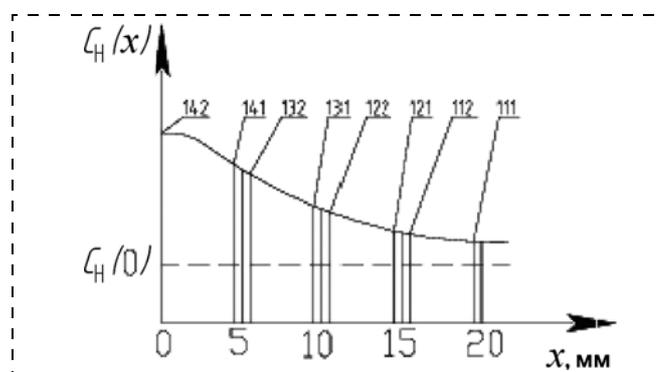


Рис. 8. Диаграмма расчетного распределения концентрации водорода  $C_H(x)$ , растворенного в стенке трубы по глубине  $X$  после 20 лет эксплуатации. Цифрами (соответствующими принятой автором относительной индексации образцов) показано расположение поверхностей образцов в соответствии с методически обоснованной схемой. Штриховая линия соответствует базовой концентрации водорода в металле трубы  $C_H(0)$

да у наружной поверхности трубы, не подвергавшейся процессу трения о нее потока транспортируемого газа.

### 2.3. Анализ результатов экспериментальных исследований процесса наводороживания металла магистрального трубопровода

Экспериментальная проверка рассчитанного распределения концентрации водорода по глубине  $X$  проводилась на установке ВИМС-анализа. Экспериментально полученные диаграммы распределения концентрации водорода  $C_H(x)$ , растворенного в различных образцах (в соответствии с принятой автором относительной индексацией), представлены на рис. 9.

Все полученные для различных образцов диаграммы (см. номера относительной индексации) для удобства их сопоставления и анализа собраны на одном графике, разделенном на левую и правую части в области  $X = 5$  мкм. Из представленных диаграмм видно, что левая ( $x < 5$  мкм) и правая ( $x > 5$  мкм) части всех диаграмм различны по характеру изменения концентрации. Левая часть всех диаграмм ( $x < 5$  мкм) характеризуется резким ростом (примерно в 100 раз!) концентрации растворенного водорода по мере приближения к поверхности (максимумы всех диаграмм соответствуют  $X = 0$ ). Правая часть тех же диаграмм характеризуется очень слабым убыванием концентрации растворенного водорода с увеличением глубины его диффузии  $X$ . Вид левой части графиков характеризуется резким ростом концентрации водорода, растворенного непосредственно у поверхности образцов, что согласно представляемой теории вызвано

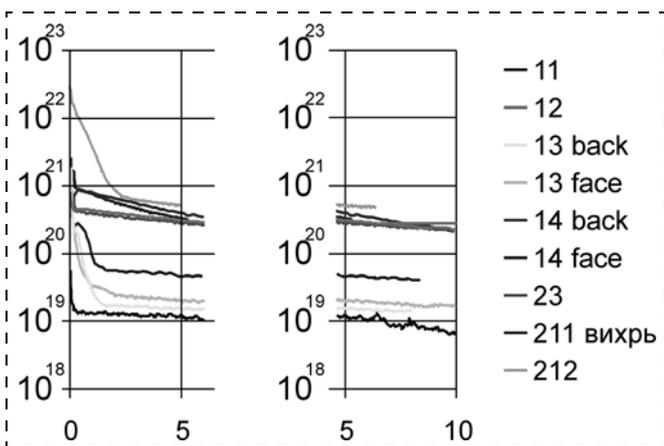


Рис. 9. Экспериментально полученные ВИМС-диаграммы распределения концентрации водорода  $C_H(x)$ , растворенного в стенке трубы на различных глубинах стенки трубы  $X$  после 20 лет эксплуатации. Видно, что максимально изученные с помощью ВИМС-анализа глубины  $X$  (отсчитываемые от поверхностей образцов) составляют около 10 мкм. Цифрами (соответствующими принятой автором индексации различных образцов и их расстоянию от внутренней поверхности трубы) определяется расположение поверхностей образцов в соответствии с принятой схемой. Для удобства сопоставления все диаграммы разделены на левую и правую части в области  $X = 5$  мкм

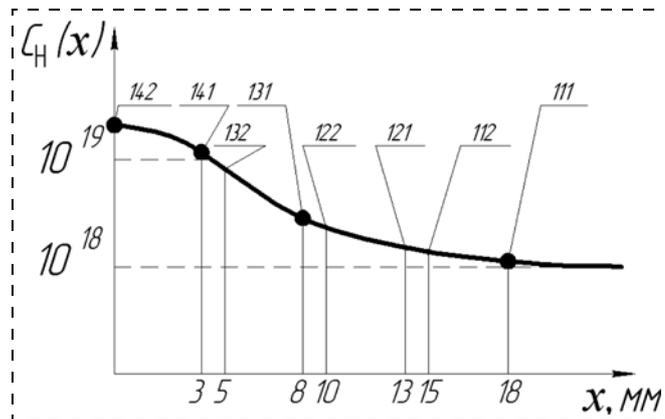


Рис. 10. Диаграмма сопоставления расчетной проверки (сплошная линия) процесса наводороживания с результатами экспериментальной проверки (жирные точки) распределения концентрации водорода  $C_H(x)$ , растворенного в стенке трубы на глубине  $X = 0,005...20$  мм после 20 лет эксплуатации. Цифры соответствуют индексации образцов, использованной автором. Результаты экспериментов получены на установке вторичной ионной масс-спектрометрии САМЕСА-4f

процессами механической обработки этих образцов (фрезерованием и полированием) в процессе их изготовления. Эти процессы можно рассматривать как варианты реализации механостимулированной диффузии, что было представлено в разд. 1.1 и иллюстрировано рис. 2 и 3. Мысль о единстве природы этих процессов хорошо подтверждается сравнением рис. 8 с диаграммами на рис. 2 и 3, где резкий рост концентрации водорода (дейтерия) также имеет место при  $x < 0,5$  мкм.

Диаграмма на рис. 10 позволяет сопоставить результаты расчетов (см. сплошную линию) процесса наводороживания по формуле (2) с результатами экспериментального исследования образцов газопроводов после их 20-летней эксплуатации (результаты экспериментального исследования, представленные на рис. 9, как жирные точки). Анализ результатов показывает, что теоретически описанный процесс вызывает значительное наводороживание металла трубопровода. Так, исходная концентрация водорода в материале трубы  $C_H(x) = 10^{18}$  ат·см<sup>-3</sup> на глубине  $X = 2$  мм за период эксплуатации увеличилась до уровня  $C_H = 3 \cdot 10^{20}$  ат·см<sup>-3</sup> (см. индекс 14), т. е. в 300 раз! Та же исходная концентрация на глубине  $X = 10$  мм увеличилась до уровня  $C_H = 2 \cdot 10^{19}$  ат·см<sup>-3</sup> (см. индекс 13), т. е. в 20 раз! Та же исходная концентрация на глубине  $X = 18$  мм увеличилась до уровня  $C_H = 8 \cdot 10^{18}$  ат·см<sup>-3</sup> (см. индекс 11), т. е. в 8 раз!

Таким образом, проведенные под руководством автора исследования убедительно показали, что процесс трения газа о стенку трубы вызывает значительное (в 10—300 раз!) увеличение наводорожи-

вания металла трубопровода на глубине металла трубопровода до 18 мм.

По мнению автора, причинами, ограничивавшими результаты исследований ведущих специалистов в данной области, являются:

- чрезвычайно малая скорость процесса, определяемая скоростью диффузии молекул водорода в металле;
- внешняя невидимость и трудноконтролируемость процесса известными машиностроителям методами;
- сложность и многофакторность физических явлений, определяющих данный процесс.

На базе выполненных под руководством автора исследований сформулированы задачи дальнейших работ, доступные для практической реализации.

1. Исследование и разработка процесса формирования защитной поверхностной структуры на внутренней части трубопроводов, обеспечивающей повышение долговечности магистральных трубопроводов.

2. Исследование и разработка технологического процесса формирования защитной поверхностной структуры, обеспечивающей повышение долговечности трубопроводов.

3. Разработка технической оснастки, обеспечивающей повышение долговечности магистральных трубопроводов, постоянно подвергаемых процессу трения потока газа о трубу.

## Выводы

1. Представленная теоретическая модель процесса "наводораживания" материала труб магистральных трубопроводов, раскрывающая одну из физических причин "водородной болезни" металла труб, позволяет разработать и физически обосновать метод защиты магистральных трубопроводов от разрушения.

2. Приведенное физическое обоснование процесса наводораживания металла трубопроводов как результата взаимодействия потока газа с материалом трубопровода подтверждается результатами экспериментальных исследований.

3. Доказано, что причинами сокращения долговечности труб магистральных трубопроводов являются следующие факторы:

- ухудшение структуры и защитных покрытий металла трубопроводов в области сварных швов;
- сорбирование воды, водорода и других транспортируемых газов на внутренней поверхности трубопроводов, их растворение в металле и ухудшение свойств металла труб;
- наводораживание ("водородная болезнь") металла трубопровода при течении газов в трубе, как результат трения потока этих газов о трубу.

## Список литературы

1. **Deulin E. A.** Exchange of gases at friction in vacuum // ECASIA '97. — John Wiley & sons, Nov. 1997. — P. 1170—1175.
2. **Deulin E. A., Nevshupa R. A.** Deuterium penetration into the bulk of a steel ball of a ball bearing due to its rotation in vacuum // Applied Surface Science. 1999. N 144—145. P. 283—286.
3. **Арчаков Ю. И.** Водородная коррозия стали. М.: Металлургия, 1985. 452 с.
4. **Дэшман С.** Научные основы вакуумной техники: Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 716 с.
5. **Handbook of Thin Film Technology** / Ed by L. I. Maissei and R. Gland / Mc. Graw Hill HOOK Company. 1970. VI. 668 p.
6. **Deulin E. A., Goncharov S. A., Konovalov V. V., Nevshoupa R. A.** Residual gases solution in bulk at friction // 9<sup>th</sup> Nordic Symposium on Tribology. = Parvoo (Finland), 2000. V. 3. P. 855—861.
7. **Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.** Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. 1525 с.
8. **Стеклов О. И.** Прочность сварных конструкций в агрессивных средах. — М.: Машиностроение, 1976. 200 с.

*Автор благодарит Министерство науки Российской Федерации за грант РНП2.1.1.13.77, академика РАН, проф. РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина Стеклова О. И. за финансовую и методическую помощь с экспериментальными образцами магистральных трубопроводов, а также своих коллег: д-ра техн. наук, проф. Михайлова В. П., канд. техн. наук Невшупу Р. А., канд. техн. наук Коновалова В. В. за выполнение сложных экспериментов, показавших новые для своего времени результаты, сотрудников ВНИИЭФ канд. техн. наук Трифонова А. Ю., Сарайкина В. В. за методически сложную экспериментальную работу на установке ВИМС-анализа САМЕСА-4f и кропотливую работу по обработке полученных результатов.*

**В. П. Михайлов**, д-р техн. наук,  
**И. Ю. Акимов**, **А. М. Базиненков**,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

## СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ И ЮСТИРОВКИ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА

*Современное технологическое и исследовательское оборудование предъявляет принципиально новые требования к существующим механизмам юстировки и виброизоляции. На кафедре МТ-11 МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана принципиально новая система полуактивной и активной виброизоляции магнитореологического типа, способная выполнять в едином модуле функции виброизоляции и юстировки одновременно. Установлено, что потенциальная точность юстировки с помощью устройств такого типа составляет несколько нанометров.*

### Введение

В настоящее время появляется большое количество исследовательского и технологического оборудования, в котором необходимо перемещать исполнительные механизмы с точностью на уровне микрометров, а в некоторых случаях и на уровне нанометров. В ряде случаев перемещения должны осуществляться по нескольким координатам за время 1...100 мс. Более 10 лет назад в мире появились первые адаптивные астрономические телескопы с составным главным зеркалом. Примером могут служить телескопы Вильяма Кека. Диаметр составного главного зеркала (СГЗ) составляет 10 м. Главное зеркало состоит из отдельных 84 сегментов — зеркал шестиугольной формы. Для позиционирования каждого элементарного сегмента по трем координатам с точностью 50 нм используются три однокоординатных механогидравлических привода.

В настоящее время в России создается проект сверхбольшого астрономического телескопа АСТ-25 [1] с составным главным зеркалом, состоящим из 612 элементарных зеркал. Точность совмещения зеркал должна составлять 50 нм и поддерживаться постоянной с учетом всех возмущающих воздействий (турбулентности атмосферы, вибрации фундамента и др.) с быстродействием 200 мс.

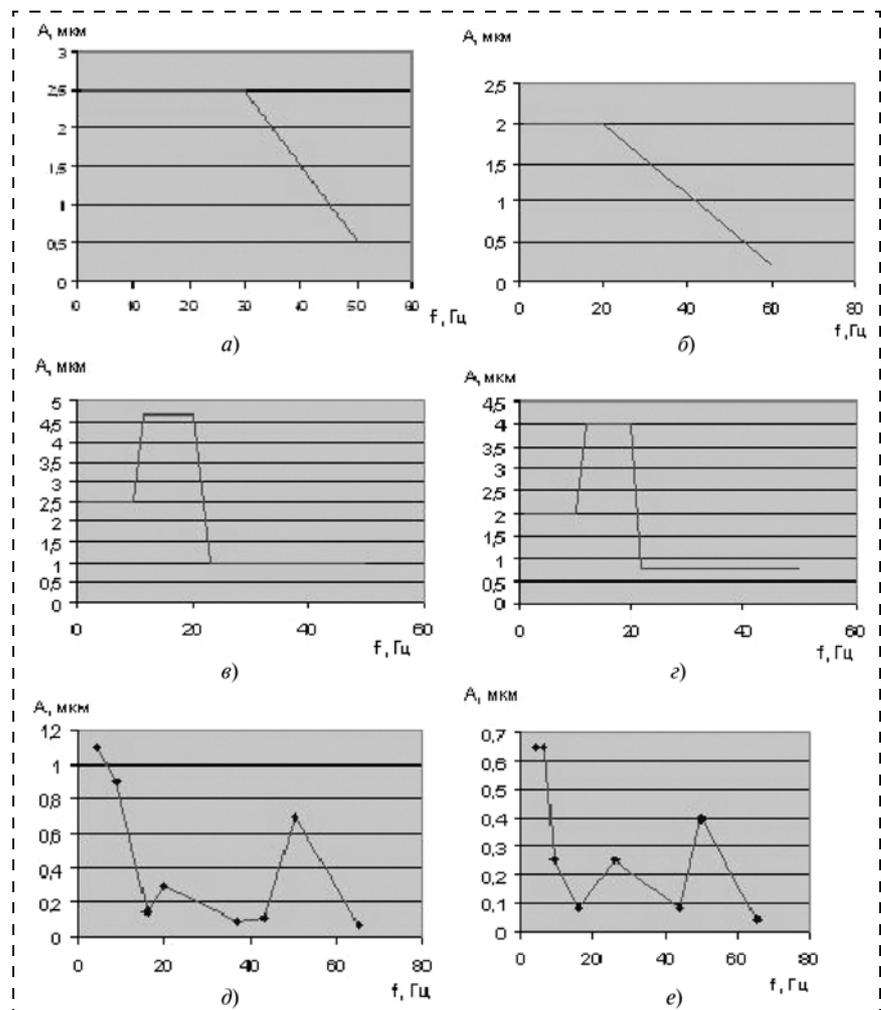
Сканирующие зондовые микроскопы (СТМ и АСМ) работают как при атмосферном давлении, так и в сверхвысоком вакууме (при давлении менее  $5 \cdot 10^{-8}$  Па). Точность позиционирования зонда относительно образца составляет 0,1 нм. В современных установках микролитографии погрешность совмещения шаблона с подложкой составляет не более 20 нм.

В оптоволоконных системах точность совмещения сердечника оптоволокна относительно источника излучения, например линзового лазера, по трем координатам составляет 20 нм.

Рассмотренные примеры позволили сформулировать ряд принципиально новых требований к механизмам линейных перемещений:

- диапазон линейных перемещений 0,1...10 мм;
- погрешность позиционирования кинематической цепи 0,1...50 мкм;
- быстродействие 10...200 мс;
- нагрузочная способность 1...1000 Н.

В работе [2] были проведены исследования частот и амплитуд колебаний межэтажных перекры-



**Рис. 1. Уровень колебаний пола в строительных сооружениях:**

*a, б — в цехах машиностроительных предприятий; в, г — в исследовательских лабораториях зданий (11-й этаж); д, е — в лабораториях сборки СВАО (2-й этаж); a, в, д — колебания в вертикальном направлении; б, г, е — колебания в горизонтальном направлении*

тий зданий на различной высоте (рис. 1). Так как требуемая точность совмещения зеркал телескопа, точность совмещения шаблона с подложкой в литографических установках составляет 20...50 нм, то необходимо обеспечить коэффициент виброизоляции в диапазоне 0,01...0,005.

Рассмотрим некоторые из ныне существующих механизмов нанопозиционирования. Для большинства пьезопроводов диапазон перемещений составляет всего лишь 100 мкм при погрешности позиционирования не более 0,1...1 нм. Нагрузочная способность таких механизмов составляет 10...500 Н.

Электромеханические приводы имеют довольно длинные многоэлементные кинематические цепи, что приводит к снижению их жесткости, кинематической и динамической точности.

Проблема может быть решена только за счет разработки принципиально новых научных идей и технических решений, например, с помощью применения магнитореологических устройств (МР-устройств), идея которых заключается в использовании среды, практически мгновенно меняющей при воздействии управляющего сигнала состояние в последовательности: "вязкое тело — пластичное тело — упругое тело". Разработанное магнитореологическое устройство впервые может быть использовано в качестве активной системы виброизоляции, т. е. оно может поддерживать виброскорость, виброускорение и амплитуду колебаний объекта в требуемом диапазоне. Это устройство параллельной кинематики с функциями юстировки и виброизоляции, реализованными в одном модуле.

#### Определение параметров регулирования активной виброизоляции

Виброзащита оборудования может осуществляться различными способами (рис. 2). Одним из методов является виброизоляция. Виброизоляция делится на пассивную, полуактивную и активную. В настоящее время в основном используются пассивные системы виброизоляции (массивные фундаменты, однокаскадные и двухкаскадные амортизаторы-пружины с собственной частотой около 10 Гц). Однако получение достаточно низких собственных частот (до 0,5—2 Гц) с помощью них затруднено вследствие недопустимого увеличения размеров и массы виброизолирующей системы. Коэффициент виброизоляции таких систем составляет  $\zeta = 0,1$ . Кроме того, уже при амплитудах колебаний около 0,3 мкм подобные виброизолирующие фундаменты не обеспечивают необходи-



Рис. 2. Методы виброзащиты оборудования

мого уменьшения амплитуды колебаний, что требует применения дополнительных виброгасящих систем. Вторым вариантом являются полуактивные системы: пневматические, гидравлические с регулируемым коэффициентом вязкостного трения. Регулировка этого параметра проводится автоматически в зависимости от внешних условий — виброускорения, виброскорости и амплитуды колебаний без измерения этих параметров.

Активные виброизолирующие системы благодаря полностью замкнутой системе управления способны поддерживать виброускорение и виброскорость колебаний и положение объекта в заданном диапазоне, что является необходимым в таких системах, как установки рентгенолитографии, адаптивная оптика. Таким образом, гашение амплитуды колебаний, виброскорости и виброускорений такими системами происходит значительно эффективнее. Разработанная нами в МГТУ им. Н. Э. Баумана гидравлическая система с магнитореологическим управлением позволяет регулировать основные параметры виброизоляции: динамическую вязкость рабочей жидкости  $\mu$  и объемный модуль упругости  $E$  и способна работать в режиме активной виброизоляции.

Основным элементом данной системы является магнитореологическая жидкость, практически мгновенно меняющая свою динамическую вязкость и объемный модуль упругости под действием внешнего магнитного поля. Магнитореологическая жидкость представляет собой суспензию, состоящую не менее чем из двух фаз: несущая среда (минеральные или синтетические масла), дисперсная среда (частицы карбонильного железа размером 1...10 мкм), поверхностно-активные вещества — ПАВ (олеиновая кислота). Для описания поведения МР-жидкости в присутствии магнитного поля

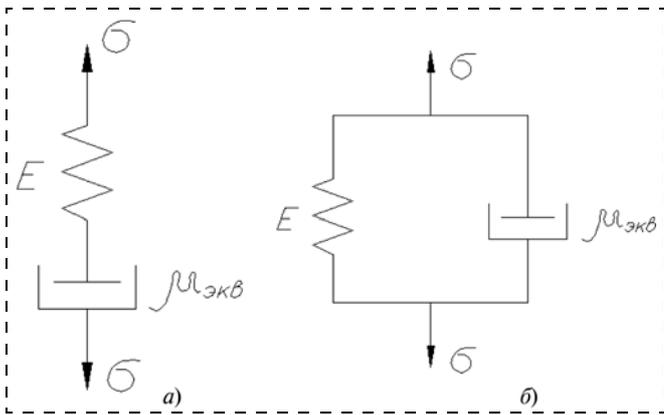


Рис. 3. Механические модели:  
а — Максвелла; б — Кельвина—Фогта

используются две механические модели: модель Максвелла и модель Кельвина—Фогта.

Модель Максвелла (рис. 3, а) представляет собой последовательное соединение упругого и вязкого элементов. Пружина с модулем упругости  $E$  сообщает магнитореологической жидкости свойства идеально упругого тела, элемент вязкостного трения с коэффициентом эквивалентной динамической вязкости  $\mu_{\text{экв}}$  — свойства ньютоновской жидкости. При быстром ступенчатом нагружении модель практически не деформируется, а возникающие малые деформации носят упругий характер, в результате чего она стремится восстановить свою первоначальную форму. При медленном нагружении вся деформация происходит за счет вязкого элемента. Данную модель можно описать дифференциальным уравнением

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\mu_{\text{экв}}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — относительная деформация модели;  $\sigma$  — напряжение, возникающее в реологической или другой вязкой среде;  $E$  — объемный модуль упругости МР-жидкости;  $\mu_{\text{экв}}$  — эквивалентная динамическая вязкость МР-жидкости [3].

Если  $\varepsilon = \text{const}$ , то происходит процесс релаксации напряжений. Тогда

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2)$$

где  $\tau = \mu_{\text{экв}}/E$  — время релаксации напряжения в реологической среде.

Из уравнения (2) видно, что при  $t \rightarrow \infty$   $\sigma \rightarrow 0$ , т. е. напряжения в модели полностью исчезают. При  $t \ll \tau$  (ступенчатое ударное воздействие)  $t/\tau \rightarrow 0$ , а  $\sigma \rightarrow \sigma_0$ , релаксация не успевает произойти, и начальное напряжение сохраняется в течение данного времени  $t$ .

Вторым частным случаем уравнения (1) является случай возникновения в модели постоянных на-

пряжений ( $\sigma = \text{const}$ ). При этом вся деформация модели происходит фактически за счет вязкого элемента (модель течет):

$$\sigma = \frac{\varepsilon \mu_{\text{экв}}}{t}. \quad (3)$$

Модель Кельвина—Фогта (рис. 3, б) представляет собой параллельное соединение упругого и вязкого элементов и позволяет рассчитать время развертывания цепочек частиц МР-жидкости под действием магнитного поля. Роль упругого элемента в этом случае выполняют цепочки частиц. Рассмотрим дифференциальное уравнение, описывающее процесс деформации этой модели:

$$\sigma = E\varepsilon + \mu_{\text{экв}} \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (4)$$

Если  $\sigma = 0$  — случай упругого восстановления тела после снятия нагрузки, то

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (5)$$

где  $\theta = \mu_{\text{экв}}/E$  — время запаздывания, характеризующее время развертывания цепочек частиц дисперсной фазы МР-жидкости.

Таким образом, регулируя такие параметры системы, как время релаксации напряжений  $\tau$  и время запаздывания  $\theta$  (время развертывания цепочек частиц дисперсной фазы), мы можем управлять быстродействием системы.

Разработанное нами магнитореологическое устройство способно выполнять как функции активной виброизоляции, так и функции привода с точностью позиционирования на уровне 20...50 нм. Основное отличие разработанного МР-модуля заключается в отсутствии пар внешнего трения (таких, как в стандартных гидравлических устройствах "поршень — цилиндр"). Единственными силами трения являются силы вязкостного трения между слоями МР-жидкости и упругие силы со стороны герметизирующих элементов.

### Экспериментальные исследования статической и динамической жесткости системы виброизоляции

В некоторых системах, таких как сверхбольшие астрономические адаптивные телескопы, невозможно разделить функции позиционирования и виброизоляции. Система должна работать в режиме реального времени, защищать оборудование от внешних возмущающих воздействий. Одним из вариантов такой системы позиционирования и виброизоляции является магнитореологический модуль — МР-модуль (рис. 4, см. третью сторону обложки), разработанный на кафедре МТ-11 МГТУ им. Н. Э. Баумана. Введем следующие обозначения. Модуль телескопа — магнитореологическое устройство (двигатель); система тяг; узел упругой подвески; система измерения и управления; эле-



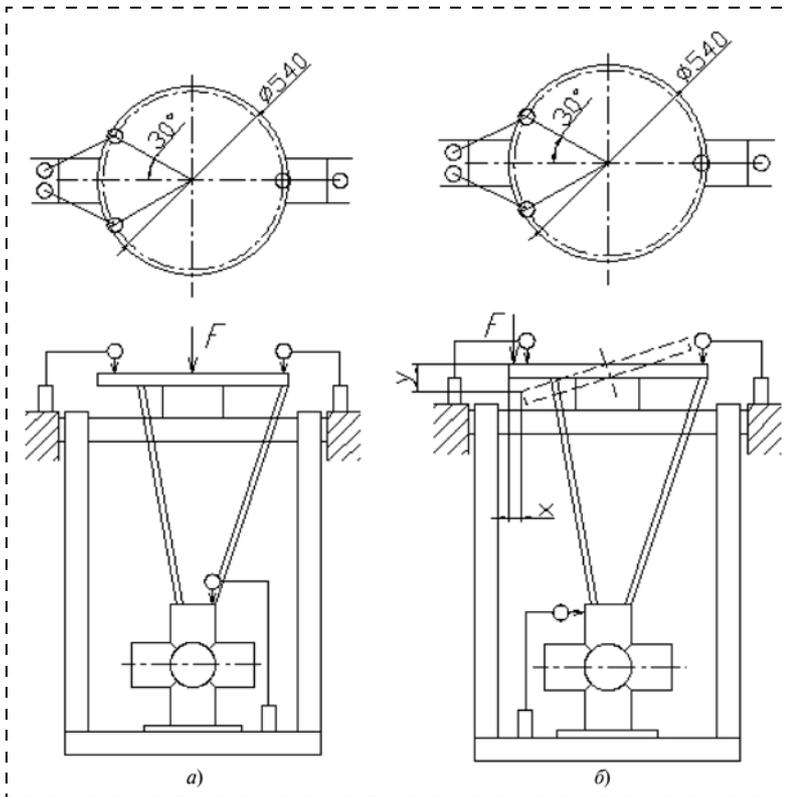


Рис. 6. Схемы измерения жесткости МР-модуля и МР-привода: а — осевой; б — радиальной

Определим рассматриваемые параметры.

1. Осевая жесткость на макете элементарного сегмента зеркала при зафиксированном МР-модуле (рис. 6, а):

$$k_1 = \frac{F}{x_1}, \quad (6)$$

где  $F$  — осевая сила, действующая на макет элементарного сегмента зеркала;  $x_1$  — осевое перемещение макета элементарного сегмента зеркала.

2. Осевая жесткость на штоке МР-модуля (рис. 6, а):

$$k_2 = \frac{F}{x_2}, \quad (7)$$

где  $F$  — осевая сила, действующая на макет элементарного сегмента зеркала;  $x_2$  — осевое перемещение штока МР-модуля.

Из формул (6) и (7) можно определить:

а)  $x_3 = x_1 + x_2$  — суммарную деформацию МР-привода;

б)  $k_\Sigma = \frac{F}{x_3}$  — суммарную жесткость МР-привода.

3. Радиальная жесткость на макете элементарного сегмента зеркала при зафиксированном МР-модуле (рис. 6, б):

$$k_{x,y} = \frac{FR}{(R - \sqrt{R^2 - y^2})R}, \quad (8)$$

где  $R$  — радиус, на котором приложена сила;  $y$  — вертикальное перемещение макета элементарного сегмента зеркала.

4. Радиальная жесткость на штоке привода (рис. 6, б):

$$k_{x,y} = \frac{FR}{x_2 R}, \quad (9)$$

где  $x_2$  — радиальное перемещение штока МР-модуля.

Для радиальной жесткости аналогично можно найти параметр  $x_3 = x_1 + x_2$ .

На рис. 7, а и б приведены экспериментальные графики осевой жесткости МР-привода (при зафиксированном МР-модуле) и МР-модуля соответственно. Как видно, наименее жестким элементом всей системы являются сильфонные узлы гидроцилиндров МР-модуля. Доля упругой деформации сильфонных узлов составляет около 80 % от упругой суммарной деформации МР-привода.

Для устранения этой погрешности в МР-приводе присутствует специальный узел упругой подвески, который полностью компенсирует вес элементарного сегмента, разгружает МР-модуль от статических нагрузок.

Одним из важных параметров, влияющих на точность перемещения привода, наряду со статической жесткостью является его динамическая жесткость, которая будет определять быстродействие данной системы. Под действием внешней возмущающей силы происходит деформация системы, и положение макета зеркала изменяется. Система управления будет стремиться восстановить первоначальное положение сегмента, заставляя войти переходной процесс позиционирования "в трубу" шириной 50 нм. Причем чем больше деформация системы, тем больше времени требуется системе управления на компенсацию данной погрешности.

#### Экспериментальные исследования потенциальных возможностей МР-привода по точности юстировки

Как было сказано ранее, главной особенностью разработанной магнитореологической системы позиционирования и виброизоляции является отсутствие пар внешнего трения и стандартных гидравлических элементов (распределители, дроссели, сопла, заслонки), что значительно повышает точность юстировки объекта данной системой.

Для замкнутой системы управления погрешность позиционирования определяется следующим образом:  $\delta_{\text{фд}} = \delta_{\text{н}} + \delta_{\text{л}} + \delta_{\text{с}} + \delta_{\text{и}}$ , где  $\delta_{\text{н}}$  — ошибка, возникающая вследствие воздействия

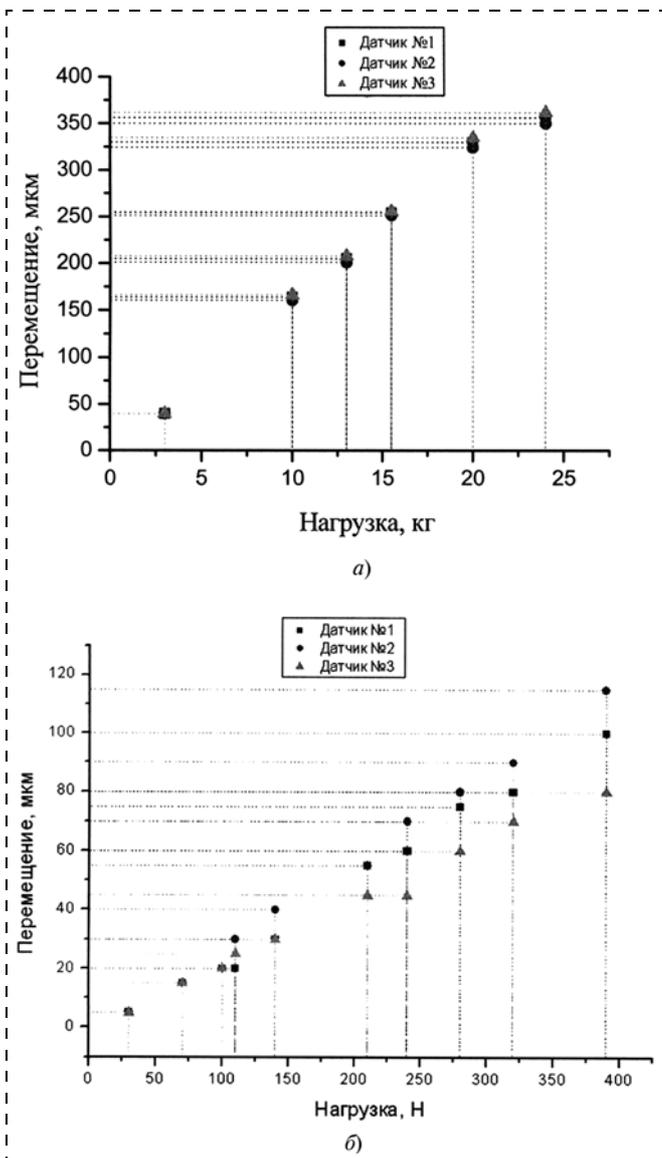


Рис. 7. Экспериментальные исследования осевой жесткости: а — МР-модуля; б — МР-привода

возмущающих сил и начальных условий;  $\delta_d$  — ошибка, обусловленная люфтом;  $\delta_c$  — ошибка, обусловленная наличием нагрузок и сил статического сопротивления в системе;  $\delta_n$  — погрешность средств измерения. Составляющие  $\delta_n$  и  $\delta_d$  можно свести практически к нулю, используя люфтовыбирающие устройства и лазерные интерферометры для измерения перемещений. Тогда  $\delta_{fd} = \delta_n + \delta_c$ . Погрешность  $\delta_c$  **определяется силами статического трения** в элементах системы. Одной из основных ее составляющих является погрешность позиционирования по силам статического трения в МР-жидкости  $\delta_{сж}$ . Составляющая  $\delta_n$  в основном **зависит от вибрации конструкции и используемой системы виброизоляции**:

$$\delta_{сж} = k\tau_0 \frac{\pi d^2}{4}, \quad (10)$$

где  $k = 4,2 \cdot 10^{-7}$  м/Н — коэффициент передачи МР-модуля по силам статического трения;  $\tau_0$  — предельное напряжение сдвига;  $d = 0,002$  м — диаметр стеклянной экспериментальной бюретки.

Для  $\tau_0 = (105 \text{ МПа}; 160 \text{ МПа}; 235 \text{ МПа})$ :  $\delta_{сж1} = 0,41$  нм;  $\delta_{сж2} = 0,62$  нм;  $\delta_{сж3} = 0,91$  нм.

Как видно из проведенного расчета, потенциальная точность юстировки МР-приводом имеет значение на уровне нескольких нанометров, что позволяет использовать данное юстировочное устройство в сверхбольших адаптивных телескопах, литографических установках, сканирующих зондовых микроскопах.

## Выводы

1. Проведенный анализ современного технологического и исследовательского прецизионного оборудования формирует принципиально новый класс требований по точности юстировки и виброизоляции.

2. Для защиты такого оборудования от вибрации наиболее целесообразным является применение активной и полупассивной системы виброизоляции.

3. Для обеспечения комплекса требований юстировки и виброизоляции наиболее целесообразно использовать магнитореологические устройства.

4. Расчет точности МР-устройств показал, что их потенциальная возможность по точности юстировки и виброизоляции (составляющая суммарной погрешности позиционирования по силам статического трения в МР-жидкости) находится на уровне нескольких нанометров.

5. Проведенные эксперименты по измерению жесткости системы показали, что наименее жестким элементом являются сильфонные узлы гидроцилиндров МР-модуля. Упругая деформация сильфонных узлов составляет около 80 % от упругой деформации всего МР-привода.

## Список литературы

1. Сычев В. В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. Старый Оскол: ООО "ТНТ", 2005. 464 с.
2. Логинов П. В. Обеспечение виброустойчивости сверхвысоковакуумного аналитического оборудования: автореферат дисс. ... канд. техн. наук (05.27.07). — Рязань. 1989 г.
3. Михайлов В. П. Управление трением в элементах прецизионного вакуумного привода // Вакуумная наука и техника: Материалы IX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. М.: Изд. МИЭМ, 2002. С. 174—178.
4. Вакуумная наука и техника: Материалы X научно-технической конференции. В 2 т. / Под. ред. д-ра техн. наук, проф. Д. В. Быкова. М.: Изд-во МИЭМ, 2003. 662 с.
5. Вакуумная техника: Справочник / Под общ. ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1992. 480 с.
6. Шульман З. П., Кордонский В. И. Магнитореологический эффект. Минск: Наука и техника, 1982. 184 с.
7. Акимов И. Ю., Михайлов В. П. Системы юстировки и виброизоляции для вакуумного прецизионного оборудования // Вакуумная наука и техника: Материалы XIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. М.: Изд. МИЭМ, 2006. С. 139—143.

УДК 577.359

А. В. Рзянина<sup>1</sup>, Д. А. Усанов<sup>1</sup>,  
Ан. В. Скрипаль<sup>1</sup>, Н. В. Островский<sup>1</sup>,  
В. В. Козлов<sup>2</sup>, А. Г. Ткачев<sup>3</sup>, Ал. В. Скрипаль<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный университет  
им. Н. Г. Чернышевского

<sup>2</sup> Институт нефтехимического синтеза  
им. А. В. Топчиева РАН

<sup>3</sup> Тамбовский государственный технический  
университет

## ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР С КЛЕТКАМИ ФИБРОБЛАСТОВ КИТАЙСКОГО ХОМЯЧКА ЛИНИИ V-79

*Проведено исследование биологической совместимости углеродных наноструктур с клетками фибробластов китайского хомячка линии V-79. Исследовано влияние полимеров полиакрилонитрила, углеродного нанокристаллического материала, а также углеродных нанотрубок, полученных методом газофазного химического осаждения, на формирование клеточного монослоя клеток млекопитающих.*

### Введение

Углеродные наноструктуры, в частности нанотрубки, находят широкое применение в биологии и медицине — от изготовления различных протезов и медицинских инструментов до использования в качестве нейтральных контейнеров для селективной доставки лекарственных веществ. Исходя из этого очень важно досконально изучить совместимость материалов, используемых для изготовления подобного рода изделий, с биообъектами. Важность такого рода исследований продиктована еще и тем фактом, что наноструктуры вследствие своего малого размера и большой удельной поверхности обладают повышенной химической активностью и при попадании внутрь организма вполне способны оказывать на него воздействия на клеточном уровне.

Задача оценки биологической совместимости нанопорошков и наноструктур является актуальной в настоящее время и в связи с необходимостью

исследования возможного их токсического действия на биологические объекты. Существующие мнения исследователей по вопросу токсического воздействия углеродных наноструктур на биологические объекты противоречивы. Ряд исследователей утверждает, что токсического эффекта от применения нанотрубок не обнаружено [1]. Известны также работы, в которых указывается на возможность вредного воздействия углеродных наноматериалов на живые организмы. Отмечается, в частности, что вредное воздействие может быть обусловлено присутствием ионов металла (железа и цинка), которые используются при изготовлении нанотрубок.

Противоречивость в предсказании наличия или отсутствия токсического эффекта от применения углеродных наноматериалов свидетельствует о том, что необходимы дальнейшие всесторонние исследования биологической совместимости углеродных нанопорошков и наноструктур на различных этапах их производства. Целью настоящей работы было проведение исследований, связанных с проверкой биологической совместимости углеродных наноструктур с клетками млекопитающих.

### Материалы и методы

Для оценки биологической совместимости углеродных наноматериалов с клетками млекопитающих были взяты фибробласты китайского хомячка линии V-79, предоставленные ЛРБ ОИЯИ г. Дубна.

Проводилось исследование биологической совместимости трех типов углеродных наноструктур. Для сравнения были взяты: полимер полиакрилонитрил (ПАН), углеродный нанокристаллический материал (УНМ) на основе пиролизованного полиакрилонитрила (ППАН), а также очищенные от примесей углеродные нанотрубки.

**Синтез полиакрилонитрила, получение и свойства углеродного нанокристаллического материала на основе пиролизованного полиакрилонитрила.** Для исследования биологической совместимости был приготовлен образец ПАН в виде белого порошка. ПАН синтезировали по технологии с применением окислительно-восстановительной каталитической системы:  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ — $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ — $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Полимеризация проводилась в водной среде при

40 °С. Условия полимеризации:  $C_{(NH_4)_2S_2O_8} = 1,6 \cdot 10^{-3}$  моль/л,  $C_{Na_2S_2O_4} = 6,2 \cdot 10^{-4}$  моль/л,  $C_{H_2SO_4} = 1,8 \cdot 10^{-2}$  моль/л. Концентрация мономера акрилонитрила составила 1,3 моль/л. Загрузку акрилонитрила и кислоты осуществляли в две стадии: сначала заливали дистиллированную воду, растворяли каталитическую систему и 3/4 объема мономера и кислоты. Реакцию проводили в термостате при 40 °С в течение 40 мин. Затем загружали оставшуюся часть мономера и кислоты и продолжали реакцию в течение 4 ч. Синтезированный полимер выпадал в виде белого осадка. Полимер фильтровали, отмывали от серной кислоты с помощью водного раствора  $K_2CO_3$  ( $C = 2$  мас. %) до нейтральной реакции и сушили в вакууме до постоянной массы. Молекулярная масса ПАН, синтезированного по этой технологии, равнялась  $M_n = 1 \cdot 10^5$ . Молекулярную массу определяли вискозиметрическим методом в растворе диметилформамида при  $T = 30$  °С. Выход полимера составлял 50 г [2].

Для приготовления УНМ на основе ППАН использовали термическую обработку при 750 °С в течение 5 мин на установке ИК-отжига. Установка оснащена двенадцатью ИК-лампами КГ-220 с суммарной мощностью 12 кВт и максимальной интенсивностью излучения в диапазоне 0,8...1,2 мкм. ИК-лампы и система электрических контактов изолированы от реакционной зоны с помощью кварцевой камеры в виде трубы. Интенсивность ИК-излучения регистрировали по результатам измерения температуры с использованием термопары. Для обеспечения равномерного нагрева образца внутренняя поверхность реактора была изготовлена из полированного алюминия. Установка была соединена с компьютером, с помощью которого осуществлялось программное контролирование технологии ИК-отжига. Точность измерения температуры и времени составила при этом  $\pm 0,1$  °С и 1 с соответственно.

С увеличением длительности облучения при 200 °С развивалась реакция дегидрирования основной цепи с образованием сопряженных связей  $C=C$ . При этом уменьшались и исчезали кристаллическая и аморфная фазы структуры ПАН, и одновременно образовывались другие аморфные углеродные фазы [3]:

- промежуточная фаза  $P_f$ , характеризующаяся слабым рассеянием рентгеновских лучей; Эта фаза является смесью молекул с различной химической структурой и их фрагментов; в данном случае система обладает наибольшей степенью аморфности;
- графитоподобная фаза ( $G$ ), характеризующаяся аморфным состоянием вследствие нерегулярного смещения графитовых сеток относительно

друг друга и малого размера областей когерентного рассеяния кристаллитов;

- полинафтеновая фаза  $H$ , представляющая структуру, состоящую из нафтеновых циклов, разделенных метиленовыми группами;
- фазы неизвестного строения, соответствующие различным углеродным соединениям.

**Синтез углеродных нанотрубок.** Для синтеза углеродных нанотрубок использовался способ газофазного химического осаждения углерода в процессе каталитического пиролиза углеводородов ( $C_3H_8 + C_4H_{10}$ ). Процесс осуществляли в емкостном реакторе полунепрерывного действия (ООО "НаноТехЦентр", г. Тамбов) в присутствии полидисперсного катализатора (Ni/Mg), при атмосферном давлении и температуре 620...650 °С. Время одного цикла синтеза 30...40 мин. Полученный материал подвергали кислотной ( $HNO_3$ ) очистке, диспергированию и классификации. Общее количество примесей не превышало 2—3 % (аморфный углерод не более 1 %). Полученный продукт (УНМ "Таунит") представляет собой углеродные, наномасштабные ( $d = 15...40$  нм,  $l \approx 2$  мкм и более), нитевидные образования с внутренним каналом. Согласно формирующейся классификации их можно отнести к многослойным нанотрубкам (МУНТ) со структурой "ламповые абажуры".

**Культивирование фибробластов.** Клетки фибробластов линии V-79 культивировали в среде DMEM с добавлением 10 % эмбриональной телячьей сыворотки, 200 мМ 1-глутамин и 2 % антибиотиков при 37 °С. Смену среды проводили каждые 2—3 дня, пересев клеточного монослоя — на 3—4 день при достижении конфлюэнтного слоя. Использовалась процедура пересева клеток и приготовления питательных сред, описанная в работе [4].

**Оценка биологической совместимости углеродных наноструктур.** Фибробласты китайского хо-



Рис. 1. Культивирование клеток в присутствии нанотрубок: слева — флакон с контрольной культурой клеток, справа — культивирование клеток в присутствии углеродных наноструктур

мячка линии V-79 культивировали в присутствии различных концентраций ПАН, УНМ и очищенных углеродных нанотрубок. Оценку жизнеспособности фибробластов проводили по критерию формирования 100 % клеточного монослоя [5, 6].

Для этого в культуральные флаконы ("Orange Scientific", 50 мл) высевали  $2 \cdot 10^5$  клеток на 5 мл питательной среды, добавляли различные концентрации ПАН, УНМ, нанотрубок, после чего флаконы помещали в термостат (рис. 1). Каждый день проводили наблюдение за морфологией клеток до образования монослоя. Оценивали вакуолизацию, адгезию и качество монослоя клеточной культуры.

## Результаты

В результате проведенных экспериментов не было обнаружено выраженного токсического воздействия углеродных нанотрубок, УНМ и ПАН на фибробласты китайского хомячка. Из рис. 2 видно, что культивирование клеток в присутствии низких концентраций ПАН, УНМ и нанотрубок (0,003 г и 0,007 г на 5 мл среды) неотличимо от контроля. Клетки прикреплялись к субстрату, распластывались и формировали полный монослой на 4-й день, как и в контрольных флаконах. Отмечалась некоторая задержка при формировании монослоя при концентрациях 0,01; 0,03; 0,04; 0,05 г на 5 мл среды, но несмотря на это клетки так же хорошо, как и в контроле, прикреплялись к подложке и распластывались на ней.

Исследовались также адсорбционные способности описанных углеродных соединений. Для контроля рН питательной среды в ней присутствует феноловый красный, который придает ей характерный томатно-красный цвет. При культивировании фибробластов с очищенными от примесей нанотрубками наблюдалось обесцвечивание питательной среды на следующий день после посева клеток. Причем эффект наблюдался при всех концентрациях этого типа нанотрубок. Такое кардинальное изменение рН среды, вероятно, может

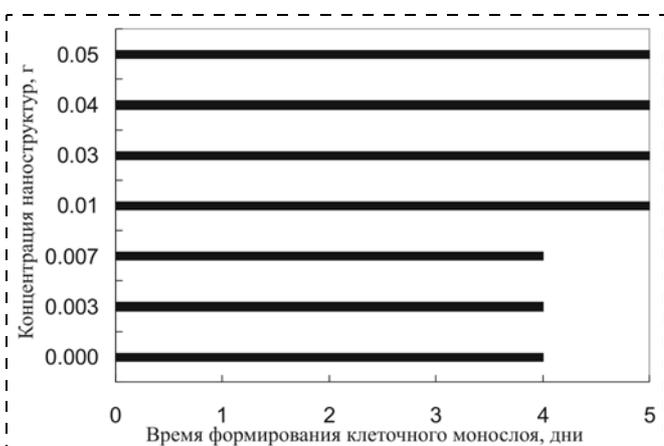


Рис. 2. Формирование конфлюэнтного монослоя в присутствии углеродных наноструктур

быть связано с адсорбцией некоторых компонентов питательного раствора углеродными нанотрубками [7–9].

Следует отметить, что при культивировании с ПАН и УНМ такого эффекта не наблюдалось. Задержка в формировании 100 % монослоя при концентрациях 0,01; 0,03; 0,04; 0,05 г на 5 мл среды может быть связана с понижением содержания в растворе компонентов питательной среды, вследствие адсорбции их на углеродных нанотрубках. Другой причиной отставания в формировании монослоя могут быть механические препятствия, создаваемые большими концентрациями ПАН, УНМ и нанотрубок на этапе прикрепления клеток к подложке.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов не обнаружено токсического эффекта при культивировании клеток фибробластов китайского хомячка линии V-79 в присутствии углеродных наноструктур, УНМ и ПАН. Клетки прикреплялись к подложке культурального флакона, вытягивались, росли и образовывали полный монослой, как и в контроле, что свидетельствует в пользу того, что протестированные нами углеродные нанотрубки, УНМ и ПАН являются биосовместимыми материалами.

*Выражаем благодарность сотрудникам ЛРБ ОИЯИ г. Дубна Шмаковой Н. Л., Комовой О. В., Фадеевой Т. А., Мельниковой А. А. за оказанную помощь в культивировании клеток линии V-79.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства образования и науки РФ.*

## Список литературы

1. Thomson L. A., Law F. C., Rushton N., Franks J. Biocompatibility of diamond-like carbon coating // *Biomater.* 1991. V. 12. P. 37–42.
2. Кожитов Л. В., Косушкин В. Г., Крапухин В. В., Пархоменко Ю. Н. Технология материалов микро- и наноэлектроники. М.: Изд. МИСиС, 2007. 544 с.
3. Козлов В. В., Королев Ю. М., Карпачева Г. П. Структурные превращения композита на основе полиакрилонитрила и фуллерена  $C_{60}$  под воздействием ИК-излучения // *Высокомолекулярные соединения.* 1999. Т. 41. № 5. С. 836–840.
4. Шмакова Н. Л., Фадеева Т. А., Красавин Е. А. Действие малых доз облучения на клетки китайского хомячка // *Радиационная биология. Радиоз экология.* 1998. Т. 38. № 6. С. 841–847.
5. Герасимов И. Г., Попандопуло А. Г. Оценка жизнеспособности клеток по их морфометрическим параметрам на примере культивируемых фибробластов // *Цитология.* 2007. Т. 49. № 3. С. 204–209.
6. Hayes O., Ramos B., Rodrigues L. L., Aguilar A., Badia T., Castro F. O. Cell confluency is as efficient as serum starvation for inducing arrest in the Go / G1 phase of the cell cycle in granulose and fibroblast cell of cattle // *Anim. Reprod. Sci.* 2005. V. 87. P. 181–192.
7. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Eklund P. C. *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes.* Academic Press, Inc. 1996. 965 p.
8. Saito R., Dresselhaus M. S., Dresselhaus G. *Physical properties of carbon nanotubes.* Imperial College Press, 1999. 251 p.
9. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Фуллерены и структуры углерода // *Успехи физических наук.* 1995. Т. 165. № 9. С. 977–1009.

**В. М. Елинсон**<sup>1</sup>, д-р тех. наук, проф.,  
**М. А. Юровская**<sup>2</sup>, д-р тех. наук, проф.,  
**Н. С. Овчинникова**<sup>2</sup>, **А. Н. Лямин**<sup>1</sup>,  
**Р. А. Нежметдинова**<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского,  
 Москва

<sup>2</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>3</sup> ФГУП "НИИ вакуумной техники  
 им. С. А. Векшинского", Москва

## СОЗДАНИЕ НАНОКОМПОЗИТНЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРОВ И ОРГАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДНЫХ ФУЛЛЕРЕНА [60] С РАЗЛИЧНЫМИ МОДИФИЦИРУЮЩИМИ АГЕНТАМИ

*Проведены исследования поверхности характеристик полиэтилентерефталата (ПЭТФ), модифицированного органическими производными фуллерена [60] с фрагментами индола и хинолина. Установлена зависимость антимикробной активности от вида микроорганизмов, условий формирования наноструктурированных поверхностей (НСП) и типа фуллеренового модификатора. Материалы на основе ПЭТФ с НСП, модифицированные нанесением углеводородных пленок и осаждением производных фуллерена [60], проявляют антимикробную активность по отношению к различным микроорганизмам, позволяя обеспечить селективное воздействие на микроорганизмы различных видов.*

Создание нанобиоматериалов различного назначения на основе полимерных материалов является в настоящее время весьма перспективным и экономически оправданным направлением научно-технических разработок. Полимерные материалы с антибактериальным действием находят широкое применение в различных областях науки и техники. В частности, в микроэлектронике они могут служить для защиты материалов от биокоррозии, исключения влияния организмов на наноуровне, при создании биологически активных фильтров для очистки технологических газовых и жидких сред, защитных корпусов и тары и т. п. Широкие перспективы применения нанобиоматериалов с антимикробным действием в медицине и биотехнологии связаны с созданием медицинских препаратов и полифункциональных лечебных средств нового поколения, например, трансдермальных лечебных форм.

В работах [1, 2, 3] рассматривается возможность придания антимикробных свойств полимерным материалам с помощью формирования нанострук-

турированных поверхностей (НСП). Принципиально новым подходом к созданию НСП является использование методов ионно-плазменной технологии — составляющей одной из базовых технологий микро- и наноэлектроники.

Использование органических производных фуллеренов в качестве нового класса биологически активных соединений и их применение для конструирования биологически активных материалов также является принципиально новым и перспективным направлением в данной области. В последнее время особое внимание уделяется целенаправленному конструированию производных  $C_{60}$ , обладающих полезными свойствами. Особое место занимает возможность применения производных фуллерена в биологической и медицинской химии. Помимо разнообразных биологических свойств производных фуллерена  $C_{60}$  перспективность их применения обусловлена и их достаточно низкой токсичностью. Исследования показали, что производные  $C_{60}$  не канцерогенны при применении на коже.

При соединении двух наноматериалов — полимеров с НСП и органических производных фуллерена [60] — возникает ряд вопросов, ответы на которые пока отсутствуют. К таким вопросам относятся: распределение молекул органических производных фуллерена [60] на наноструктурированных поверхностях полимеров, их влияние на суммарные медико-биологические свойства нанокompозитного материала и др. В настоящей работе была сделана попытка ответить на некоторые из этих вопросов.

В качестве исходного материала выбран полиэтилентерефталат (ПЭТФ). В ходе исследований был использован ПЭТФ марки ПЭТ-Э (ГОСТ 24234—80) толщиной 30 мкм производства Владимирского химического завода. Выбор ПЭТФ определялся как его широким использованием в медицине и биотехнологии, так и возможностью обеспечения большого диапазона свойств при модифицировании образованных поверхностей.

Формирование рельефа на исходной (гладкой) поверхности ПЭТФ проводили двумя методами. Первый — ионно-плазменный метод, обработка потока ионов химически активной смеси газов  $O_2 + N_2$  при пониженном давлении  $((5-6) \cdot 10^5 \text{ Па})$ . В качестве химически активной смеси использовалась воздушная смесь, как наиболее экономичный и экологически чистый химический реагент. Второй — нанесение углеводородных пленок различной толщины методом ионно-стимулированного осаждения из газовой фазы при использовании паров циклогексана. Толщина пленок составила 10, 20, 50 и 100 нм. В качестве углеводорода использовался циклогексан  $C_6H_{12}$ , в молекуле которого

длина связей С—С и углы между связями близки к алмазу. Нанесение пленки из циклогексана позволяет придать материалу дополнительную механическую прочность. Перед загрузкой в камеру поверхность ПЭТФ обрабатывалась этиловым спиртом. Затем проводилось модифицирование НСП органическими производными фуллерена (N-метилфуллеропирролидины с фрагментами индола, хинолина). Нанесение на полимеры диад C<sub>60</sub>-хинолин и C<sub>60</sub>-индол выполнялось методом *spin coating* (нанесение капель вещества на вращающуюся подложку).

Исследование топографии поверхности образцов ПЭТФ с различными видами модифицирования проводили на сканирующем зондовом микроскопе "ФемтоСкан" ("Центр перспективных технологий", МГУ) с максимальным полем сканирования 10 × 10 мкм в режиме атомно-силовой микроскопии.

Для каждого из рассматриваемых образцов были получены изображения поверхности в разных точках и при различном увеличении. Размеры сканов были 10 × 10 мкм, 5 × 5 мкм и 2,5 × 2,5 мкм. На основе данных сканирования для каждого скана находили совокупность характеристик микро-рельефа поверхности. Основными определяемыми

параметрами являлись: характерные горизонтальный размер  $R$  и высота пика  $H$ , определяемые осреднением значений, получаемых с помощью проведения в произвольном направлении сечений поверхности; шероховатость поверхности  $R_q$  (среднее квадратическое отклонение, рассчитываемое по всем точкам скана). Для обработки изображений поверхности дополнительно использовалась программа *ScanMaster* микроскопа СММ-2000 ("МНТЦ"). В таблице приведены значения характеристик топографии поверхности исследуемых образцов (значения приведены для размера скана 10 × 10 мкм).

Нанесение покрытия на ПЭТФ в первый момент времени приводит к выравниванию поверхности. Об этом свидетельствует уменьшение шероховатости поверхности. Далее с ростом толщины пленки высота неровностей начинает увеличиваться, причем диаметр конгломератов некоторое время практически не изменяется. Затем, при достижении некоторой толщины, происходит сращивание отдельных конгломератов, в результате чего их размер увеличивается, а поверхность становится в меньшей степени изрезанной.

Нанесение фуллереновых модификаторов на НСП ПЭТФ приводит к существенному изменению характера поверхности. Это можно проследить, сравнив значения шероховатостей поверхности: ПЭТФ, обработанный 3 мин. O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> — значение  $R_q = 11$  нм; ПЭТФ — C<sub>60</sub>-хинолин при предварительной обработке ПЭТФ 3 мин. O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> — значение  $R_q = 39$  нм; ПЭТФ — C<sub>60</sub>-индол при предварительной обработке ПЭТФ 3 мин. O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> — значение  $R_q = 35$  нм. На рис. 1 представлена зависи-

Характеристики микро-рельефа ПЭТФ с наноструктурированной поверхностью

Описание образца		$R_q$ , нм	$R$ , нм	$H$ , нм
ПЭТФ	Контрольный	2,7	356	7,3
	Обработка O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин)	11	142	12
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (10 нм)	8	89	17
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (20 нм)	5	162	13
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (50 нм)	11	121	20
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (100 нм)	8	98	16
ПЭТФ — C <sub>60</sub> — хинолин	Контрольный	16	415	83
	Обработка O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин)	39	821	186
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (10 нм)	18	602	96
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (20 нм)	20	564	97
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (50 нм)	12	616	70
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (100 нм)	21	866	85
ПЭТФ — C <sub>60</sub> — индол	Контрольный	7	401	69
	Обработка O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин)	35	437	158
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (10 нм)	8	540	62
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (20 нм)	18	532	105
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (50 нм)	10	408	85
	Обраб. O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (3 мин) + α-C : H (100 нм)	17	296	79

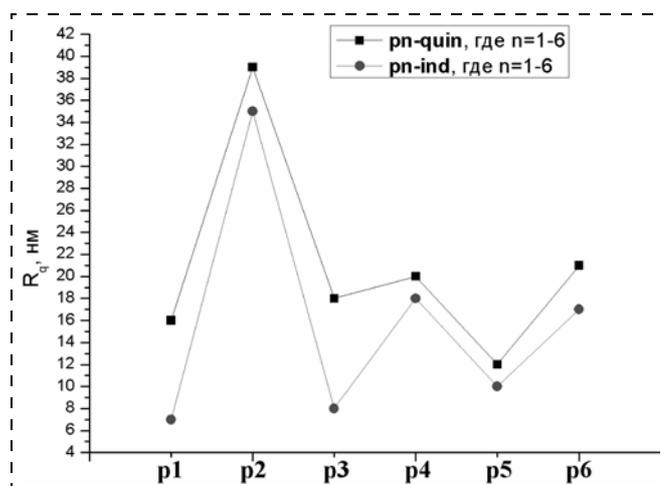
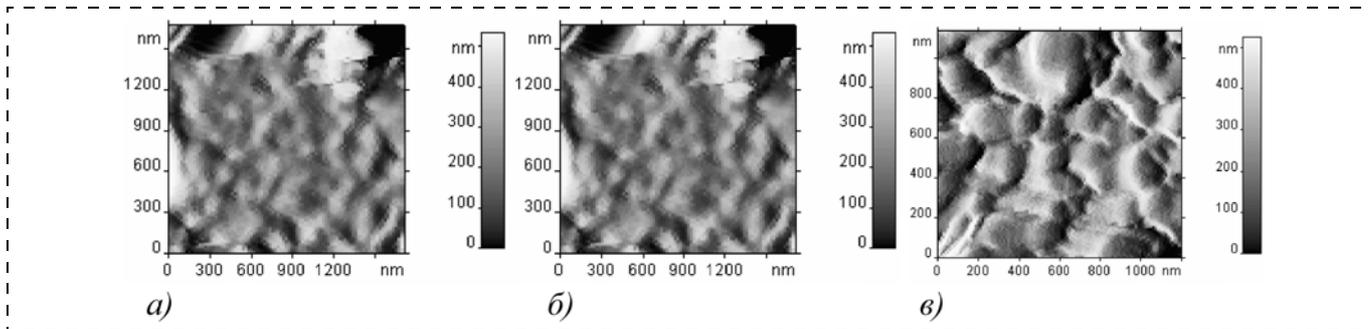
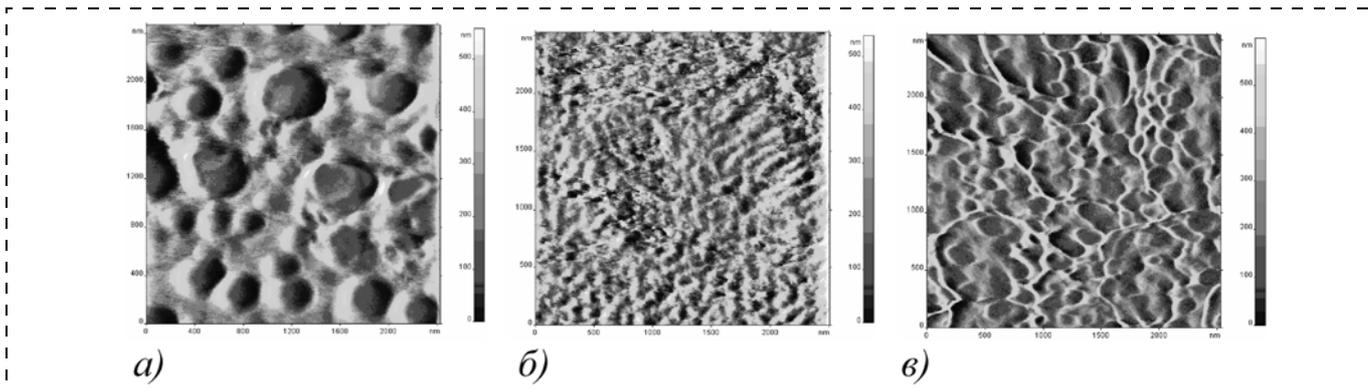


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности для образцов ПЭТФ — C<sub>60</sub>-хинолин и ПЭТФ — C<sub>60</sub>-индол от толщины пленки, где pn-quin — образцы, модифицированные диадой C<sub>60</sub>-хинолин, pn-ind — образцы, модифицированные диадой C<sub>60</sub>-индол,  $n = 1 \div 6$  — номера образцов в зависимости от толщины пленки



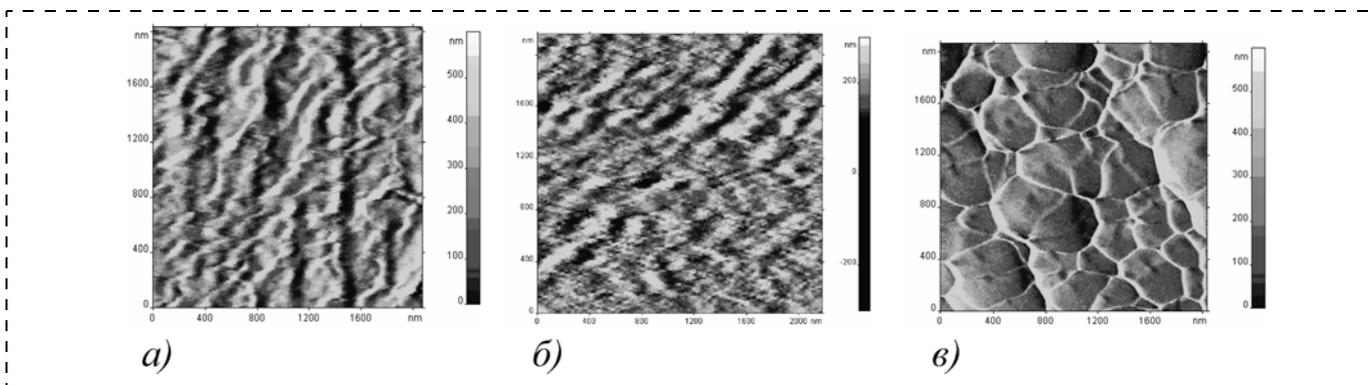
**Рис. 2. Топология поверхности ПЭТФ:**

*a* — контрольный образец; *б* — образец, обработанный  $O_2 + N_2$  3 мин.; *в* — образец, обработанный  $O_2 + N_2$  3 мин. и модифицированный пленкой углерода толщиной 100 нм



**Рис. 3. Топология поверхности нанокompозитного материала, полученного нанесением диады  $C_{60}$  — хинолин на поверхность ПЭТФ с НСП:**

*a* — контрольный образец; *б* — образец, обработанный  $O_2 + N_2$  3 мин.; *в* — образец, обработанный  $O_2 + N_2$  3 мин. и модифицированный пленкой углерода толщиной 100 нм



**Рис. 4. Топология поверхности нанокompозитного материала, полученного нанесением диады  $C_{60}$  — индол на поверхность ПЭТФ с НСП:**

*a* — контрольный образец; *б* — образец, обработанный  $O_2 + N_2$  3 мин.; *в* — образец, обработанный  $O_2 + N_2$  3 мин. и модифицированный пленкой углерода толщиной 100 нм

мость шероховатости образцов ПЭТФ —  $C_{60}$ -хинолин и ПЭТФ —  $C_{60}$ -индол условно от толщины пленки углерода. Обозначения p1, p2, p3, p4, p5, p6 соответствуют образцам соответственно: контрольный образец, образец, обработанный воздухом 3 мин., образцы с толщиной пленки 10 нм, 20 нм, 50 нм, 100 нм.

Как видно на рис. 1, ход зависимостей значений шероховатости для образцов ПЭТФ —  $C_{60}$ -хинолин и ПЭТФ —  $C_{60}$ -индол повторяют друг друга.

Это позволяет предположить, что нанесение фуллеропирролидинов приводит к формированию близких по характеру рельефов.

На рис. 2, 3 и 4 представлены изображения топографий образцов ПЭТФ, ПЭТФ —  $C_{60}$ -хинолин и ПЭТФ —  $C_{60}$ -индол. Несмотря на одинаковый ход зависимостей шероховатости условно от толщины пленки углерода, каждый из образцов имеет ряд особенностей. Из изображений топографии поверхности видно, что агрегация частиц в случае нанесения

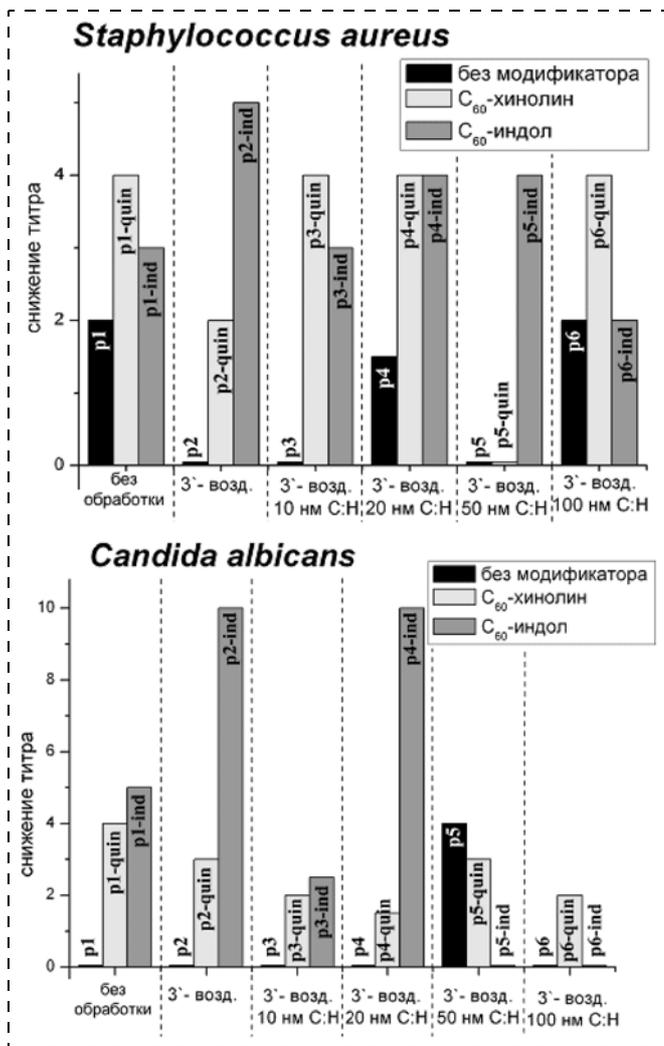


Рис. 5. Сравнительные результаты антимикробной активности исследуемых материалов

индолного производного более выражена, чем при нанесении хинолинового производного.

Для исследования антимикробной активности были использованы музейные штаммы грамположительных (*Staphylococcus aureus* ATCC 29213), грамотрицательных (*Escherichia coli* ATCC 54383, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853) бактерий и грибов (*Candida albicans* — клинический штамм). Антимикробная активность наноструктурированных полимерных материалов определялась аппликационным методом по стандартной методике. Результаты исследования антимикробной активности (для случая предварительной обработки ПЭТФ смесью O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> в течение 3 мин) представлены в сравнительных диаграммах на рис. 5, где отражено снижение титра (в единицы — разы) тест-организмов.

На приведенных диаграммах черным отмечено снижение титра микроорганизмов при действии на них исходных полимерных материалов, ПЭТФ НСП, модифицированных диадой C<sub>60</sub>-хинолин,

ПЭТФ НСП, модифицированных диадой C<sub>60</sub>-индол.

Как видно из представленных диаграмм, антимикробная активность зависит от вида микроорганизмов, условий формирования НСП и типа фуллеренового модификатора. Если для грибов *Candida albicans* возможно как сильное воздействие НСП без модификатора (для указанных условий формирования НСП), так и большое усиление и селективное антимикробное воздействие НСП с фуллереновыми модификаторами, то для *Staphylococcus aureus* наблюдается появление антимикробной активности и усиления по сравнению с полимерами с НСП в зависимости от условий формирования НСП.

Как видно из диаграмм, представленных на рис. 5, полимерные материалы, модифицированные диадой C<sub>60</sub>-индол, проявляют в большинстве случаев более выраженную антимикробную активность по сравнению с ПЭТФ НСП, модифицированными хинолиновым производным фуллерена.

Материалы на основе полиэтилентерефталата с наноструктурированной поверхностью, модифицированные нанесением углеводородных пленок и осаждением органических производных фуллерена, проявляют антимикробное действие по отношению к различным микроорганизмам, обеспечивая селективное воздействие на микроорганизмы различных видов. Использование органических производных фуллеренов в качестве нового класса биологически активных соединений и их применение является принципиально новым и перспективным направлением в данной области.

#### Список литературы

1. Елинсон В. М., Лямин А. Н., Стенин С. С., Зилова О. С. Полимерные наноструктурированные материалы с антимикробным действием // Научные тр. МАТИ. 2006. Вып. 10 (82). С. 168—173.
2. Елинсон В. М., Лямин А. Н., Стенин С. С., Хованская Т. П. Антимикробная активность наноструктурированных поверхностей синтетических и природных полимеров // Научные тр. МАТИ. 2007. Вып. 12 (84). С. 35—39.
3. Елинсон В. М., Лямин А. Н., Наумкин А. В., Стенин С. С., Спиринов С. Ю., Зилова О. С., Нестеров С. Б. Антимикробная активность синтетических и природных полимеров как результат наноструктурирования поверхности методами ионно-плазменной технологии // Вакуумная наука и техника. 2007. С. 200—206.
4. Елинсон В. М., Юрская М. А., Овчинникова Н. С., Лямин А. Н., Нежметдинова Р. А. Полифункциональные нанокompозитные биоматериалы нового поколения на основе наноструктурированных синтетических полимеров и органических производных фуллерена [60] // Вакуумная наука и техника. 2007. С. 196—200.
5. Нежметдинова Р. А., Овчинникова Н. С. Исследование топологии поверхности нанокompозитных материалов, полученных нанесением производных фуллерена [60] на полимерные материалы с наноструктурированной поверхностью // Вакуумная техника и технология. 2007. С. 120—122.
6. Нежметдинова Р. А., Овчинникова Н. С. Характеристики поверхности нанокompозитных материалов, полученных нанесением производных фуллерена [60] на полимерные материалы с наноструктурированной поверхностью // Гагаринские чтения. 2007. С. 24—25.

## Новый тип нанокатализатора для водородной энергетики

Ученые из университета Мэдисона и Мэриленда (*UW-Madison, University of Maryland*) разработали новый тип катализатора, который может существенно улучшить процесс очищения водорода при его производстве, что делает новый катализатор перспективной частью водородной энергетики.

Профессор Брайан Эйкхорн (Bryan Eichhorn) и его коллеги в основу катализатора положили наночастицу рутения (Ru), окруженную двумя слоями атомов платины (Pt).

В итоге получился катализатор (рис. 1, см. четвертую сторону обложки), способный при комнатной температуре увеличивать выход водорода при его производстве. Водородная энергетика уже стоит на пороге, и поэтому все, что имеет отношение к очистке и производству ее основного топлива, имеет очень важное значение.

Водород, получаемый в процессе облагораживания из минерального топлива, требует очистки, и катализаторы в этом процессе как раз кстати.

**Источник:** PhysOrg: New nanoparticle catalyst brings fuel-cell cars closer to showroom (<http://www.physorg.com/news125156841.html>)

## Наноскульптуры создаются атомным резцом

Нанотехнологи из Франции (университет *University Paris-Sud*) открыли новый способ изготавливать наноматериалы с высокой степенью точности благодаря сканирующей электронной микроскопии.

Технология настолько точна, что позволяет оперировать отдельными атомами. Так, ученые смогли удалять атомы углерода в целой нанотрубке. Это похоже на то, как скульптор ваяет

очередное произведение — от целого образца резцом откалывается лишний материал. Только в наном мире все сложнее.

Сканирующая трансмиссионная электронная микроскопия (STEM) обычно не повреждает атомы, изучая их. Однако если существенно повысить энергию электронного луча, то он сможет выбивать отдельные атомы из образцов (рис. 2, см. четвертую сторону обложки).

Один из исследователей, Альберто Зобелли (*Alberto Zobelli*), поясняет, что после выбивания атомов высокоэнергетическим лучом ученые смогли перевести микроскоп в режим сканирования и тут же получить картинку наноструктуры.

В предыдущих своих работах Зобелли и его коллеги не могли точно сфокусировать луч на отдельном атоме, поэтому понадобилось составить физическую теорию этого процесса, которая помогла точно сфокусировать луч.

Дело в том, что успешность работы микроскопа с нанообъектом зависит также от геометрии последнего. Так, если атом находится на конце или в центре нанотрубки, приходится это учитывать для успешного его удаления. При этом пространственное разрешение микроскопа составляет 0,5 нм.

Вычисления ученых также показали, что для удаления соседних атомов требуется меньше энергии, чем для "выбивания" первого из них. Особенно, если они лежат на одной линии.

Самое интересное, что после таких дефектов нанотрубка старается сама перестроиться, изменяя структуру связей между атомами углерода. В результате получаются изгибы и деформации образца (рис. 3). Так, обработанная нанотрубка может иметь даже полупроводниковую структуру, формируя диод Шоттки!

Как говорит Зобелли, открытый учеными способ очень важен в нанотехнологии. С его помощью можно будет конструировать новые типы наноматериалов из уже существующих, особенно после того как исследователи усовершенствуют STEM для работы на разрешениях 0,1 нм. Правда, "ваять из нанотрубок" пока можно только "вручную".

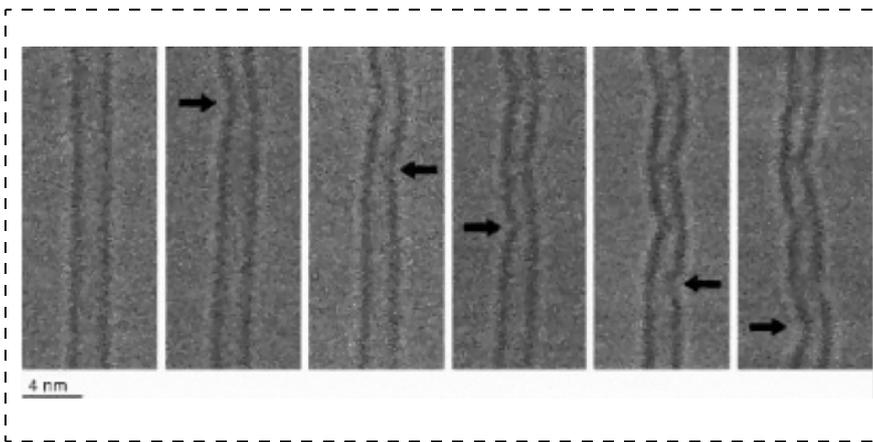


Рис. 3. Дальнейшая деформация нанотрубки

О своей работе ученые сообщили в текущий выпуск *Physical Review B*.

**Источник:** PhysOrg: Nanosculptors carve atom by atom.

## Создан 3D-микроскоп для исследования наноструктур

Специалисты из Национального института стандартов и технологий США (*National Institute of Standards and Technology — NIST*) разработали новую конструкцию микроскопа, которая позволяет проследить за наноразмерными объектами в трех измерениях.

Использующиеся на сегодняшний день технологии самосборки наночастиц предполагают их позиционирование в растворе и дальнейшее наблюдение за процессом сборки. Однако если все вышеперечисленное для "двумерной самосборки" не составляет проблемы, то точное отслеживание наночастиц в 3D — задача посложнее.

Ученые из NIST смогли решить эту проблему достаточно просто — с помощью дополнительных зеркал, которые отражают боковые изображения объема исследуемой структуры. Далее, обрабатывая изображения, полученные от зеркал, ученые могут точно установить третью координату положения наночастицы — ее глубину в растворе.

Исследования проводились на тестовом образце площадью 20 мкм<sup>2</sup> и глубиной в 15 мкм. Кроме традиционной 2D-картины микроскоп получал еще по два изображения от каждой наночастицы — в горизонтальной и вертикальной проекции (рис. 4, см. четвертую сторону обложки).

Далее работает программное обеспечение, которое выдает на мониторы трехмерную реконструкцию наночастиц в жидкости. Интересно то,

что микроскоп может работать и в динамике. Так что ученые могут наблюдать за скоростями наночастиц.

Кроме наблюдения за самосборкой, позиционный микроскоп может использоваться при исследовании суспензий, жидкостей и других взвешенных наночастиц. Также ученые не отрицают возможность использования прибора для сборки различных наноструктур.

**Источник:** PhysOrg: All done with mirrors: Microscope tracks nanoparticles in 3-D (<http://www.physorg.com/news/124372198.html>)

## Новый биомагнитный прибор для диагностики рака

Команда исследователей из лондонского центра нанотехнологий при исследовательском центре UCL разработала новое биомедицинское устройство, благодаря которому диагностика рака груди может существенно упроститься.

Новый магнитометр высокой чувствительности HistoMag (рис. 5, см. четвертую сторону обложки) способен с помощью нанотехнологий находить отдельные раковые клетки в образцах тканей достаточно быстро. Устройство настолько инновационно, что получило престижную премию Королевского научного общества Великобритании.

Принцип действия устройства состоит в нанесении магнитных наночастиц с прикрепленными к ним антителами, присоединяющимися к белку HER2, который находится на поверхности раковых клеток.

После обработки раствором наночастиц образца ткани можно уверенно говорить о том, что раковые клетки в ней "помечены" для дальнейшего исследования прибором-магнитометром, через микроскоп которого можно пересчитать раковые клетки.

Как говорит руководитель проекта профессор Панкхурст (Pankhurst), автоматизация поиска "помеченных" раковых клеток через микроскоп может привести к его преобладанию над другими методами диагностики рака груди.

Ученые планируют на полученную премию (£25 000) доработать HistoMag с таким расчетом, чтобы в 2010 г. он уже появился в клинической практике.

**Источник:** PhysOrg: Biomagnetics developed for use in new breast cancer tests (<http://www.physorg.com/news/23504154.html>)

## Создан новый тип оптического пинцета

Ученые из Гарварда (*Harvard School of Engineering*) и *Applied Sciences* (SEAS) продемонстрировали новый тип оптического пинцета, который будет использоваться в микрожидкостных чипах для измерения сил в их каналах. Устройство было создано Этаном Шонбруном (Ethan Schonbrun) и его коллегами из SEAS.

Основа чипа (рис. 6) — платформа оптического пинцета на линзе Френеля (FZP), сконструированная на стеклянной подложке. При этом оптический пинцет новой конструкции не требует линз-объективов для работы.

Быстродействующие линзы объектива обычно работают на очень коротких расстояниях, около 200 нм. Это не дает возможности использовать оптический пинцет в микрожидкостных чипах со стеклянными основами.

Оптический пинцет, использующий линзу Френеля, может быть сконструирован даже на внутренней поверхности микроканалов жидкостного чипа, а это дает основание говорить о возможности измерения сил в каналах на площади в  $100 \times 100$  нм.

При этом традиционные оптические пинцеты не могут похвастаться такой гибкостью в микропроизводстве и оптическими характеристиками.

Как говорят ученые, новый оптический пинцет, интегрированный в микрожидкостные чипы, сможет дать информацию о локальной вязкости жидкости, протекающей по микроканалу, ее скорости и коэффициенте преломления. Особенно важно получать такие сведения при сортировке микрочастиц, находящихся в жидкости.

**Источник:** PhysOrg: Engineers demonstrate a new type of optical tweezer ([http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2008-02/hu-eda022\\_508.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2008-02/hu-eda022_508.php))

## Новый прорыв в молекулярном манипулировании – как оторвать атом от поверхности?

Ученые из IBM в сотрудничестве с коллегами из Университета Регенсбурга (*University of Regensburg*), Германия, впервые точно измерили силу, необходимую для отрыва единичного атома от кристаллической поверхности.

Необходимо сказать, что нанотехнологии "в чистом виде" как раз должны оперировать отдельными атомами, отрывая их от субстрата и присоединяя к более сложным атомным конструкциям.

Естественно, что подобные технологии могут широко использоваться в производстве компьютерных чипов и памяти, упорядоченных с точностью до отдельных атомов, что даст существенную миниатюризацию микроэлектроники.

В 1989 г. ученые из IBM в исследовательском центре *Almaden Research Center* уже отрывали отдельные атомы ксенона от поверхности и перемещали их, выложив в конце концов из атомов свой логотип — IBM. Это революционное достижение стало реальностью благодаря микроскопии нового типа, а именно, сканирующей зондовой микроскопии. Многие сравнивают это достижение по значимости в нанотехнологиях с первым полетом братьев Райт в авиации.

С тех пор ученые существенно продвинулись в области микроскопии и манипулирования отдельными атомами. Так, появился знаменитый атомно-силовой микроскоп (*atomic-force microscope — AFM*), позволивший еще глубже заглянуть в секреты материи.

Однако до сих пор все манипуляции с атомами отдавали некоторой "кустарщиной". Никто доподлинно не мог уточнить, какая минимальная сила необходима для отделения атома от той или

иной поверхности. А эти знания очень важны для будущего построения сложных систем атомной сборки, таких, например, как нанофабрики.

Заострим внимание на том, что учеными получено значение минимальной энергии, что дает представление о мощности будущих наноразмерных манипуляторов.

Природа химических связей также налагает ряд ограничений на подвижность атомов в кристаллической структуре или молекуле, и

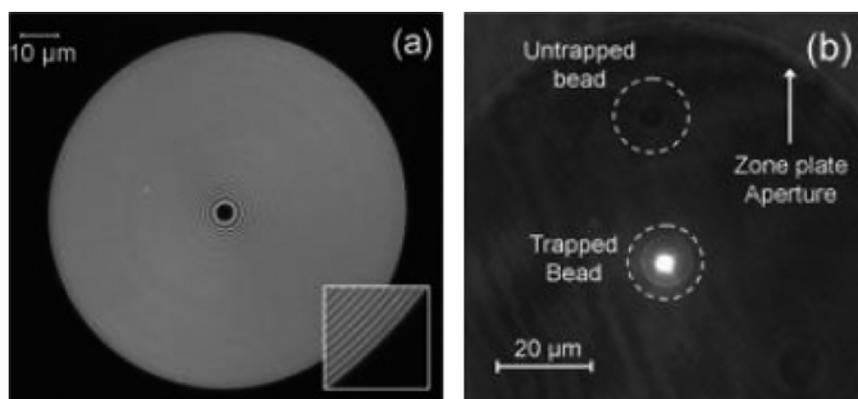


Рис. 6. Микрожидкостный чип, выполненный по новой технологии

зачастую необходимо знать, с какой силой нужно воздействовать на один атом, чтобы случайно не отделить остальные, связанные с ним.

"Результаты наших исследований обеспечивают фундаментальную базу знаний для дальнейшего производства на молекулярном уровне, а также открывают путь к созданию устройств памяти нового типа, — говорит Андреас Хайнрих (Andreas Heinrich), ведущий ученый в области сканирующей туннельной микроскопии в *Almaden Research Center*. — Одна из наших задач — сделать IBM первой компанией, производящей упорядоченные наноконструкции".

О результатах своей работы ученые сообщили в текущем выпуске журнала *Science*.

В статье "The Force Needed to Move an Atom on a Surface" ученые показали, что для отрыва атома кобальта от гладкой платиновой поверхности необходимо минимум 210 пН, а для отрыва того же атома от медной поверхности — всего 17 пН.

За время, прошедшее с момента появления атомной эмблемы, точность и чувствительность инструментов для работы с наноструктурами существенно повысились. Для того чтобы установить силу отрыва, ученым понадобилось сделать для атомно-силового микроскопа специальный вид зонда. Он представляет собой жесткий наконечник, расположенный на гибкой пружинящей основе, похожей на вилку кварцевого осциллятора, использующуюся в часовой технике (рис. 7, см. четвертую сторону обложки).

Как только конец зонда располагается напротив атома, частота вибрации вилки-зонда изменяется. Она изменяется все больше и больше по мере того, как атом отделяется от поверхности. Естественно, по изменению частоты осциллирования зонда ученые могут точно установить силу, связывающую атом с кристаллической поверхностью.

Как было сказано выше, производство действительно наноструктурированных объектов — задача достаточно сложная, и она потребует от ученых точного знания механики и физики наномира. Без этого можно даже не надеяться увидеть наноассемблеры и другие не менее сложные устройства.

Радует, что работы в этом направлении успешно продолжаются.

**Источник:** Scientists First To Measure Force Required To Move Individual Atoms (<http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/23544.wss>)

## Нанотрубки — не конкуренты для графена

У углеродных нанотрубок, кажется, появился серьезный конкурент в наноэлектронике — материал графен, представляющий, по сути дела, ту же нанотрубку, только "развернутую" в плоский углеродный лист.

Как установили ученые из Университета Риверсайда, Калифорния (*University of California — Riverside UCR*), графеновый лист проводит теплоту в составе микроэлектронных компонентов гораздо лучше нанотрубок.

"С традиционным уменьшением электронных чипов, особую важность приобретают эффективные теплопроводные материалы, — говорит Александр Баландин (Alexander Balandin), профессор из UCR. — Наша работа позволяет использовать графен в ряде полупроводниковых устройств, обеспечивающих тепловой контроль в оптоэлектронике, фотонике и биотехнологиях".

Для измерения теплопроводности графена ученые использовали оригинальный бесконтактный метод: они расположили пленку длиной всего 3 мкм на поверхность с углублением так, что большая часть графена оказалась висящей в воздухе между двумя концами, между которыми была закреплена (рис. 8).

Далее, нагревая пленку светом, они измеряли степень ее вибрации с помощью рамановской спектроскопии. Далее, исследовав спектр и сопоставив его с мощностью лазера, Александр и его коллеги смогли точно вычислить коэффициент теплопроводности.

Теплопроводность материала измеряется в Вт/м·К. Как видно, этот показатель зависит от мощности тепловой энергии, длины материала и температуры. Так, для кремния этот коэффициент при комнатной температуре составляет 145 Вт/м·К.

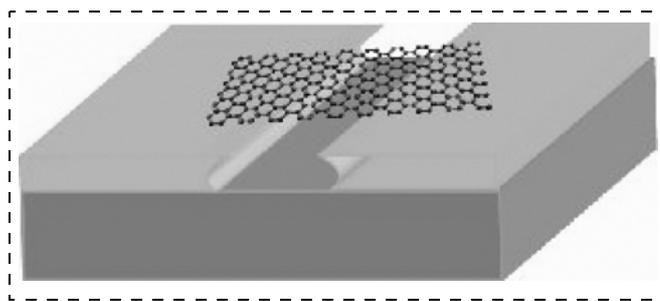


Рис. 8. Схема установки по исследованию теплопроводных свойств графена

Углеродные нанотрубки могут похвастаться значением теплопроводности от 3000 до 3500 Вт/м·К, в то время как для графеновой пленки значение этого коэффициента может достигать до 5300 Вт/м·К.

Но не только высокая теплопроводность делает графен идеальным кандидатом для мониторинга температуры в чипах, еще одно достоинство графеновых пленок — их геометрия и малая толщина.

**Источник:** PhysOrg: Graphene Takes the Heat (<http://www.physorg.com/news/22732528.html>)

## Создана умная "наножиждкость"

Благодаря нанотехнологиям ученые научились управлять водой, используя внешнее электромагнитное поле.

Ученые из Политехнического института Ренсслеера (*Rensselaer Polytechnic Institute*) создали новый тип жидкой суспензии с наночастицами, которая показала хорошую стабильность в магнитном поле.

Работа с миниатюрными объемами жидкости давно интересует ученых, работающих с МЭМС и лабораториями-на-чипе. Для того чтобы эффективно управлять свойствами жидкости, ученые из Ренсслеера растворили в ней наночастицы теллурида висмута. Затем капельно нанесли получившуюся смесь на подложку из кремния, обработанную тефлоном. Как только на капли воздействовали электромагнитным полем, они меняли контактный угол с поверхностью, в то время как обычные капли воды, естественно, не проявляли таких свойств (рис. 9, см. четвертую сторону обложки).

Основное достижение ученых состоит в том, что теперь можно заставить воду перемещаться по капиллярам без необходимости установки микронасосов. Управляя протоком электромагнитным полем, ученые всегда смогут либо "затормозить" ее ход, либо изменить его на противоположный.

Как говорят ученые, это открытие поможет при создании управляемых жидкостных линз, так необходимых во многих оптических приборах, также наножиждкость пригодится в мониторах для мобильных телефонов. Другое применение "управляемой жидкости" — в жидкостных МЭМС и лабораториях-на-чипе. Там наночастицы могут контролировать проток жидкости через капилляры устройств без каких-либо микронасосов.

О своем открытии ученые сообщили в журнале *Nanotechnology*.

**Источник:** PhysOrg: Strengthening Fluids With Nanoparticles (<http://www.physorg.com/news/122660454.html>)

## Лазерная обработка наномембран Ni<sub>3</sub>Al

Как выяснили ученые из Австрии, проблемы очистки воды и восстановления кожи могут быть решены с помощью пористых наномембран Ni<sub>3</sub>Al. Нанотехнологии уже представляли различные типы наномембран, но пока они достаточно сложны в массовом производстве.

Традиционные Ni-наномембраны легко получить, но они токсичны, поэтому ученые из Технического университета Брауншвейга (*Technical University Braunschweig*) разработали способ их покрытия биологически совместимыми материалами с помощью лазерной обработки.

С помощью высокоэнергетической лазерной обработки с последующим нанесением титана или алмазоподобного углерода (*diamond-like carbon — DLC*) ученые добились формирования защитного слоя на порах наномембраны шириной 200 нм и глубиной около 250 мкм. Нанесение проходило с достаточно высокой скоростью 5,4 см/с.

Точность несения покрытия ученые смогли рассмотреть с помощью трехмерной ионно-лучевой томографии, сформировав изображение из 178 срезов наномембраны (рис. 10).

В обоих случаях наносимого материала (титана и DLC) была сформирована гладкая поверхность толщиной около 50 нм, причем плазменная обработка проникла глубоко в поверхность мембраны.

Дальнейшим шагом ученых будет проверка наномембраны на биологическую совместимость.

**Источник:** Nanotechweb: Laser-coating penetrates nanomembrane (<http://nanotechweb.org/cws/article/tech/32831>; jsessionid=7E90BCD97ADB0AC5D79AE95AA822FCC7)

Составил Ю. Г. Свиденко,  
Главный аналитик компании  
*Nanotechnology New Network*

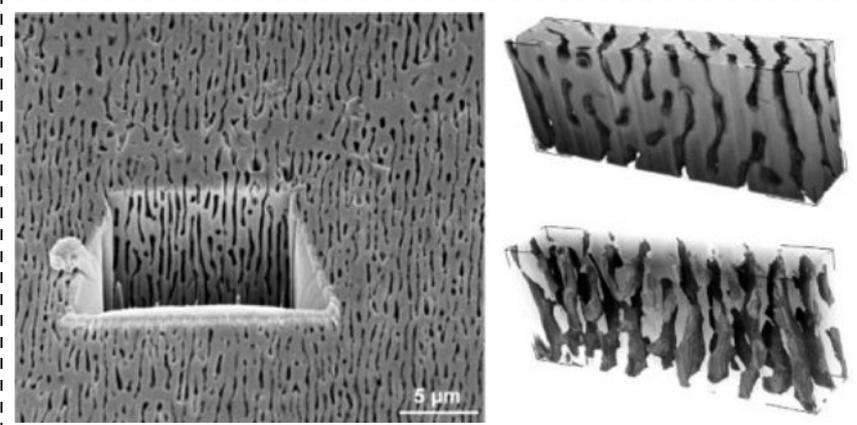


Рис. 10. Томография наномембраны с обработкой

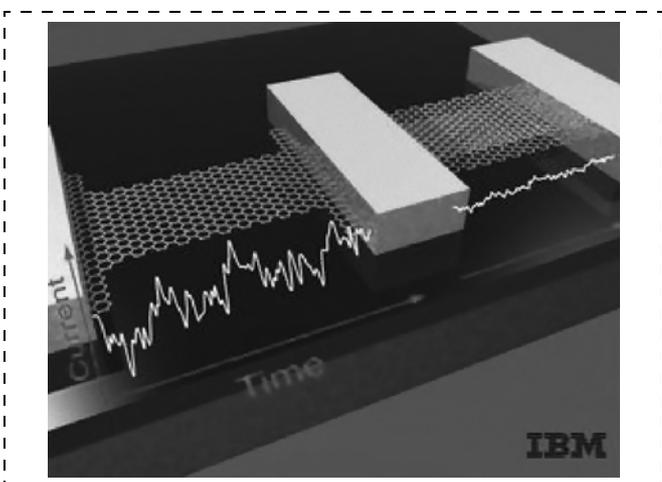
### Ученые IBM "успокаивают" "буйные" электроны в атомарных слоях графита

*Тончайший двойной слой графена сулит большие надежды для развития нанoeлектроники*

**ЙОРКТАУН ХЕЙТС, штат Нью-Йорк, 06 марта 2008 г.** Исследователи корпорации IBM (NYSE: IBM) сегодня сообщили об открытии, которое позволяет успешно бороться с одной из наиболее трудных проблем электронной индустрии, связанной с использованием графита — того самого, из которого делают грифели для карандашей — в качестве материала для создания нанoeлектронных схем, значительно более миниатюрных, чем любые современные компьютерные микросхемы на основе кремния.

Ученые IBM впервые нашли способ подавления паразитных помех электрических сигналов, достигаемого при миниатюризации до длины всего в несколько атомов образца графена — двумерного кристалла, состоящего из одинарного слоя атомов углерода, собранных в гексагональную кристаллическую решетку. (Из графена можно "собрать" трехмерный кристалл графита. Графен можно представить как одну плоскость графита, отделенную от объемного кристалла.)

На рисунке приведена атомная "проволочная сетка" для нанoeлектроники. Слева на рисунке показан одинарный слой (или пленка) атомов углерода, называемый графеном (Graphene). Электрический шум, возникающий от взаимодействия носителей заряда с веществом при прохождении через него электрического тока, возрастает по мере уменьшения устройства, что ограничивает производительность нанoeлектронных элементов. Ученые IBM впервые продемонстрировали, что добавление второго слоя графена значительно снижает электрический шум (см. справа на рисунке), и это открывает привлекательную возможность потенциального применения данного материала в будущих нанoeлектронных приборах.



Исследователи во всем мире изучают возможности использования графена как гораздо более миниатюрной альтернативы современным кремниевым транзисторам. Графен, как уже отмечалось, обладает двумерной кристаллической решеткой, сформированной атомами углерода (которая напоминает проволочную сетку, но с размерами атомарного масштаба). Такое строение графена привлекло к нему большой интерес со стороны ученых, инженеров и технологов, поскольку оно способствует проявлению привлекательных электрических свойств и может быть использовано в транзисторах и электронных схемах, значительно меньших по размеру, чем компоненты самых крошечных современных компьютерных чипов.

Одна из проблем использования таких наноустройств — обратно пропорциональная зависимость между размером устройства и мощностью генерируемого им неуправляемого электрического шума. Иными словами, чем миниатюрнее становятся устройства, тем интенсивнее оказывается электрический шум — возрастает заряд электричества, проходящего через вещество и вызывающего помехи, которые негативно влияют на характеристики этого вещества (материала) и ограничивают его полезное применение. Эта зависимость, известная как закон Хуга (*Hooge's rule*), справедлива как для полупроводниковых элементов на основе традиционного кремния, так и для сверхминиатюрных устройств на основе графеновых "нанопленок" и углеродных нанотрубок.

"Эффект электрического шума, подчиняющийся закону Хуга, на наноуровне возрастает многократно вследствие того, что размеры полупроводникового элемента здесь достигают почти абсолютного минимума и становятся сопоставимы с размерами атомов. На этом уровне генерируемый шум может превосходить по амплитуде полезный сигнал, — поясняет доктор Фаэдон Аворис (*Phaedon Avouris*), ученый из IBM Research, который возглавляет исследования IBM в области углеродных нанотрубок и графена. — Как сказал знаменитый физик Рольф Ландауэр (*Rolf Landauer*), на наноуровне "ваш сигнал — это шум"; иными словами, вы не сможете создать пригодный для практического применения электронный прибор на наноуровне, если паразитный шум сравним по мощности с управляющим сигналом".

И вот совсем недавно исследователи из IBM обнаружили, что электрический шум в полупроводниковых элементах на основе графена может быть фактически подавлен. Ученые опубликовали сегодня результаты своего исследования в журнале *Nano Letters*.

Сначала в своих экспериментах ученые IBM использовали один слой (или пленку) графена для создания транзистора; при этом еще раз было подтверждено, что на полученный полупроводниково-

вый элемент распространяется правило Хуга — действительно, по мере уменьшения размеров электронного устройства пропорционально увеличивается генерируемый им шум.

### Два слоя лучше, чем один

Тем не менее, когда исследователи из ИВМ создали такой же элемент с двумя слоями графена вместо одного (расположенными один над другим), они отметили, что электрический шум подавляется. Мощность помех была в достаточной степени невелика, и это дает основание предположить, что так называемые "двухслойные графеновые полоски" (*"bilayer graphene ribbons"*) могут быть пригодны для создания полупроводниковых элементов, которые, в свою очередь, найдут широкое применение в аппаратуре связи, компьютерных системах и других электронных устройствах. Паразитный шум подавляется благодаря сильной электрической связи между двумя слоями графена, которая нейтрализует влияние источников помех. Такая структура, проще говоря, функционирует как своеобразный шумоизолятор.

Несмотря на то, что для углубленного изучения данного феномена потребуются дополнительные исследования и анализ, это достижение ученых открывает большие перспективы практического применения технологии двухслойных графеновых лент в производстве полупроводниковых комплектов для целого спектра электронных устройств.

Полную версию отчета об этой работе, озаглавленного *"Strong Suppression of Electrical Noise in Bilayer Graphene Nanoribbons"* ("Значительное подавление электрических шумов в двухслойных графеновых нанополосках"), авторами которого являются Ю-Мин Линь (*Yu-Ming Lin*) и Фаэдон Аворис (*Phaedon Avouris*) из исследовательского центра ИВМ им. Т. Дж. Уотсона (*IBM T. J. Watson Research Center*) в Йорктаун Хейтс, штат Нью-Йорк, можно получить на Web-странице <http://pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/nalefd/asap/abs/n10802411.html>

## Исследователи ИВМ разрабатывают самый миниатюрный в мире нанофотонный коммутатор для маршрутизации оптических данных между ядрами в будущих процессорных чипах

*Нанофотонное коммутационное устройство предназначено для управления световыми импульсами "в масштабах" микросхемы*

**ЙОРКТАУН ХЕЙТС, штат Нью-Йорк, 17 марта 2008 г.** Ученые корпорации ИВМ (NYSE: IBM) достигли очередного выдающегося результата в решении проблемы передачи данных внутри компьютер-

ного чипа с помощью световых импульсов вместо электронов, создав самый миниатюрный в мире нанофотонный коммутатор, площадь которого на поверхности кристалла почти в 100 раз меньше площади поперечного сечения человеческого волоса.

Этот коммутационный элемент, который является важным компонентом управления потоками данных внутри микросхем следующего поколения, может значительно повысить производительность чипа при гораздо меньшем потреблении электроэнергии.

Сегодняшняя новость является продолжением серии открытий и разработок ИВМ в области внутренней оптической информационной шины компьютерного чипа:

- В ноябре 2005 г. ученые ИВМ продемонстрировали кремниевое нанофотонное устройство, которое способно значительно замедлять и активно контролировать скорость светового потока.
- В декабре 2006 г. аналогичное миниатюрное кремниевое устройство было использовано для демонстрации буферизации более 1 байта данных, закодированных посредством оптических импульсов. Это устройство требуется для создания оптических буферов внутренних оптических шин обмена данными в микросхеме.
- В декабре 2007 г. ученые ИВМ сообщили о разработке сверхкомпактного кремниевое волоконно-оптического модулятора, который преобразует электрические сигналы в световые импульсы, что также является необходимым условием реализации оптических информационных каналов в микросхеме.

"Эту новую разработку можно по праву считать еще одним важным шагом на пути создания оптической сети на уровне чипа, — говорит Юрий Власов, менеджер Исследовательского центра ИВМ им. Т. Дж. Уотсона (*IBM TJ Watson Research Center*) по кремниевым нанофотонным устройствам. — Принимая во внимание все успехи в этой области, достигнутые за последние несколько лет, очевидно, что наши ожидания и прогнозы относительно возможности реализации эффективных оптических каналов обмена данными в чипе становятся все более и более реалистичными".

Анонсированное сегодня достижение является очередным значительным вкладом исследователей ИВМ в разработку высокопроизводительных многоядерных компьютерных чипов следующего поколения, в которых обмен данными осуществляется посредством световых импульсов, проходящих через кристалл кремния, а не посредством электрических сигналов, передаваемых по медным проводникам.

В статье, опубликованной в журнале *Nature Photonics*, ИВМ сообщает о разработке кремниевое широкополосного оптического коммутатора — еще одного ключевого компонента, необходимого для реализации оптических межсоединений в мик-

росхеме. Когда электрические сигналы преобразованы в импульсы света, это коммутационное устройство берет на себя важную функцию управления внутренним "сетевым трафиком", гарантируя, что оптические "сообщения" от одного процессорного ядра будут доставлены любому из других процессорных ядер компьютерного чипа.

Команда исследователей IBM продемонстрировала, что их нанофотонный коммутатор обладает рядом ценных характеристик, что делает его идеальным элементом для применения на "микросхемном" уровне.

Во-первых, коммутатор чрезвычайно миниатюрен. На одном квадратном миллиметре можно разместить — рядом друг с другом — до 2000 таких микроустройств, что позволяет с легкостью удовлетворить требования по плотности упаковки элементов будущих многоядерных процессоров.

Во-вторых, устройство способно маршрутизировать большие объемы данных, поскольку одновременно могут коммутироваться световые потоки различной длины волны (или цветового спектра). Каждый световой сигнал определенной длины волны может "переносить" данные со скоростью вплоть до 40 Гбит/с; таким образом, оптический коммутатор может обеспечивать суммарную пропускную способность, превышающую 1 Тбит/с, что согласуется с требованиями по быстродействию обмена данными между "удаленными" процессорными ядрами компьютерного чипа.

И, наконец, последнее, но не менее важное обстоятельство: исследователи IBM впервые продемонстрировали, что их оптический коммутатор способен работать в реальной среде "микроспроцессора на кристалле" (*"on-chip"*) — иными словами, в условиях, когда собственная температура чипа может меняться в широких пределах вблизи "активных точек" (*"hot-spots"* — ячеек памяти, к которым происходит одновременное обращение нескольких процессорных ядер); при этом активные точки "перемещаются" в зависимости от режима работы процессора в данный момент времени. По мнению ученых IBM, способность устойчиво функционировать в условиях больших температурных колебаний является одним из важнейших требований, предъявляемых к внутренним оптическим сетям процессорного чипа.

Одно из наиболее актуальных направлений развития современной микроэлектронной индустрии — достижение высокой степени параллелизма вычислений путем реализации многопоточного режима путем построения крупномасштабных многокристалльных (*multi-chip*) систем и, в последнее время, путем увеличения числа ядер на одном кристалле. Так, например, процессор IBM Cell, которым оснащаются игровые приставки Sony PlayStation 3, содержит девять ядер в одном чипе. Посколь-

ку требования к вычислительной производительности продолжают устойчиво расти, разработчики процессоров планируют увеличить число ядер до десятков или даже до сотен.

Такой подход к повышению вычислительной производительности, тем не менее, имеет смысл, если каждое ядро будет способно получать и передавать большие сообщения всем остальным ядрам процессора в параллельном режиме. Отдельные ядра современных многоядерных микропроцессоров обмениваются друг с другом данными по миллионам тончайших медных проводников. Эти медные межсоединения, однако, характеризуются значительной потребляемой (рассеиваемой) мощностью и неспособны передавать большие объемы данных, что требуется для эффективной работы многоядерных процессоров.

Исследователи IBM изучают альтернативное решение этой проблемы путем связывания ядер друг с другом с помощью световых импульсов внутренней оптической сети чипа, основанной на кремниевых нанофотонных интегральных схемах. Эта сверхминиатюрная "сеть на кристалле", подобно разветвленной волоконно-оптической компьютерной сети, будет обеспечивать и информационный обмен между ядрами, и маршрутизацию сообщений, которые кодируются импульсами света. Предполагается, что, используя свет вместо проводов, можно передавать почти в 100 раз больше информации между процессорными ядрами и расходовать при этом в 10 раз меньше мощности, выделяя, соответственно, меньше теплоты.

Отчет о проделанной учеными IBM работе, озаглавленный *"High-throughput silicon nanophotonic wavelength-insensitive switch for on-chip optical networks"* ("Кремниевый нанофотонный коммутатор с высокой пропускной способностью и поддержкой светового потока любой длины волны, предназначенный для использования во внутренних оптических сетях интегральной микросхемы на кристалле"), подготовленный Юрием Власовым, Уильямом М. Дж. Грином (*William M. J. Green*) и Фэнниань Ся (*Fengnian Xia*) из научно-исследовательского центра IBM им. Т. Дж. Уотсона (*IBM TJ Watson Research Center*, Йорктаун Хейтс, штат Нью-Йорк), будет опубликован в апрельском номере журнала *Nature Photonics* за этот год. Данная работа выполнялась при поддержке Управления перспективных исследований Министерства обороны США (*Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA*) в рамках программы *"Slowing, Storing and Processing Light"* ("Замедление, хранение и обработка света").

Дополнительную информацию об анонсированной сегодня разработке, а также о проекте IBM по созданию нанофотонных устройств можно получить на Web-сайте IBM по адресу <http://www.research.ibm.com/photronics>.



**НПК  
"ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
ЦЕНТР" МИЭТ —  
20 ЛЕТ**

## **Штрихи к истории создания НПК "Технологический центр" МИЭТ**

Процесс развития идеи до конкретного технического изделия многоэтапен. Выделение каждого из этапов достаточно условно. Например, этап фундаментальных и экспериментальных исследований природных явлений и материалов, этап формирования идеи изделия, создания макетной конструкции и прототипа и, наконец, серийное производство. Как правило, эти этапы осуществляются разными группами людей или организаций. Принципы разделения при этом могут различаться для разных стран или регионов. В СССР и РФ этап фундаментальных исследований чаще всего проводился в рамках академических институтов, так как требовал глубоких, а поэтому и специализированных исследований. Результаты этих исследований, вместе с тем, могли служить основой для многообразного использования при создании различных технических изделий. В их конструкциях заложено использование результатов различных фундаментальных исследований, т. е. для них характерна междисциплинарность. Для каждого типа изделий она не безгранична и реализовалась в форме отраслевых НИИ и КБ. Отраслевые НИИ могли быть ориентированы на создание достаточно широкой номенклатуры комплектующих изделий материалов и производственных технологий для серийного производства. Узким местом была трудность проверки эффективности разработанных технических решений, т. е. возможность создания пилотных образцов и прототипов. КБ, в отличие от НИИ, имели в своем составе опыт-

ное специализированное производство. Большим достижением министра электронной промышленности А. И. Шокина было создание опытных производств при ведущих НИИ отрасли. Эта идея была воплощена в НПО "Научный центр" в Зеленограде.

В изложенной схеме роль вузов практически сводилась к обеспечению кадрами каждого из этапов исследований и создания изделий. При этом возникала проблема "доучивания" молодого специалиста для работы в конкретном НИИ или КБ. Эта проблема была решена в рамках физтеховской модели подготовки специалистов, которая была развита в МИЭТ на базе подразделения НПО "Научный центр".

Конечно, в вузах СССР в большей или меньшей степени проводилась научная деятельность, но относились к ней как к второстепенной задаче. Это выражалось, прежде всего, в ее низком финансировании. Определенным решением было создание в вузах отраслевых исследовательских лабораторий, которые финансировались отраслями. Некоторые из них стали признанными в отрасли научными подразделениями. В качестве примера приведем ОНИЛ вычислительных средств и систем управления Министерства оборонной промышленности под руководством первого ректора МИЭТ Л. Н. Преснухина.

На первом этапе была поставлена задача превращения МИЭТ в исследовательский университет, финансирование научной деятельности которого превышало бы финансирование учебной деятельности. Для этого все выпускающие кафедры должны были иметь ОНИЛ. На ряде кафедр удалось создать и несколько ОНИЛ. Их общее число достигло 22. В том числе была создана ОНИЛ по разработке субмикронных технологий интегральных микросхем при кафедре ФТИМС, которая получила от предприятий МЭП различное технологическое оборудование. На нем можно было проводить отдельные технологические процессы, но нельзя было сделать хотя бы простую ИС. Было решено создать учебно-научную лабораторию с полным технологическим циклом, вклю-

чая технологию "чистых" комнат. С помощью предприятий НПО НЦ эту задачу удалось решить. Была создана единственная в СССР кафедральная учебно-научная лаборатория технологий ИС. Коллектив участников этого проекта получил (за 1986 год) Золотую медаль ВДНХ (руководитель лаборатории Н. М. Луканов).

Этот опыт показал, что в вузе можно создать производственную структуру микроэлектроники. В конце 80-х годов МЭП приняло решение о проектировании (МГСПИ 1) корпуса МИЭТ для научно-исследовательских подразделений. Был начат нулевой цикл строительства. Удалось убедить министра А. И. Шокина и первого заместителя министра В. Г. Колесникова в целесообразности перепланирования корпуса. В результате первый этаж был поднят на 2,5 м, в нем были размещены "чистые" комнаты, были перепланированы другие помещения корпуса, включая подвал, был спроектирован дополнительно энергетический корпус. Предметом обсуждения стало оборудование для производства ИС. Первоначально было желание получить автоматизированную линию "Лада-1", созданную в МЭП по идее В. А. Лабунова. В. Г. Колесников аргументировано доказал, что для задачи исследовательского центра эта линия не целесообразна. В результате МЭП поставил универсальное и самое современное (на то время) технологическое оборудование, включая установки электронной литографии и комплексы проектирования "Кулон-1". По уровню оснащения технологический блок МИЭТ превосходил многие предприятия МЭП. Надо отметить, что хотя идея вузовского микроэлектронного центра родилась на основе опыта создания таких центров за рубежом (США, Нидерланды, Бельгия), наш центр по идеологии отличался и отличается от них. В зарубежных центрах чаще всего исследуются отдельные технологические процессы и отдельные конструкционные элементы ИС. Уровень этих исследований отвечает самым передовым нормам микроэлектроники, что связано с наличием самых современных единиц технологического оборудования. Нами с самого начала была поставлена задача создания исследовательского замкнутого микроэлектронного цикла с возможностью диверсификации технологических процессов. На технической базе, созданной благодаря МЭП, ее удалось решить за счет знаний и огромного энтузиазма сформированного коллектива ТЦ. Основой его послужили выпускники МИЭТ, получившие первоначальную практи-

ку на предприятиях Зеленограда и кафедрах МИЭТ, а также часть опытных специалистов, ранее работавших на микроэлектронном производстве. Они достраивали помещения, запускали оборудование, осваивали технологии производства и проектирования, не считаясь со временем. Существенным моментом был выбор базовых технологий и конструкций изделий, которые должны исследоваться и разрабатываться с помощью этой технологической базы. Как известно, до сих пор КМОП-технология была и остается ведущей в микроэлектронике. Поэтому именно КМОП-технология и была выбрана в качестве базовой. Уже на момент создания ТЦ стало ясно, что советская микроэлектроника стала отставать от мирового уровня, не имея возможности поддерживать современные технологические нормы. Необходимо было выбрать нишу производства, где требования минимальных литографических размеров менее существенно или их можно обойти. Одним направлением по предложению Ю. А. Чаплыгина, тогда проректора по научной работе МИЭТ, стало развитие кремниевых датчиков, которые создаются на базе технологических процессов микроэлектроники. В дальнейшем это направление переросло в создание МЭМС различного назначения. Другим направлением стала разработка полужаказных интегральных схем на основе базовых матричных кристаллов (БМК) и использование метода самоформирования для достижения минимальных размеров нелитографическим методом. Здесь существенный вклад внес А. Н. Сауров, назначенный директором одновременно с созданием Технологического центра.

Таким образом, была сформирована задача создания вузовского учебно-научно-производственного центра, уникального по своим целям не только для нашей страны, но и в мировой практике. Благодаря тесному контакту с научным коллективом МИЭТ и со специалистами предприятий Зеленограда ТЦ быстро прошел путь становления и получил признание заказчиков из различных отраслей промышленности за качество своих исследований и разработок, надежность партнерских отношений.

В 1994 г. ТЦ получил статус Государственного научного центра РФ. В 2002 г. группа исследователей и разработчиков ИС из ТЦ стали лауреатами премии правительства РФ за цикл работ по созданию элементной базы для разработки радиоэлектронной аппаратуры нового поколения.

В 2008 г. лауреатами этой же премии стала еще одна группа сотрудников ТЦ за разработку и вне-

дрение в серийное производство кремниевых микроэлектронных датчиков.

Коллектив ТЦ не снижает темпов своего развития, постоянно расширяя круг деятельности, осваивая новые технологии ИС и МЭМС, разработку радиоэлектронной аппаратуры и устройств на базе нанотехнологий. Все это стало возможно благодаря постоянной поддержке коллег из МИЭТ, РАН, НИИ и предприятий промышленности — заказчиков исследований, разработок и изделий ТЦ.

Отмечая 20-летний юбилей ТЦ, хотелось бы еще раз поблагодарить всех, кто способствовал становлению Центра: руководителей министерства и предприятий электронной промышленности СССР, особенно Ю. Н. Дьякова и А. Т. Яковлева; проектировщиков МГСПИ 1; строителей "Зеленоградстроя"; ведущих специалистов НПО "Научный центр". Мы благодарны администрации и городским службам города Зеленограда, прежде всего А. А. Ищуку, за поддержку в трудные 90-е

годы, позволившую ТЦ продолжить свою работу в постоянном режиме.

В настоящее время, став самостоятельной научной организацией, ТЦ на основе тесного взаимодействия с МИЭТ продолжает развивать свои традиционные связи с различными научными организациями — заказчиками, институтами РАН, российскими и зарубежными вузами. Постоянно обновляется парк оборудования, расширяется спектр технологий и исследований, разработок и производства по своим научным направлениям: микроэлектроники, микросистемной техники, радиоэлектронной аппаратуры и нанотехнологии. Именно в сочетании этих направлений коллектив ТЦ видит гарантию своего успешного развития в будущем.

В. Д. Вернер,  
проф., д-р физ.-мат. наук,  
ректор МИЭТ 1988—1998 г., председатель НТС  
НПК "Технологический центр"

---

---

## Секция Совета по присуждению премий Правительства Российской Федерации в области информационных технологий и вычислительной техники

<http://www.rg.ru/2008/03/05/premii-dok.html>

### ПОСТАНОВЛЕНИЕ ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ОТ 27 ФЕВРАЛЯ 2008 Г. № 121, г. МОСКВА

### "О ПРИСУЖДЕНИИ ПРЕМИЙ ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ 2007 ГОДА В ОБЛАСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ"

Опубликовано 5 марта 2008 г.

Рассмотрев предложения Межведомственного совета по присуждению премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники, Правительство Российской Федерации постановляет:

Присудить премии Правительства Российской Федерации 2007 года в области науки и техники и присвоить звание "Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники":

3. Карабанову Сергею Михайловичу, доктору технических наук, доценту, генеральному директору открытого акционерного общества "Рязанский завод металлокерамических приборов", руководителю работы, Баскакову Игорю Алексеевичу, главному инженеру, Быкову Александру Николаевичу, кандидату химических наук, начальнику лаборатории, Воиновой Нине Петровне, заместителю генерального директора, Каравалису Владимиру Васильевичу, начальнику лаборатории, Локштановой Ольге

Григорьевне, кандидату технических наук, ведущему инженеру-химику, Майзельсу Рафаилу Михайловичу, главному конструктору, начальнику отдела, Ясевич Альбине Николаевне, главному технологу, заместителю начальника отдела, — работникам того же акционерного общества; Кальнову Владимиру Александровичу, кандидату технических наук, ученому секретарю государственного учреждения "Физико-технологический институт Российской академии наук", — за разработку и промышленное освоение современных элементов коммутационной техники (герконов) и изделий на их основе.

4. Амеличеву Владимиру Викторовичу, кандидату технических наук, начальнику лаборатории государственного учреждения "Научно-производственный комплекс "Технологический центр" Московского государственного института электронной техники", Дягилеву Владимиру Владимировичу, начальнику опытного производства, Саурову Александру Николаевичу, доктору технических наук, профессору, директору, Тарасову Валерию Алексеевичу, научному сотруднику, — работникам того же учреждения; Золотову Игорю Юрьевичу, доктору технических наук, профессору, председателю Секции прикладных проблем при президиуме Российской академии наук; Резневу Алексею Алексеевичу, доктору технических наук, профессору, командиру подразделения войсковой части 68240; Тимошенко Сергею Петровичу, доктору технических наук, заведующему кафедрой государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный институт электронной техники (технический университет)", Чаплыгину Юрию Александровичу, члену-корреспонденту Российской академии наук, ректору того же учреждения; Шелепину Николаю Алексеевичу, доктору технических наук, заместителю генерального директора — главному конструктору открытого акционерного общества "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод "Микрон"; Зиминову Виктору Николаевичу (посмертно) — за разработку и внедрение в серийное производ-

ство кремниевых интегральных микроэлектронных датчиков.

5. Уладинову Александру Бадминовичу, кандидату технических наук, управляющему закрытого акционерного общества "Научно-производственное предприятие "Проект-техника", руководителю работы, Кардашенко Михаилу Зиновьевичу, председателю совета директоров, Ухову Виктору Николаевичу, техническому директору, — работникам того же акционерного общества; Ануфриеву Борису Григорьевичу, кандидату технических наук, ведущему научному сотруднику государственного научного учреждения "Государственный научно-исследовательский институт системного анализа Счетной палаты Российской Федерации"; Дружину Олегу Вячеславовичу, заместителю начальника управления федерального государственного унитарного предприятия "Предприятие по поставкам продукции Управления делами Президента Российской Федерации", Масановцу Валентину Викторовичу, кандидату технических наук, начальнику управления того же предприятия; Преснякову Николаю Ивановичу, кандидату технических наук, доценту, генеральному директору общества с ограниченной ответственностью "Аналитическо-консультационное бюро по автоматизированным строительным системам "АСС-бюро"; Шевченко Виктору Григорьевичу, кандидату философских наук, профессору, президенту общероссийской общественной организации "Академия проблем безопасности, обороны и правопорядка"; Шемигону Николаю Николаевичу, генеральному директору федерального государственного унитарного предприятия "Специальное научно-производственное объединение "Элерон", — за создание и внедрение новых высокоэффективных технологий, оборудования и мобильных автоматизированных комплексов для оперативного выпуска высококачественной полноцветной печатной продукции.

Председатель Правительства  
Российской Федерации В. Зубков  
*"Российская газета" — Федеральный выпуск  
№ 4604 от 5 марта 2008 г.*

***Редакция поздравляет лауреатов!***

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Решением ВАК Минобразования России журнал "Нано- и микросистемная техника" включен в перечень научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (Бюллетень ВАК Минобразования России, 2003, № 2).

При подготовке рукописей статей просим руководствоваться следующими рекомендациями.

Объем статьи, предлагаемой к публикации, не должен превышать 15 страниц машинописного текста, напечатанного на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через два интервала (не более 30 строк и 60 знаков в строке на странице, шрифт размером 12...14).

В объем статьи входят:

текст;

иллюстрации;

таблицы;

библиография.

В редакцию представляются в двух экземплярах:

текст статьи, подписанный всеми авторами с указанием даты представления;

иллюстрации, подписанные на обороте карандашом с указанием фамилии автора, номера иллюстрации и названия статьи;

ключевые слова на русском и английском языках;

перечень подрисуночных подписей;

аннотация размером не более 5—7 строк на русском и английском языках;

фамилии, инициалы авторов и название статьи — на английском языке;

сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, занимаемая должность, домашний и служебный адреса и телефоны, факс и E-mail).

Обязательными элементами оформления статьи являются:

индекс УДК;

инициалы и фамилии авторов;

ученая степень;

название организации (полное в соответствии с последней редакцией устава);

заглавие;

аннотация.

Формулы, буквенные обозначения, цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми. Во втором экземпляре простым карандашом размечаются все символы и тексто-

вые выделения: буквы — двумя черточками (прописные — снизу, строчные — сверху); верхние и нижние индексы (включая штрихи и степени) очерчиваются дужками; полужирный шрифт подчеркивается прямой линией, курсив — волнистой линией, а разрядка — короткими штрихами. Следует обратить внимание на четкость математических знаков и сходных по начертанию букв (прописных и строчных, латинского и греческого алфавитов).

Иллюстрации выполняются с учетом последующего воспроизведения их средствами оперативной полиграфии (с использованием сканера): штриховые (чертежи, схемы, графики, рисунки) — программно, с использованием графических редакторов, или вручную (черной тушью или пастой) на белой плотной бумаге; тоновые (фотографии) — на матовой бумаге с высокой контрастностью.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

для книг и сборников — фамилии и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год и желательное общее число страниц;

для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год, том, номер и номера страниц;

если число авторов более четырех, то необходимо указать первых трех со словами "и др.";

ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений.

Статьи, набранные на компьютере, желательнее представлять как в виде распечатки на принтере (рисунки на лазерном принтере), так и в электронном виде, выполненном в текстовом редакторе Microsoft Word.

Статьи направлять по адресу: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4, издательство "Новые технологии", редакция журнала "Нано- и микросистемная техника", электронные версии по адресу: it@novtex.ru. Тел./факс (495)269-55-10.

Оформить подписку на журнал можно по каталогу Агентства "Роспечать" (индекс 79493) и по объединенному каталогу "Пресса России" (индекс 27849).

Требования к статьям соответствуют решению Президиума ВАК России от 7 марта 2008 г. и системе Российского индекса научного цитирования.

# АНОНС ВЫСТАВКИ SIMEXPO — НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2008

Научный совет РАН по научному приборостроению,  
Компания "И. Джей Краузе & Эсоушиэтс"

при поддержке

Российской академии наук,  
Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии  
Российского фонда фундаментальных исследований,

в период с 13 по 15 октября 2008 года

проводят 2-ю Международную специализированную выставку приборов  
и оборудования для научных исследований

**"SIMEXPO — Научное приборостроение-2008"**

## МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ

г. Москва, МВЦ "КРОКУС-ЭКСПО", Зал № 1  
павильона 1.

## ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

"SIMEXPO — Научное приборостроение-2008" — единственная в России, уникальная специализированная выставка, дающая возможность специалистам ознакомиться с научными разработками и новейшими технологиями, применяемыми в различных областях науки в рамках одной специализированной выставки.

В выставке принимают участие ведущие отечественные и зарубежные компании, предприятия и организации — производители научных приборов и оборудования, предназначенных для исследований во всех областях современной науки, компонентов и материалов для производства и эксплуатации научных приборов, а также представительства и официальные дилеры ведущих зарубежных компаний.

В состав Экспертного совета Выставки входят известные ученые, руководители отраслевых организаций. Экспертный совет выставки возглавляет Председатель научного совета РАН по научному приборостроению академик Крохин Олег Николаевич.

## РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ

- ◆ **Измерительные, испытательные, аналитические и лабораторные приборы, оборудование и системы для научных исследований:**

- в области физических наук
- в области химических наук
- в области биологических наук
- в области биотехнологии
- в области медицинских наук
- в области экологических наук
- в области геологических наук
- в области сельскохозяйственных наук
- в области информатики
- в области экспериментальной механики
- в области нанотехнологий
- в космических исследованиях
- ◆ **Научное и технологическое оборудование**
- ◆ **Контрольно-измерительные приборы и оборудование**
- ◆ **Средства автоматизации и интерпретации научных результатов**
- ◆ **Компоненты и материалы для производства приборов, оборудования и систем**

## ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

В рамках выставки пройдут тематические семинары, заседания круглых столов, презентации. Будут организованы консультационные центры, а также конференция для специалистов отрасли.

### Цели проведения выставки

- Предоставление возможности специалистам академического, вузовского, отраслевого секторов науки ознакомиться с научными разработками и новейшими технологиями, приме-

- няемыми в различных отраслях науки, в рамках единой специализированной выставки.
- Презентация новых разработок в области современного научного приборостроения.
  - Развитие кооперационных связей производителей продукции с поставщиками и потребителями.
  - Расширение рынка сбыта продукции.
  - Расширение и укрепление межрегионального и международного делового сотрудничества.
  - Привлечение инвестиций для реализации перспективных разработок и проектов, развитие инновационных процессов.

- Демонстрация необходимости использования современного оснащения аналитических и испытательных лабораторий для обеспечения конкурентоспособного уровня производства.
- Акцентирование внимания государственных структур на проблемах отрасли.

## УЧАСТНИКИ ВЫСТАВКИ

В выставке примут участие около 120 ведущих предприятий, организаций и компаний России и стран СНГ, дилеры и дистрибьюторы, а также представительства, профессиональные ассоциации и специализированные издания.

---

---

## ИЗДАТЕЛЬСТВО ТЕХНОСФЕРА ГОТОВИТ К ВЫХОДУ КНИГИ:

### Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника

Мировые достижения — 2008 год

Сборник под редакцией д. т. н., профессора  
П. П. Мальцева

Москва: Техносфера, 2008. — ок. 416 с.  
ISBN 978-5-94836-180-2

Данная работа является продолжением серии книг издательства "Техносфера" по мировым достижениям в области нанотехнологий. Книга охватывает материалы, опубликованные в 2006—2008 гг. в журнале "Нано- и микросистемная техника" и сгруппированные по разделам, охватывающим наноматериалы, наноэлектронику, нанодатчики и наноустройства, диагностику наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологию и применение нанотехнологий в медицине. В цветном издании представлены примеры реализации и применения в области технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологическое обеспечение и основы технологии наносистемной техники.

По просьбе читателей в книгу введен новый раздел — АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ.

Сборник представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологий, наноматериалов, наноэлектроники, микро- и наносистемной техники.

### Наноструктурные покрытия

Под редакцией А. Кавальеро, Д. Хоссона

Москва: Техносфера, 2008.

ISBN 978-5-94836-182-6

В книге представлены материалы по наноструктурированным покрытиям, рассмотрены их свойства и характеристики, описаны экспериментальные модели, дано исчерпывающее представление о текущем состоянии дел в этой важнейшей сфере. В сборник вошли статьи выдающихся авторов-исследователей, мнения тщательно отобранных ведущих экспертов мирового уровня, чтобы материалы экспертизы ученых в области нанокристаллических материалов дополнялись данными инженеров о воздействии и характеристиках этих покрытий. Эта особенность книги отличает ее от других публикаций в данной области.

Сборник предназначен для широкого круга читателей, в том числе аспирантов, профессоров и других представителей академических кругов, а также исследователей из промышленной сферы и инженеров, заинтересованных возможностями практического применения наноструктурированных материалов.

*Подробная информация о книгах, выпускаемых издательством ТЕХНОСФЕРА, на сайте: <http://www.technosphere.ru>*

*Заявки на книги принимаются по адресу [sales@technosphere.ru](mailto:sales@technosphere.ru)*

## **НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"**

**Альтман Ю.**

**Военные нанотехнологии**

**Возможности применения и превентивного контроля вооружений**

Издание 2-е, дополненное и исправленное.

**Москва: Техносфера, 2008. — 424 с.**

**ISBN 978-5-94836-175-8**

**Цена: 325 р.**

Книга является первым систематическим обзором потенциальных военных приложений нанотехнологий. В ближайшие 10—20 лет могут быть созданы сверхмалые компьютеры, более легкие и прочные материалы, новые типы оружия и даже имплантанты, вводимые в организм военнослужащих. Перспективы военных нанотехнологий рассматриваются прежде всего с точки зрения международной безопасности и предотвращения новой гонки вооружений.

Монография полезна для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, студентов и аспирантов, бакалавров и магистров, специализирующихся в области нанотехнологий и наноматериалов, микро- и наносистемной техники.

**Фостер Л.**

**Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности**

**Москва: Техносфера, 2008. — 336 с.**

**ISBN 978-5-94836-161-1**

**Цена: 420 р.**

В предлагаемой книге авторы — известные ученые и бизнесмены, занимающиеся теоретическими и практическими проблемами нанотехнологий, — описывают состояние дел и перспективы их развития на ближайшее десятилетие, а также возможное воздействие нанотехнологий на глобальные процессы.

Книга предназначена для широкого круга читателей: научных работников, специалистов, а также студентов профильных учебных заведений.

*Подробная информация о книгах, выпускаемых издательством ТЕХНОСФЕРА, на сайте: <http://www.technosphere.ru>*

*Заявки на книги принимаются по адресу [sales@technosphere.ru](mailto:sales@technosphere.ru)*

# CONTENTS

<b>Abramov I. I.</b> <i>The "Element" Term in Micro- and Nanoelectronics</i> . . . . .	2
<b>Rekhiashvili S. Sh., Kishtikova E. V., Rozenberg B. A.</b> <i>Nanoparticles Nucleation Kinetics in Solutions with Well Adsorbed Organic Combinations</i> . . . . .	4
<b>Moiseev K. M., Norman E. D., Bulygina E. V., Panfilov Yu. V., Petrukhin G. N., Krasulin G. A.</b> <i>Research of CNT Field Emission Characteristics Formed on Synthetic Opal Matrix</i> . . . . .	10
<b>Kartashev V. A., Kartashev V. V.</b> <i>Investigation of STM Tip Motion Relatively Surface</i> . . . . .	13
<b>Rembeza E. S., Rembeza S. I., Ermolina E. A., Grechkina M. V.</b> <i>Structure and Electrical-Physical Properties of Nanocomposite Sn—Y—O</i> . . . . .	19
<b>Kakurin Yu. B., Zaharov A. G., Kotov V. N.</b> <i>Modelling of Mass-Transfer in Heterogeneous Semiconductor Structures</i> . . . . .	22
<b>Doroshevich V. K.</b> <i>Requirements to Maintenance of Quality and Management of Technological Process of Manufacturing of Microcircuits</i> . . . . .	26
<b>Mukhurov N. I., Efremov G. I., Zhvavyi S. P.</b> <i>The Analysis of Electromechanical Parameters of Electrostatic Microrelays with Independent Holders</i> . . . . .	28
<b>Belozubov E. M., Belozubova N. E.</b> <i>Thermoelectric Phenomena in Thin-Film Resistive-Strain Pressure Sensors under Vibration Acceleration and Unsteady Temperature Influence</i> . . . . .	33
<b>Lihosherst V. V.</b> <i>Comparative Analysis of Micromechanical Accelerometers Characteristics Direct and Compensatory Measurement</i> . . . . .	38
<b>Deulin E. A.</b> <i>Gas Flow Friction Process Research with the Tubes Wall of Arterial Pipe Line as a Reason of "Hydrogen Illness"</i> . . . . .	43
<b>Mikhailov V. P., Akimov I. Yu., Bazinenkov A. M.</b> <i>Semi-Active and Active Rheology Vibroisolation System</i> . . . . .	51
<b>Rzjanina A. V., Usanov D. A., Skripal An. V., Ostrovskiy N. V., Kozlov V. V., Tkachev A. G., Skripal Al. V.</b> <i>Biological Tolerance Estimation of Carbonic Nanostructure with Cells of Fibroblast of Chinese Hamster V-79</i> . . . . .	57
<b>Elinson V. M., Yurovskaya M. A., Ovchinnikova N. S., Lyamin A. N., Nezhmetdinova R. A.</b> <i>Creation of Nanocomposite Biomaterial of New Generation on the Base of Nanostructured Artificial Polimers and Organic Derivatives of Fulleren [60]</i> . . . . .	60

**For foreign subscribers:**

*Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)*

*The journal bought since november 1999.*

*Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev*

**ISSN 1813-8586.**

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(495) 269-5510.**

**E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru); <http://www.microsystems.ru>**

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала **(495) 269-5510**. E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *О. А. Шановалова*

Сдано в набор 11.04.2008. Подписано в печать 23.05.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,82. Заказ 501. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15