

МСТ

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 1 ✦ 2004**МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

Выпускается при содействии

Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации,
Министерства образования Российской Федерации,
Российской Академии наукИздается с 1999 г.
ISSN 1684-6419**Главный редактор**

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционная коллегия:

Антонов Б. И.

Аристов В. В.

Белоус А. И.

Быков В. А.

Васильев А. А.

Васильев В. В.

Волчихин В. И.

Гапонов С. В.

Горнев Е. С.

Градецкий В. Г.

Журавлев П. В.

Захаревич В. Г.

Калиев И. А.

Кальнов В. А.

Карякин А. А.

Климов Д. М.

Кузин А. Ю.

Лифшиц В. Г.

Мокеров В. Г.

Мокров Е. А.

Никитов С. А.

Норенков И. П.

Панич А. Е.

Панфилов Ю. В.

Петросян К. О.

Петрунин В. Ф.

Путилов А. В.

Пятышев Е. Н.

Сауров А. Н.

Сигов А. С.

Станкевич В. Г.

Старостин А. К.

Степанов Ю. И.

Сухопаров А. И.

Телец В. А.

Чаплыгин Ю. А.

Редакция:

Безменова М. Ю.

Григорин-Рябова Е. В.

Лысенко А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ**ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ**

Суховеев С. П. Волоконные МЭМС и НЭМС 2

Шалобаев Е. В., Монахов Ю. С. Обзор разработок микроактоаторов на основе лазерных технологий и предложения по перспективам их развития . . 12

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

Слесарев Ю. Н. Искажения при термомагнитной записи информации 17

Драгунов В. П. Влияние формы упругого элемента на характеристики микроэлектромеханических систем. 20

НАНОТЕХНОЛОГИИ

Царева С. Ю. Влияние природы катализатора и параметров синтеза на морфологию многослойных углеродных нанотрубок, получаемых методом каталитического пиролиза углеводородов. 26

Серов И. Н., Лукьянов Г. Н., Марголин В. И., Потсар Н. А., Солтовская И. А., Фантиков В. С., Тупик В. А. Получение и исследование наноразмерных пленок меди с фрактальной структурой 31

Тодуа П. А., Быков В. А., Волк Ч. П., Горнев Е. С., Желкбаев Ж., Зыкин Л. М., Ишанов А. Б., Каледин В. В., Новиков Ю. А.,

Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В., Саунин С. А., Черняков В. Н. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию (I часть) 38

СТРАНИЧКА РФФИ 45**ИНФОРМАЦИЯ** 47

Contents 48

Аннотации статей журнала на русском и английском языках доступны по сети Internet по адресу: <http://www.microsystems.ru>.Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Строгинский пер., 4. Телефон редакции журнала (095) 269-5510. E-mail: it@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 018929 от 10.06.99.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор М. Г. Джавадян

Сдано в набор 03.11.2003. Подписано в печать 08.12.2003. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 7,84. Уч.-изд. л. 7,20. Заказ 20. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии ГУП ЧПК, 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 25

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 621.3.049.77.002.5

С. П. Суховеев, канд. техн. наук,
ЗАО "МНТК РОБОТ", г. Москва,
e-mail: sergeypp@stk.mmtel.ru

ВОЛОКОННЫЕ МЭМС И НЭМС

Обсуждаются перспективы использования волоконной технологии в создании микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС) для микророботов, в частности, летательного аппарата с размерами 1–2 см.

Введение

Создание автономных мобильных сенсорных микроустройств (микророботов) и сенсорных сетей на их основе в настоящее время является качественно новым этапом развития микросистемной техники. В глобальном масштабе сенсорные сети будут осуществлять мониторинг окружающей среды планеты, в масштабе государства они смогут выполнять такие функции, как, например, охрана государственной границы, инспекция необслуживаемых помещений атомных электростанций и вредных производств, отслеживание ситуации в зонах эпидемии или стихийного бедствия и т. д.

Одной из главных особенностей создания мобильных микророботов является принцип их компоновки, обусловленный тем, что предельно малые по заданным габаритным размерам и массе детали и узлы микророботов должны быть многофункциональными, а их число в идеале должно быть равно единице (одна деталь — один микроробот). В реальности создание идеальной конструкции практически неосуществимо. Действительно, одно только краткое перечисление жизненно важных узлов мобильных микророботов (бортовой источник питания, двигатель, борт-

вой контроллер, сенсорное устройство, приемопередатчик) говорит само за себя. Базовыми для создания различных устройств автономных микророботов являются твердотельные технологии микроэлектроники. Однако таким устройствам свойственны, по крайней мере, два недостатка:

- они имеют преимущественно планарную конструкцию;
- значительная часть массы подложки, на которой они изготовлены, функционально не загружена, что особенно чувствительно для летающих микророботов.

В последнее время при разработке 3D-устройств "комплекс планарности" кремниевой микромеханики "преодолевают", создавая планарные конструкции, шарнирно подвешенные детали которых способны изменять и устойчиво удерживать свое положение в пространстве с помощью встроенных электромагнитных или электростатических актуаторов [1]. Другим способом является применение неплоских, например цилиндрических, жертвенных подложек и гибких фотшаблонов [2]. Развитие известной LIGA-технологии существенно расширило возможности дизайна при создании 3D-МЭМС, но эта технология по-прежнему остается весьма дорогой.

Целью этой статьи является демонстрация возможностей волоконной технологии МЭМС, разработанной в России как недорогой и удобный инструмент для промышленного изготовления 3D-микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС, НЭМС). В качестве иллюстрации ее возможностей выбран разработанный автором подход к созданию автономных летающих микророботов с габаритными размерами 1–2 см [3].

Волоконная технология

Свое название волоконная технология получила в силу того, что исходной для последующих процессов изготовления конечного изделия является микроструктура, выполненная в виде волокнистого композита. В общем случае используемые волокна могут быть полимерными, стеклянными или иными другими, но на сегодняшний день эта технология разработана преимущественно для стекла и поэтому часто называется стекловолоконной. Волоконной технологии МЭМС и НЭМС предшествовала хорошо известная в электронной промышленности технология микроканальных пластин (МКП) — мультиканальных умножителей электронов. До 60–70 % площади таких пластин толщиной ~400 мкм составляют идентичные цилиндрические каналы диаметром от нескольких единиц до десятков микрометров. Технология позволяет получать такие пластины с общей долей суммарной площади поперечных сечений каналов до 90 %, и это обстоятельство было использовано для изготовления сверхтонких вакуумно-плотных фильтров мягкого рентгеновского излучения, выполняю-

щих одновременно роль выпускного окна в каналах вывода пучка синхротронного излучения кольцевого ускорителя-накопителя электронов [4]. В таком фильтре геометрически высокопрозрачная МКП выполняет роль поддерживающей структуры для тонкой пленки-фильтра. Известны и другие примеры нетрадиционного использования МКП. Например, в работе [5] описано их применение для интенсивных молекулярных пучков. В этом устройстве 10-микрометровые каналы МКП выполняли роль механических масс-сепараторов атомов и молекул, которые после прохождения канала в зависимости от их массы выстраивались на различном расстоянии от оси канала. В последние годы новый интерес к применению МКП-структур вызван интенсивным развитием квантовых устройств. В частности, в работе [6] сообщается о разработке МКП с диаметром отверстий каналов и толщиной стенок между ними ~ 33 нм. При этом плотность отверстий составляет $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Потенциал использования таких структур, по мнению авторов, весьма высок, поскольку каналы структуры могут быть заполнены материалами с различными свойствами (полимерами, металлами, полупроводниками III—V и II—VI групп, цеолитами и т. д.).

В 1989 г. С. П. Суховеев и Э. П. Колеров, сотрудники московского НИИ вакуумной техники им. С. А. Векшинского, предложили конструкцию толстого стекловолоконного рентгеновского шаблона с ультравысоким аспектным отношением [7]. В отличие от МКП, в этих шаблонах из свинцового стекла профиль каждого из отверстий может быть любым наперед заданным. Разработка технологии изготовления рентгеношаблона была осуществлена в саратовском НИИ машиностроения под руководством В. И. Белоглазова (в настоящее

время волоконная технология сосредоточена на предприятии ТОСС, г. Саратов, www.tegs.ru). Это был первый, еще не осознанный, шаг на пути к созданию волокнистых МЭМС и НЭМС. Не осознанный, поскольку авторы, создавая этот рентгеношаблон как технологический инструмент для LIGA-технологии, в результате получили принципиально новый продукт-микроструктуру, который по своим геометрическим параметрам превосходил 3D-микроструктуры, которые способны произвести сама LIGA-технология. Более того, себестоимость этого нового продукта оказалась ошеломляюще низкой, а особенности волоконной технологии давали принципиально новую возможность в производстве объемных микроструктур — в одном и том же технологическом процессе получать геометрически подобные микроструктуры в любом заданном масштабе. Автор данной статьи предложил наполнять каналы низкотемпературным сплавом для создания встроенных проводов или электродов и на этой основе разработал конструкцию стекловолоконного статора микродвигателя. Интересно, что эта идея с хрустальным двигателем сначала была воспринята всерьез только детским популярным журналом "Юный Техник" [8], публикация в котором тем не менее дала старт развитию волоконных МЭМС (!).

Сущность волоконной технологии заключается в следующем. Основным является процесс вытягивания пучка из плотно упакованных спеченных между собой волокон и(или) капилляров, которые предварительно изготавливают из двух марок стекол, резко отличающихся друг от друга растворимостью в водном растворе HCl. Наиболее часто применяют шестигранные волокна (рис. 1, б и в), дающих наиболее плотную гексагональную упаковку пучка и минимальный "ход"

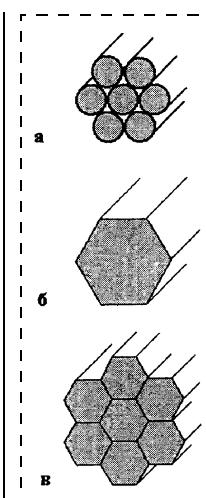


Рис. 1. Схема укладки пучка из круглых (а) и шестиугольных (б, в) волокон

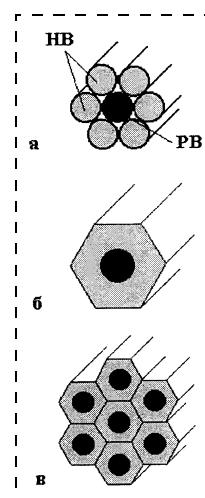


Рис. 2. Схема укладки пучка из растворимых (PB) и нерастворимых (НВ) волокон

топологических размеров в поперечном сечении пучка при его перетягивании. Типичный поперечный размер исходных заготовок волокон составляет несколько миллиметров, а пучка — несколько сантиметров.

Композиция волокон в пучке определяется заданным в некотором масштабе рисунком поперечного сечения микроструктуры. При этом "растворимые" волокна (PB) формируют рисунок будущих отверстий (рис. 2). Далее пучок перетягивают в более тонкий, сохраняя геометрическое подобие рисунка (рис. 3). Масштаб перетягивания пучка не превышает $\sim 1 : 20$ — $1 : 24$. Изготовленный пучок разрезают на части, из которых можно сформировать новый пучок и перетянуть его. Этот процесс можно повторять многократно. Например, при изготовлении рентгеношаблона были использованы шестигранные

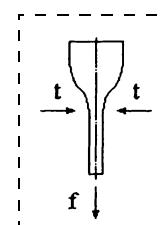


Рис. 3. Схема перетягивания пучка

волокна с поперечным размером 0,5 мкм, которые в свою очередь были получены перетягиванием пучка из ~4000 волокон.

Резку тонких пучков выполняют алмазным кругом с внутренней режущей кромкой. Отрезки длиной несколько сантиметров во избежание механических повреждений укладывают в стеклянную трубку и заполняют ее смесью воска и канифоли. Минимальная бездефектная длина нарезки при этом составляет 300—400 мкм. Более короткая длина (высота, глубина) микроструктур может быть получена ее дополнительным шлифованием. После этого использованную смесь удаляют промывкой.

Рис. 4 иллюстрирует образование 3D-структур при травлении отрезка пучка в HCl. Этот отрезок в варианте (а) показан состоящим из нерастворимой сердцевины (НР) и растворимой оболочки (Р), а в варианте (б) — из растворимой сердцевины и нерастворимой оболочки. В общем случае растворимые и нерастворимые части могут иметь любой заданный профиль сечения. При травлении конца пучка (рис. 4, а) образуется консоль, а в случае, показанном на рис. 4, б, образуется отверстие. При травлении отрезка по рис. 4, б с двух сторон внутри отверстия может быть получена перегородка (рис. 4, в). В наших экспериментах такие гер-

метичные перегородки толщиной ~5 мкм были получены в каналах рентгеншаблона из свинцового стекла толщиной 5 мм. Рис. 5 и 6 (см. четвертую сторону обложки) демонстрируют примеры структур с микроконсолями и рентгеншаблона. Технология позволяет в принципе каждую из консолей (рис. 5) изготовить с одним или несколькими каналами заданного профиля, которые при необходимости могут быть заполнены электропроводящим веществом.

Волоконная технология дает широкие возможности при конструировании устройств со встроенными электродами или проводами. В качестве примера на рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) приведена композиция шестиугольных волокон в пучке, образующих в совокупности статор микродвигателя. Часть этих волокон (по три волокна в каждой из шести групп) содержит капилляры, заполненные свинцово-оловянным припоеем, температура плавления которого ниже температуры размягчения стекол. Именно это условие принципиально важно для перетягивания пучков, содержащих провода, вплоть до получения субмикрометровых размеров этих проводов. Здесь уместно отметить одно из оригинальных свойств волоконной технологии: *поскольку в процессе перетягивания сечение пучка уменьшается непрерывно, то непосредственно в одном цикле перетягивания могут быть получены геометрически подобные микроструктуры с бесконечным числом типоразмеров*. Ни одна из других известных технологий не обеспечивает такой возможности.

Композиция полых и сплошных волокон в пучке может иметь самый разнообразный вид. Специально рассчитанные и подобранные композиции позволяют при перетягивании пучка направленно изменять топологический рисунок его профиля без сохра-

нения геометрического подобия рисунка. В качестве примера на рис. 8 слева (см. четвертую сторону обложки) показана композиция волокон в сечении пучка, предназначенного для изготовления полого цилиндра с некруглыми отверстиями в его стенке. Таким способом был изготовлен статор синхронного микродвигателя [9]. Отверстия в стенке заполнялись сплавом PbSn и эти капиллярные провода выполняли в двигателе роль активных проводников обмоток. Синхронный микродвигатель с таким статором показан на рис. 9 (см. четвертую сторону обложки).

Волоконная технология обеспечивает возможность группового изготовления изделий, а также позволяет создавать интегральные конструкции. Для этого композиция волокон в пучке подбирается соответствующим образом. Пример группового изготовления статоров с диаметром ~160 мкм показан на рис. 10 (см. четвертую сторону обложки). Поскольку готовый пучок затем нарезается на отдельные куски, то такой способ изготовления изделий можно назвать дважды групповым. *Это еще одно оригинальное качество волоконной технологии, которая обеспечивает возможность как интегрального, так и группового изготовления изделий одновременно в одном технологическом цикле*.

Дырчатым волоконным микроструктурам из стекла свойственна универсальность их использования. Они уже совершают революцию в оптике в качестве двумерных фотонных кристаллов [10], а также волноводов и линз рентгеновского излучения и тепловых нейтронов [11]. По мнению автора, дырчатые волоконные микроструктуры, как искусственный объект, наиболее близко из всех известных сегодня микроструктур повторяют природные конструкции. И в этом, возможно, лежит разгадка их "волшебства". Для сравнения —

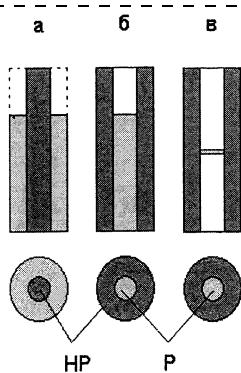


Рис. 4. Схема изготовления рельефа структуры

так устроены нервные волокна животных и человека, волокна растений и т. д. Думается, что дырчатые волокнистые микроструктуры из самых различных материалов настоящего и будущего времени еще проявят себя неординарно в самых непредсказуемых областях науки и техники.

Одной из сложных проблем волоконной технологии является изготовление многократно пересекающихся друг с другом встроенных объемных микропроводов. Трудность состоит в том, что при изготовлении микроканалов (под эти провода) образуются "вываливающиеся" части структуры. Сходная проблема существует, например, и при изготовлении спиральной обмотки с ультравысоким аспектным отношением. Микроканал с сечением в форме спирали и тонкими стенками микрометровой толщины между витками оказывается слишком хрупким для проведения с ним дальнейших операций. Изготовление спиральной обмотки показано схематично на рис. 11. Нарезанные куски перетянутого пучка (рис. 11, б) травят в растворе кислоты, удаляя растворимые части 2 на некоторую глубину. Затем оплавляют сплав 3, который при этом заполняет объем, освободившегося после травления пространства. Из полученной заготовки

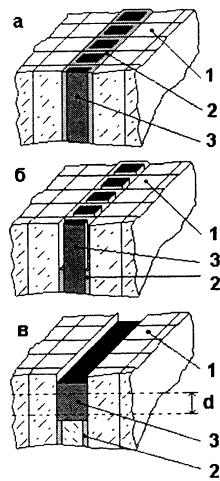


Рис. 11. Изготовление спиральной обмотки

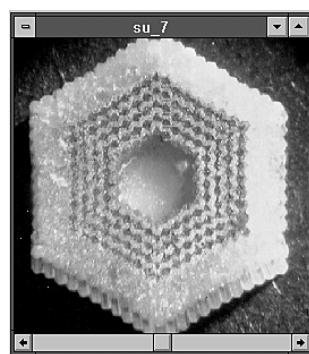


Рис. 12. Спиральная обмотка (12 витков шириной 7 мкм)

нарезают куски заданной длины *d*. В описанном способе профиль сечения микропроводов определяется профилем "растворимых" составляющих пучка. Рис. 12 демонстрирует фотографию сечения пучка на промежуточном этапе его перетягивания при изготовлении 15-витковой спиральной обмотки с шириной витка 7 мкм.

Процесс пластической деформации пучка волокон позволяет в принципе придать ему любую 3D-геометрию. Одним из легко доступных на практике является процесс скручивания пучка, при котором отверстия и(или) провода в пучке могут быть скручены вокруг оси пучка на заданный угол. Рис. 13 дает некоторые примеры простейших устройств, которые при этом могут быть получены. Например, на рис. 13, а изображена структура со скрученными каналами, которая может быть использована в качестве микротурбины или микрошнека, а на рис. 13, б — аналогичная ей конусная микроструктура.

Возможное применение таких микроструктур не ограничивается только механикой. Из этих рисунков отчетливо просматривается их использование в оптике, включая сюда рентгеновскую и нейтронную оптику, а также мультиканальную электронную оптику. Стоит подчеркнуть, что шероховатость стенок стеклянных каналов не превышает 10 нм, что, собственно говоря, и позволяет ка-

нализовать по ним рентгеновское излучение на эффекте полного внешнего отражения [12].

Рис. 13, в изображает схему скрученного трехжильного кабеля, минимальный диаметр которого на практике составляет ~20 мкм. При питании такого кабеля трехфазным током он может быть использован, в частности, в качестве статора микродвигателя с внешним ротором. Не трудно увидеть в этой конструкции и механическое микроустройство — зубчатое колесо для цилиндрических передач Новикова. Если в конструкции кабеля по рис. 13, в предусмотреть растворимую оболочку для каждой из жил, а затем вытравить ее на конце кабеля на определенную длину (рис. 13, г), то такое устройство претендует на использование в качестве аккумулятора, создающего механические усилия *F* на концах жил.

Заканчивая рассмотрение практически бесконечного ряда возможных применений волокнистых микроструктур, следует сделать еще одно весьма важное замечание. Каналы волокнистых микроструктур могут быть заполнены газами, электролитами, цеолитами, полупроводниковыми материалами, а также материалами с иными свойствами. При этом нет видимых препятствий тому, чтобы все эти разнообразные виды и типы каналов присутствовали

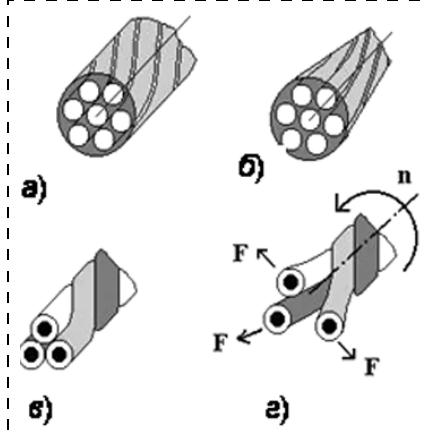


Рис. 13. Скрученные микроструктуры

в одной и той же микроструктуре. Именно в этом автор видит еще одну неповторимую особенность волоконной технологии.

Перспективы волоконной технологии в робототехнике

Как уже говорилось во введении, одним из передовых направлений в развитии современной микромеханики является создание автономных микроботов, где использование одних только планарных технологий оказывается явно недостаточным. Автором сделана попытка оценки возможности построения летающего микробота с использованием волоконной технологии [3]. В качестве прототипа при этом были выбраны не муhi, пчелы и стрекозы, на которые сделан упор в уже существующих работах [13], а семена растений, которые планируют в воздухе, а точнее — плавают в нем. Дело в том, что при малых размерах летательного аппарата (ЛА) число Рейнольдса настолько мало, что оно оказывается гораздо ближе к режиму плавания в вязком воздухе. Из природных объектов автор подсмотрел в качестве прототипа ЛА семя одуванчика, парашютная система которого состоит из конусообразного веера волокон (рис. 14). Иногда в полете отдельные семена сплетаются своими волокнами и образуют парящее "облако". В английском языке слову *одуванчик* соответствует слово *dandelion*, что в обратном переводе может восприниматься весьма забавно и как "лев-денди". Это обстоятельство и рискованность затеи автора дали ему повод назвать свой ЛА — *Dandelion*.

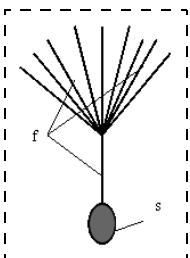


Рис. 14. Семя одуванчика:
f — волокна; s — семя

Выше уже говорилось, что многофункциональность всех без исключения устройств ЛА является одним из главных предъявляемых к ним требований. С этой точки зрения волоконные конструкции при построении ЛА, похожего на семя одуванчика, весьма привлекательны. Так, они могут выполнять одновременно роль парашютной системы, эластичных ног (при посадке ЛА) или эластичной "охранной оболочки" (при столкновении с препятствием), а также роль бортового источника электрической энергии и радиоантенны. В частности, батарея из коаксиальных конденсаторов, выполненных в виде волокон, может иметь следующие расчетные параметры. Если принять зарядное напряжение $U = 2$ В, внешний диаметр кабеля (электрода) $2K = 20$ мкм, толщину диэлектрика ($R - r$) = 0,5 мкм (из расчета диэлектрической прочности 20 В/мкм), проницаемость диэлектрика $\epsilon = 4$ и длину каждого кабеля $l = 20$ мм, то емкость одного кабеля составит ~ 87 пФ. Если принять из конструктивных соображений, что концы всех кабелей батареи будут закреплены и соединены друг с другом на площадке в 4 мм^2 и каждый кабель при этом будет занимать пространство 30×30 мкм, то число кабелей в батарее окажется равным ~ 4444 , а ее емкость $C_b \sim 0,4$ мкФ. Энергия такой батареи составит $\sim 0,8$ мкДж. Если в качестве диэлектрика будут использованы полимерные материалы с плотностью ~ 1400 кг/м³, то масса батареи без учета массы тонкого внешнего электрода составит ~ 40 мг, а удельная плотность запасаемой энергии батареи $\sim 0,02$ Дж/кг.

Схема энергоблока ЛА с такой батареей может выглядеть как схема, показанная на рис. 15, на котором число кабелей (3) показано в уменьшенном количестве. Кабели могут располагаться и по обе стороны диска, так как в их

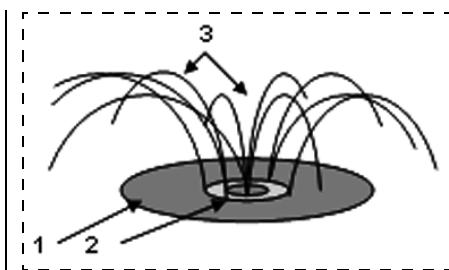


Рис. 15. Схема энергоблока микроЛА:
1 — диск; 2 — площадка крепления и соединений кабельных конденсаторов 3

функцию входят обеспечение не только планирования ЛА, но и демпфирование ударов при встрече с препятствием и посадке.

В принципе, простейший ЛА может иметь на борту запас энергии, достаточный только для функционирования сенсора и выдачи сообщения своему "оператору" об обнаружении "цели" (пожара, вредного газа, и т. д.). Однако, по замыслу автора, он должен быть способен и на автономный взлет после посадки. Для этого ему достаточно лишь на мгновение оторваться от "земли", чтобы быть подхваченным случайным дуновением ветра. Поэтому ЛА должен быть снабжен энергоблоком и дополнительными аккумуляторами, обеспечивающими его взлет и поддержку режима планирования. С этой целью вместо диска 1 (рис. 15) целесообразнее использовать трех- или четырехлопастной пропеллер (рис. 16), который может вращаться на валу (3) с помощью магнитостатического подшипника скольжения. Такой пропеллер может быть изготовлен в виде пленочного солнечного элемента

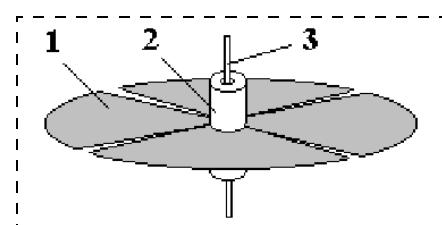


Рис. 16. Пропеллер:
1 — лопасть; 2, 3 — детали магнитостатического подшипника

и выполнять функцию зарядного устройства для низковольтной волоконной батареи. Кроме этого, на концах лопастей этого пропеллера могут быть размещены униполярные микродвигатели постоянного тока (рис. 17), снабженные своими собственными воздушными винтами. При современном уровне развития солнечных элементов масса такого пропеллера может составить ~ 50 мг и при площади элемента в 1 см² обеспечивать ток короткого замыкания (режим работы униполярных двигателей) $\sim 2,8$ мА при напряжении 1,8–2,3 В [14]. Другой подход может использовать пленочные литиевые батареи, которые, как сообщается в [15], обеспечивают для одной индивидуальной ячейки 10 мКА · ч · см² (3,9 В) при толщине катодной пленки 0,25 мкм. Важно подчеркнуть, что эти микродвигатели по своему принципу действия должны быть именно униполярными двигателями постоянного тока, поскольку в этом случае питание их обмоток совершается непосредственно от бортового источника питания без использования каких-либо дополнительных электронных устройств. Платой за выигрыш в массе и простоте конструкции в этом случае является весьма низкая полезная мощность этих микродвигателей.

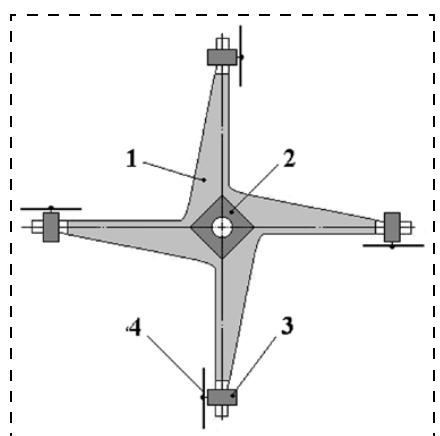


Рис. 17. Пропеллер с микромоторами 3:
1 — лопасть; 2 — ось; 4 — винт микромотора

Очевидно, что наличие пропеллера не решает проблему взлета во всех возможных ситуациях. Например, если ЛА "сидит" в траве, то возможность раскрутить пропеллер мала.

В качестве дополнительного или альтернативного средства взлета может быть использован актиоатор типа "машущее крыло" и(или) микродвигатель на реактивной тяге. Следует сразу оговориться, что они могут быть эффективны только для сверхлегких конструкций ЛА. Устройство этих актиоаторов выглядит следующим образом. Вал 3 пропеллера (см. рис. 16) может быть использован одновременно в качестве фюзеляжа, несущего крылья. Кроме этого, его внешняя поверхность покрыта электропроводящей пленкой 3 (рис. 18). Поверх пленки 3 наносится ферромагнитный слой 4, "охватывающий" в сечении вала угловую сектор, например $\sim 300^\circ$. Эластичные магнитопроводящие крылья 2 (одна или несколько пар) закрепляют на участке вала, свободном от пленки 4. Для того чтобы взмах крыла происходил под некоторым острым углом к оси фюзеляжа, они крепятся к последнему так, чтобы неподвижная часть пары крыльев в развертке на плоскость имела вид трапеции.

При протекании тока по пленке 3 вдоль фюзеляжа возникающий кольцеобразный магнитный поток замыкается в немагнитном зазоре между слоем 4 и крыльями 2, вызывая при этом их взаимное притяжение. Такой актиоатор представляет собой электромеханический резонатор, у которого подвижной частью являются крылья. В реальности конструкция крыла может быть более сложной, чем это показано на рис. 18. Например, из магнитного материала может быть выполнена лишь часть крыла, прилегающая к фюзеляжу, и т. д. Одна из идей автора по созданию крыла со сложным движением за-

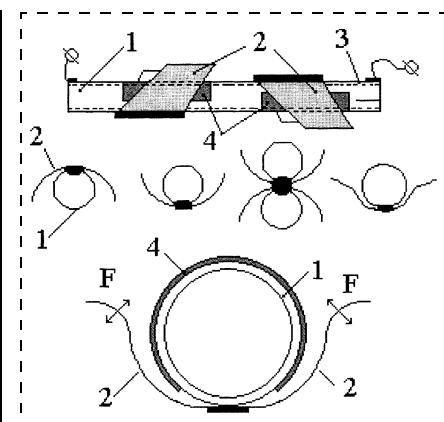


Рис. 18. Схема электромагнитного актиоатора "машущее крыло":

1 — вал магнитостатического подшипника 3 по рис. 16; 2 — крыло; 3 — электропроводящее покрытие; 4 — пленочный магнитопровод

ключается в том, что оно выполняется не сплошным, а в виде эластичных волокон предопределенной длины (рис. 19). Такая конструкция состоит уже из нескольких электромеханических резонаторов, в каждом из которых воложно, как часть крыла, имеет свои собственные параметры колебания. Следует заметить, что самостоятельное применение таких микромахолетов может быть полезным и для других устройств. Например, с помощью "крылатого" микроактиоатора вдоль некой поверхности может, подпрыгивая, перемещаться "рожденный только ползать" автономный микробот. В этом случае энергетические затраты на его движение с подпрыгиванием могут оказаться меньшими, чем затраты на его качение или скольжение по поверхности.

Иная ситуация возможна, например, при мониторинге необслуживаемого помещения вред-



Рис. 19. Крылья из волокон 1

ного производства, склада, тоннеля, трубопровода и т. д. В этом случае инспекционный робот с "крылатым" актиоатором выгоднее перемещать по заданному маршруту вдоль направляющего корда, например, вдоль волокна, пропущенного через фюзеляж. В этом случае робот будет иметь вид скользящего вдоль корда паука. В этом варианте электрический ток может быть пропущен через корд, а крылья достаточно "укомплектовать" магнитной системой, взаимодействующей с этим током.

Другим актиоатором "взлета" может быть двигатель на реактивной тяге, выполненный непосредственно как часть втулки 2 по рис. 16, которая совмещает при этом функции детали подшипника и держателя волокон — конденсаторов батареи. За основу такого двигателя автор взял конструкцию устройства, первоначально разработанного в качестве многоканальной электронно-оптической линзы (рис. 20). При наличии потенциалов напряжения $U1$ и $U2$ на электродах 3 и 6 электрическое поле 8 формирует мениск 9 жидкости 7 на открытом конце каждого из каналов 2. При подаче потенциала на вытягивающий электрод, отдельный от электрода 6 изолятором 10, форма мениска может быть изменена до такой степени, при которой происходит отрыв капли жидкости, создающей реактивную тягу. Технология обеспечивает возможность изготовления пластины 1 с минимальной толщиной до 0,3 мм и каналами 2 с диаметром от 0,3 мкм и выше. Сечение каналов 2 может иметь практически любую заданную геометрию, а размеры и форма этих отверстий в одной пластине и расстояние между этими отверстиями могут быть также предопределенными. Кроме этого, каналы 2 при необходимости могут быть изготовлены конусообразными и(или) скрученными отно-

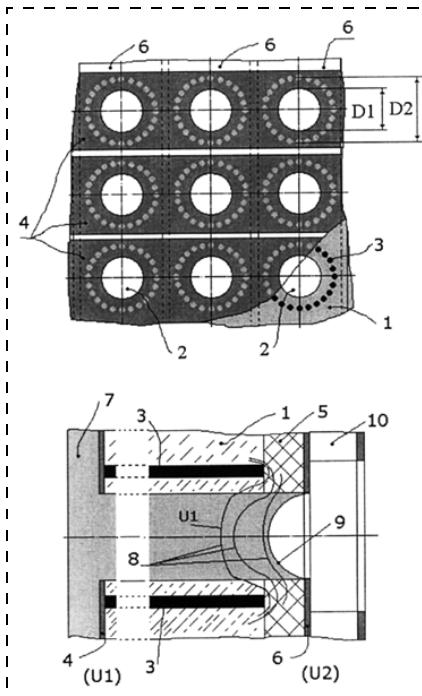


Рис. 20. Жидкостной реактивный двигатель микроЛА:

1 — стекловолоконная пластина с каналами 2 и электродами 3, каждый из которых имеет пленочный токоподвод 4; 5, 10 — изоляционные слои; 6 — управляющий электрод; 7 — жидкость; 8 — линии поля электронной линзы, образуемой электродами 3 и 6; 9 — мениск жидкости

сительно продольной оси пластины на некоторый угол. Электрод 3 состоит из капиллярных проводов, сечение которых и их расположение относительно стенок каналов 2 может быть также предопределено конструкцией устройства. Вообще-то, автор видит более широкое поле применения этой конструкции. Ее разновидностями могут быть, в частности, плазменная электронная пушка, жидкокомпрессионный ионный источник, микронасос, устройство дозированной подачи жидкости, электрохимический микрозонд, протез нервных волокон, фотонный кристалл, волновод рентгеновского излучения, а также устройства со всевозможными комбинациями вышеперечисленных устройств в составе одной пластины.

Возвращаясь к ЛА, следует сказать, что жидкостной реактив-

ный двигатель может быть изготовлен также в виде композита, из волокон, уложенных в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. При этом каждое из волокон может содержать один или несколько каналов 2 с электродами 3. Такой двигатель может "выстреливать" жидкость в трех взаимно перпендикулярных направлениях, т. е. вектором тяги двигателя можно управлять. Макет такого композита в виде кубика, изготовленный автором склеиванием стекловолоконных заготовок статоров микродвигателей [16], показан на рис. 21 (см. четвертую сторону обложки). На срезе угла макета хорошо видны три ортогональные друг другу каналы с шестью электродами 3 каждый. Единственным предназначением этого макета является демонстрация необычайно широких и оригинальных возможностей волоконной технологии в области создания МЭМС и НЭМС и, в частности, описанного микродвигателя для ЛА.

Общий вид ЛА *Dandelion* изображен на рис. 22.

Автор осознанно не перегружает приведенные выше рассуждения относительно ЛА оценоч-

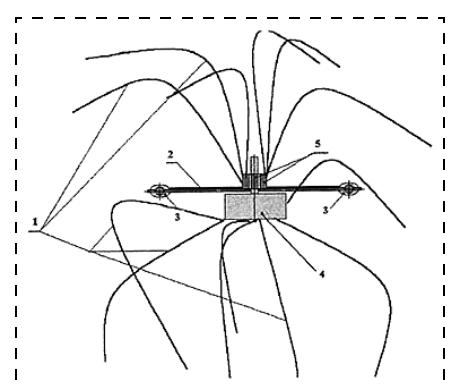


Рис. 22. Общий вид микроЛА "Dandelion" (Одуванчик):

1 — волокнистые элементы, выполняющие функции электрических конденсаторов батареи, ног или защитной "оболочки" при соударениях с препятствиями, парашютной системы, антенны; 2 — трех- или четырехлопастный пропеллер — солнечный элемент; 3 — униполярные двигатели постоянного тока; 4 — интегральное сенсорное устройство

ными расчетами, так как основную цель настоящей статьи составляет демонстрация уникальных возможностей трехмерного дизайна, открывающихся при использовании волоконной технологии в микросистемной технике.

Перспективы волоконной нанотехнологии

В отличие от планарных технологий, изготовление волокнистыхnanoструктур и наноэлектромеханических систем (НЭМС) не требует специального технологического оборудования и супердорогих сверхчистых комнат. Наноразмерные структуры, включая и структуры с нанопроводами, получают в результате многократного перетягивания пучка волокон. Этот удивительно простой и понятный способ не требует какого-либо комментария. Автор увидел и некоторые другие оригинальные возможности волоконной нанотехнологии. Одна из них относится к безмасочному изготовлению неплоских НЭМС [17, 18] и в качестве примера поясняется схемой изготовления статора микродвигателя (рис. 23). По этой схеме стекловолоконная заготовка выполняет две главные задачи. Во-первых, она используется как жертвенная подложка с предопределенной 3D-геометрией и тем самым формирует геометрическую форму изготавливаемого изделия. В общем случае такая заготовка может быть изготовлена из растворимых и нерастворимых стекол, т. е. быть частично жертвенной. Во-вторых, после удаления травлением слоя поверхности заготовки (рис. 23, ii—iii), при котором создается специальный рельеф, она "работает" в качестве маски при изготовлении последующих слоев (рис. 23, iv). В общем случае такой технологический подход позволяет изготавливать микроустройства из различных материалов: металлов, полимеров, резин и т. д. Особенно интересные ре-

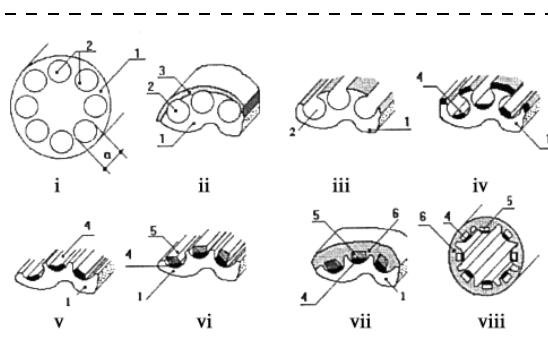


Рис. 23. Последовательность операций изготовления НЭМС на "жертвенной" подложке из растворимого стекла (на примере статора микродвигателя):

i — изготовление стекловолоконной подложки 1 в виде волокна с наноканалами 2; ii—iii — удаление поверхностного слоя подложки 3 травлением и образование на поверхности линейчатой микроструктуры, выполняющей роль маски при последующей операции изготовления слоя 4; iv — изготовление вспомогательного слоя 4 (промоутера); v — удаление верхней части линейчатой микроструктуры (маски) травлением; vi—vii — изготовление функциональных слоев 5 (например, проводов статора) и 6 (например, магнитопровода; примечание: изготовление других слоев — изоляционных, защитных и т. д. для упрощения иллюстрации не показано); viii — удаление "жертвенной" подложки 1 травлением

зультаты в перспективе могут быть получены при использовании неплоских стекловолоконных подложек для последующих LIGA-процессов.

К другим перспективам использования волоконной технологии в области НЭМС следует отнести возможность изготовления структур с субмикрометровыми по толщине стенками между каналами. В случае использования стекол такие тонкие стенки, как известно, обладают мембранными свойствами. Важно обратить внимание на то, что волокнистые nanoструктуры при заполнении соседствующих каналов электролитами по своей конструкции становятся схожими с нервными волокнами и, следовательно, при определенных условиях должны передавать "сигнал-раздражитель" (информацию) с одного своего конца на другой. Волокнистая структура может быть без особого труда изготовлена с плавно изменяющимся сечением вдоль ее длины, например, иметь конусообразные участки. Известно, что в нервном волокне изме-

нение его диаметра обеспечивает изменение скорости передачи по нему нервного импульса, и Природа искусственно этим пользуется при сотворении живых организмов. Таким образом, с определенной долей оптимизма можно говорить о возможности создания искусственных нервных волокон на основе волокнистых структур или, более скромно, своеобразных сенсоров. Прообраз таких устройств автор увидел в конструкции заготовок статоров микродвигателей (см., например рис. 8 и 10). Если центральный канал такой заготовки заполнить

электролитом одного типа проводимости, а остальные каналы — электролитом другого типа, то при субмикрометровой толщине стеклянной стенки между каналами с различными электролитами на ней должен возникнуть мембранный потенциал со всеми вытекающими из этого последствиями.

Конечно, такой грубый подход, с которым здесь сделана оценка потенциальных возможностей волокнистых nanoструктур, может оказаться не корректным. Тем не менее волоконная технология реально позволяет изготавливать структуры описанного вида.

Микродвигатели на основе тонкостенных волокнистых оболочек и их сегментов

Известно, что в электрических двигателях, например асинхронных, обмотка статора создает бегущее магнитное поле, взаимодействующее с ротором (или слайдером — в линейных двигателях). Одним из простейших видов таких, например двухфазных, обмоток является ленточная обмот-

ка, состоящая из двух одинаковых периодически изогнутых проводников (из проволоки или изготовленных напылением металлических дорожек), смещенных относительно друг друга на четверть их периода вдоль их общей продольной оси. Среди практических задач микросистемной техники существуют задачи, связанные с необходимостью перемещения микрочастиц, жидкости или иных объектов вдоль поверхности или в глубине тела. В таких микроэлеваторах в качестве обмоток находят применение сеточные конструкции из микропроволоки [19–21] и многослойные пленочные обмотки. Если такая обмотка должна иметь заданную пространственную кривизну, то ее изготавливают как самостоятельный навесной элемент конструкции устройства. И в этом состоит основной недостаток таких обмоток. Этот недостаток можно преодолеть, используя волоконную технологию. Подход к созданию таких обмоток, разработанный автором, состоит в следующем. Волоконная технология предоставляет возможность изготовления микроструктур с периодическим линейным рельефом поверхности. Такой рельеф хорошо виден, например, на стенках каналов рентгеншаблона (см. рис. 6 на четвертой полосе обложки). Ранее уже отмечалось [22], что структуры с таким рельефом могут быть использованы в качестве рентгеновской дифракционной решетки.

Представим, что статор микродвигателя образуют две, разделенные друг от друга зазором, части поверхности с одинаковым по своей геометрии, но смещенным относительно друг друга периодическим линейным рельефом (рис. 24, б). Фазные обмотки статора получают нанесением тонкого сплошного электропроводящего слоя на эти поверхности с рельефом. Профиль обмоток может иметь, например, вид

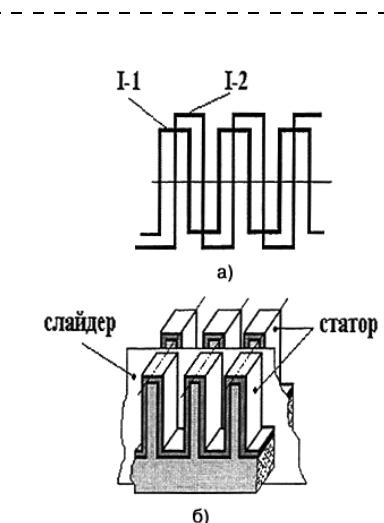


Рис. 24. Токи I-1 и I-2 (сдвинутые по фазе и в пространстве) (а), протекающие по поверхности двух частей статора (б) в направлении, поперечном рельефу поверхности

меандра (рис. 24, а). При питании обмоток токами I₁ и I₂, протекающими в направлении, поперечном рельефу и сдвинутыми между собой по фазе, в зазоре статора возникнет бегущее магнитное поле, скорость которого определяется частотой токов и периодом рельефа (который, при необходимости, может быть переменной величиной вдоль зазора). Ротор или слайдер размещают в зазоре. Конструкция может быть дополнена ферромагнитными слоями для усиления поля в зазоре.

Особенностью микродвигателей является то, что они могут быть изготовлены на поверхности оболочки или ее сегменте с практически любой заданной кривизной и иметь несколько участков с "рельефной" поверхностью, между которыми в зазоре (при необходимости — криволинейном) могут перемещаться несколько подвижных частей двигателя. Для цилиндрического двигателя с вращающимся ротором одна из двух частей статора с периодическим рельефом поверхности может иметь вид, показанный на рис. 25. Волокнистые заготовки

на рис. 25 могут быть полыми или сплошными. Две такие части статора закрепляются по обе стороны вала, на котором устанавливается ротор. Минимальный внешний диаметр такого статора, который может быть реально изготовлен в настоящее время, составляет ≥ 20 мкм. Такой микродвигатель может быть в принципе использован и в качестве сенсора угловых перемещений, так как взаимное азимутальное положение рельефа двух частей статора влияет на частоту вращения ротора.

Еще одним "хорошим" свойством волокон является их гибкость. Из практики известно, что радиус безопасного изгиба волокна составляет не менее 100 его радиусов. Следовательно, это свойство волокон дает новые возможности при конструировании микроустройств. Для наглядности на рис. 26 (см. четвертую сторону обложки) показаны схемы микролетательных аппаратов с минимальными возможными габаритными размерами ~5 мм, которые в качестве несущей конструкции используют упомянутые выше гибкие статоры.

Каждый из винтов R1 и R2 (дисковые роторы) этих ЛА расположены

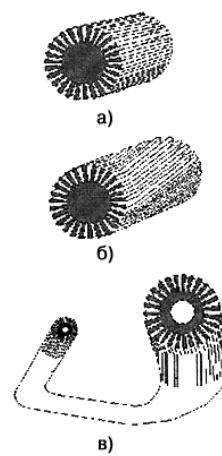


Рис. 25. Часть статора микродвигателя с рельефом:

а — прямолинейным; б — скрученным; в — переменным по диаметру

жен между двумя частями статора, показанных на рис. 26, *a, b* разными цветами и содержащих пленочные обмотки на рифленой поверхности. Для ЛА на рис. 26, *a* эти части могут быть выполнены аналогичными по конструкции волокну, соответствующему рис. 25, *a*. В этой конструкции роторы *R1* и *R2* вращаются в противоположных направлениях. Вообще, число пар роторов в такой конструкции может быть различным, да и сами конструкции могут иметь различные варианты исполнения. В основе конструкции ЛА по рис. 26, *b* лежат волокна, изображенные на рис. 25, *c*. Этот ЛА внешне напоминает обычный вертолет. Автор хотел бы еще раз подчеркнуть здесь, что выбор ЛА в качестве объекта возможного применения описываемых конструкций микродвигателей сделан исключительно с целью подчеркнуть огромное поле "деятельности" для волоконной технологии в микросистемной технике.

Выводы

Итак, волоконная технология позволяет изготавливать объемные микро- и наноструктуры с ультравысоким аспектным отношением, недоступные по своей геометрии другим известным технологиям. Об этом уже было сказано выше более подробно. Исключительно важными являются и другие аспекты. Волоконная технология не использует радиационные излучения, не нуждается в сверхчистых помещениях, может быть осуществлена практически в любой географической точке и, наконец, обходится минимальным числом специалистов средней квалификации. И последнее, волоконная технология таит в себе неисчерпаемые возможности, поскольку неисчерпаемы материалы, которые она может использовать, и технологии, которые в совокупности с ней необъ-

ятно расширяют сферу ее применимости.

Автор выражает особую признательность д-ру техн. наук, проф. МИРЭА П. П. Мальцеву за многочисленные и плодотворные дискуссии в области микросистемной техники, а также внимательное и критическое отношение к работам автора.

Список литературы

1. **Yong Yi and Chang Liu.** High-Yield Assembly of Hinged 3-D Optical MEMS Devices Using Magnetic Actuation // Part of the SPIE Conference on Micromachining and Microfabrication Process Technology IV, Santa-Clara, California, September 1998. P. 125—134.
2. **Jackman R. J., Baitain S. T., Adams A., Prentiss M. G., Whitesides G. M.** Design and Fabrication of Topologically Complex, Three-Dimensional Microstructures // SCIENCE. 1998. Vol. 280, 26 June. P. 2089—2091.
3. **Soukhoverev S. P.** Tiny Flying Micro Vechicle similar to Gliding Dandelion Seed. Built and Application Conceptions // Int. Workshop on Micro Robots, Micro Machines and Systems, April, 24—25, 2003, Moscow, Russia, in Proceedings of IARP, 2003. P. 231—238.
4. **Chesnokov V. V. and Fedchenko V. I., Naz'mov V. P.** Study of SR beam line windows within the range of 17—80 nm // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A308. 1991. P. 333—335.
5. **Murphy D.** Wall collisions, angular flux, and pumping requirements in molecular flow through tubes and microchannel arrays // J. Vac. Sci. Technol. A 7(5), Sep/Oct 1989. P. 3075—3091.
6. **Tonucci R. J., Justus B. L., Campillo A. J., Ford C. E.** Nanochannel Array Glass // Science. 1992. V. 258. P. 783—785.
7. **Колеров Е. П., Суховеев С. П.** Свидетельство об изобретении СССР. № 1729225, 1989.
8. **Суховеев С., Ильин А.** О больших достижениях на микроуронне // Юный техник. 1992. № 11. С. 21—23.
9. **Белоглазов В. И., Суховеев С. П., Сuetin Н. В.** Создание микронных и субмикронных трехмерных структур с использованием стекловолоконных технологий // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 6—9.
10. **Желтиков А. М.** Дырчатые волноводы // УФН. Т. 170. № 11. С. 1203—1215.
11. **Аркадьев В. А., Коломийцев А. И., Кумахов М. А., Лабузов В. В., Чертов Ю. П., Шахпаронов И. М.** Экспериментальное исследование многократного отражения рентгеновских лучей на изогнутых поверхностях // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 2. С. 44—47.
12. **Зеркальная рентгеновская оптика /** Под общей редакцией А. В. Виноградова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1989. 463 с.
13. **Fearing R. S., Chiang K. H., Dickinson M., Pick D. L., Sitti M., and Yan J. Wing Transmission for a Micromechanical Flying Insect // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, April, 2000.**
14. **Lee J.-B., Chen Z., Allen M. G., Rathagi A., and Arya R.** A High Voltage Solar Cell Array As An Electrostatic MEMS Power Supply // Proceedings 7th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Oiso, Japan. Jan. 1994. P. 331—336.
15. **West W. C., Whitacre J. F., White V. and Ratnakumar B. V.** Fabrication and testing of all solid-state microscale lithium batteries for microspacecraft applications // J. Micromech. Microeng. 2002. № 12. P. 58—62.
16. **Soukhoverev S. P., Stepanov V. P., Beloglazov V. I., Skibina N. B., Stcherbakov A. V., Suetin N. V.** Fiber glass structure as basic elements of moving actuators for microrobots operated by umbilical cable // Int. Workshop on Micro Robots, Micro Machines and Systems. 1999. Nov. 24—25. Moscow, Russia, in Proceedings of IARP 1999. P. 185—190.
17. **Soukhoverev S. P.** Plenary Session NEXUS, Russian Conference on Sensor. 2000. (Proceedings). 2000. P. 268. (21—23 July, Saint-Petersburg, Russia).
18. **Суховеев С. П.** Объемные электромагнитные микродвигатели с субмикронными микроструктурами // Петербургский журнал электроники. 2000. № 3—4. С. 102—108.
19. **Moesner F. M. and Higuchi T.** Traveling Electric Field Conveyor for Contactless Manipulation of Microparts // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, October 5—9. 1997. Vol. 3. P. 2004—2011.
20. **Moesner F. M., Buhler P. S., Politan D. C. and Prati P. V.** Electrostatic Propulsion Motor for Tiny Vessels // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, October 5—9. 1997. Vol. 3. P. 1874—1878.
21. **Soukhoverev S. P., Suetin N. V.** 3D Micro Windings and Electrode Systems from Glass-Metallic Fabrics for MEMS-Applications // Int. Workshop on Micro Robots, Micro Machines and Systems, April, 24—25, 2003. Moscow, Russia, in Proceedings of IARP. 2003. P. 207—210.
22. **Beloglazov V. I., Soukhoverev S. P., Suetin N. V.** Three-dimensional micron and submicron structures based on fiber-glass technologies // Indo-Russian Workshop on Micromechanical Systems, 2—4 Feb., 1999, New-Dehli, India, V. I. Pustovoy, V. K. Jain Editors in Proceedings of SPIE. 1999. V. 3903, P. 134—140.

УДК 681.587:621.373

**Е. В. Шалобаев, канд. техн. наук,
Ю. С. Монахов**

Санкт-Петербургский государственный
университет информационных технологий,
механики и оптики

ОБЗОР РАЗРАБОТОК МИКРОАКТЮАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПЕРСПЕКТИВАМ ИХ РАЗВИТИЯ

Показана возможность получения малых и микроугловых перемещений с помощью термоапрессий, управляемых лазерным излучением. Предложены новые схемы микроприводов на основе рассматриваемых термомеханических принципов деформации материала.

Развитие микросистемной техники или микро-мехатроники [1] встало перед проблемой неадекватного увеличения возможностей составляющих робототехнической триады *сенсор—контроллер—актуатор*. В работе [2] делается вывод, что слабым звеном указанной системы являются актуаторные подсистемы. И если сенсорные подсистемы активно разрабатывались [3, 4], то разработки в области актуаторов отстают от развития как вычислительных, так и сенсорных компонентов. Поэтому следующий качественный прогресс техники неизбежно связан с прогрессом в области разработки актуаторов. Отсюда актуальность тематики данной публикации. Идет поиск новых способов реализации исполнительных, т. е. *актуаторных* подсистем [5–8].

Кстати, необходимо дать наиболее четкое определение термину *актуатор* [1, 5]. В работах [2, 9] фигурирует термин *активатор*, в англоязычных работах — *актуатор (actuator)* [10], а в публикациях на немецком языке — *актор (aktor)*. В предложениях технического комитета IFToMM (Международной федерации по ТММ) по стандартизации терминов наряду с термином *актуатор* предложен термин *end effektor* [12], который можно перевести как "конечное действие" и который используется в работах [13, 14].

В русской транскрипции указанные выше термины используются в робототехнике, мехатронике наряду со словосочетанием *исполнительный механизм*, который является их синонимом. Очень важен еще и контекст, в котором применяется рассматриваемый термин. Поэтому в ряде словарей

актуатор переводится как *привод*, который может рассматриваться как *исполнительный механизм* [12].

Для создания высокоточных приводов малых перемещений требуются специальные двигатели, преимущественно для отработки линейных перемещений, работающие на иных принципах, чем обычные двигатели [15]. Появились двигатели электромагнитные, представляющие по своей суности электромагнит, магнитострикционные, действие которых основано на изменении длины стержня из пьезомагнитного материала под влиянием внешнего магнитного поля, и пьезоэлектрические, работающие на основе использования обратного пьезоэффекта.

Разработки в области лазерных технологий [7, 8, 16–21], ведущиеся в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики, позволили разработать основы построения актуаторов нового типа [7, 8]. Лазерный луч попадает на элемент, который осуществляет силовое воздействие на объект. При этом исполнительный элемент робототехнической триады может совершать как линейное перемещение, так и угловое.

К сожалению, до настоящего времени не сложилось четкого определения разницы между *малыми перемещениями* и *микроперемещениями*, которые могут достигаться с помощью актуаторов [1]. Например, в работах [15] и [7, 8] говорится о малых перемещениях; в первой работе этот термин относится к линейным перемещениям со значением 2...10 мкм и к угловым перемещениям величиной 0,06 рад, а во второй работе — к угловым перемещениям в пределах 0,5...1,8 мрад.

При нагреве образца лучом лазера в зависимости от параметров излучения, свойств и геометрии материала в нем возникают температурные поля, имеющие различную пространственную конфигурацию. Это приводит к появлению термоупругих напряжений в материале, которые, в свою очередь, могут приводить к появлению остаточных деформаций. Выделяют несколько основных механизмов деформирования под действием температурных напряжений, основные из них: механизм коробления и механизм равномерной и поверхностной усадки. Основные особенности этих процессов определяются различием конфигурации и глубины нагретого слоя [10].

В экспериментах, описанных в работе [7, 8], принято, что деформации вызваны механизмом поверхностной усадки. На это указывает тот факт, что глубина прогретого слоя, приблизительно равная $2,36\sqrt{\alpha\tau}$ (где α — температуропроводность вещества, τ — длительность импульса) при действии импульса свободной генерации, составляет около

0,26 мм, что значительно меньше толщины пластины (1 мм). При этом имеет место наличие прямоугольной зоны воздействия.

Механизм возникновения деформаций под действием температурных напряжений следующий. При локальном нагревании некоторой области (рис. 1) снижается предел текучести (в результате чего пластические деформации возникают при существенно меньших напряжениях). Под действием возникших в результате неравномерного нагрева напряжений сжатия среда деформируется, напряжения частично релаксируют. После окончания импульса, в процессе остывания, деформированная область не принимает исходных размеров и остается в напряженном состоянии. Окружающие участки во время теплового сокращения растягивают эту область, и в ней возникают остаточные напряжения растяжения. Если остаточные напряжения превышают предел текучести, возникают остаточные деформации [7, 8, 19].

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. В качестве источника импульсного нагрева образцов использовалось излучение YAG:Nd-лазера с длиной волны 1,06 мкм. Луч падает нормально к поверхности образца, длительность импульса составляет 2 мс при энергии в импульсе до 7 Дж. Луч фокусируется с помощью оптической системы (блока фокусировки излучения), состоящей из линзы 1 ($f = 12$ см) и линзы 2 (цилиндрической $f = 6$ см) в пятно эллиптической формы (5×1 мм). Образец установлен вертикально и закреплен со стороны основания.

На свободный конец образца приклеивается легкое зеркало (полированный кремний) для регистрации наклона под действием излучения рабочего YAG:Nd-лазера. Расстояние от центра зоны облучения до зеркала составляет 10 мм. Луч второго, измерительного, Не-Не-лазера, отражаясь от зеркала, попадает на экран, по измеренному отклоне-

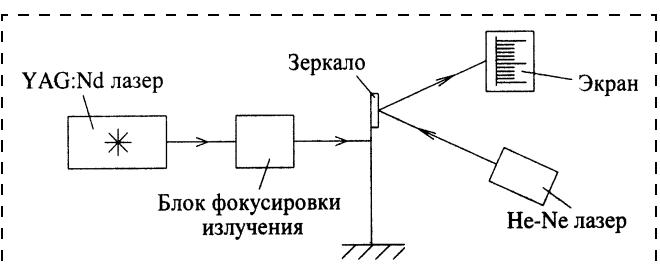


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

нию луча на экране вычисляется угол наклона пластины от действия рабочего лазера.

Наиболее подробно исследовались зависимости угла, полученного при гибке, от плотности мощности лазерного излучения на поверхности и от числа импульсов этого излучения для образца, представляющего собой пластину из нержавеющей стали марки 14Х17Н2 с габаритными размерами $35 \times 5 \times 1$ мм [7, 8]. Максимальный угол, достигнутый в эксперименте, равен 3 мрад. В экспериментах с медной ($35 \times 5 \times 1$ мм) и алюминиевой ($35 \times 5 \times 1$ мм) пластины остаточных деформаций не наблюдается.

Момент, развиваемый рассматриваемой пластиной при изгибе, равен $0,5 \dots 16$ Н·мм и может изменяться в зависимости от ее свойств и геометрических параметров.

В работе [8] предложена конструкция привода для точного углового позиционирования, которая представлена на рис. 3. Привод представляет собой стальную пластину с размерами $30 \times 9 \times 1$ мм. В пластине сделаны три параллельных выреза, в результате чего сформированы две перемычки шириной 5 мм. На перемычках расположены зоны 1 и 2, подвергающиеся лазерному облучению. В зависимости от зоны облучения 1 или 2 соответствующие перемычки изгибаются, что приводит к

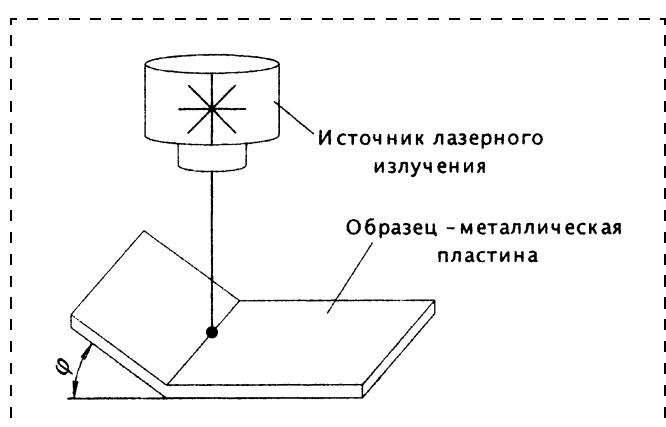


Рис. 1. Принцип действия актиоатора

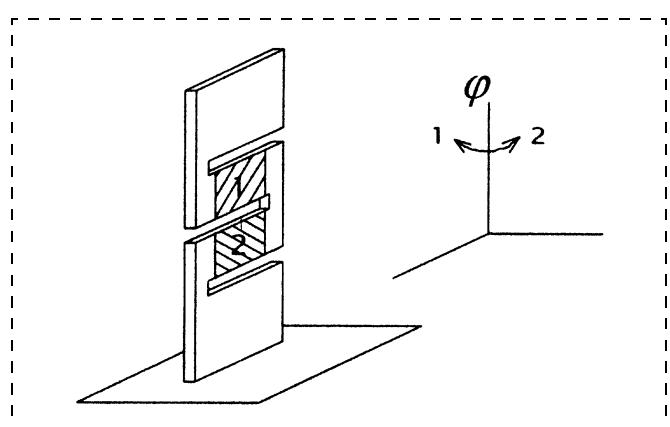


Рис. 3. Конструкция привода:
1 и 2 – зоны облучения

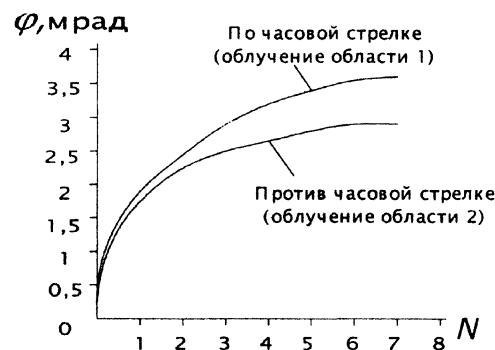


Рис. 4. Экспериментальная зависимость угла поворота от количества импульсов

повороту верхней части привода в противоположных направлениях. Однако следует отметить, что при повторном облучении зон (верхней либо нижней) с одинаковой плотностью мощности угол поворота верхней части актоатора уменьшается (рис. 4). Аналогичная ситуация наблюдается и с моментом, развивающимся актоатором.

На основе приведенных выше механизмов деформирования, кроме конструкции, указанной на рис. 3, разработаны другие механизмы, реализующие линейные и угловые перемещения, а также их комбинации. В качестве примера можно привести так называемый решетчатый привод в виде плоской заготовки из листового материала с двумя треугольными вырезами (рис. 5) [8]. Аналогичные способы применяют для юстировки головок считывания аудио- и видеомагнитофонов по углу в вертикальном направлении и положению по высоте ленты. Лазер также используют для регулировки зазора между контактами миниатюрных реле (рис. 6) [8].

Конструкция аналогичного привода приведена на рис. 7. Он представляет собой металлическую пластину с заглубленной центральной частью ($H > h$). С помощью лазерного излучения проис-

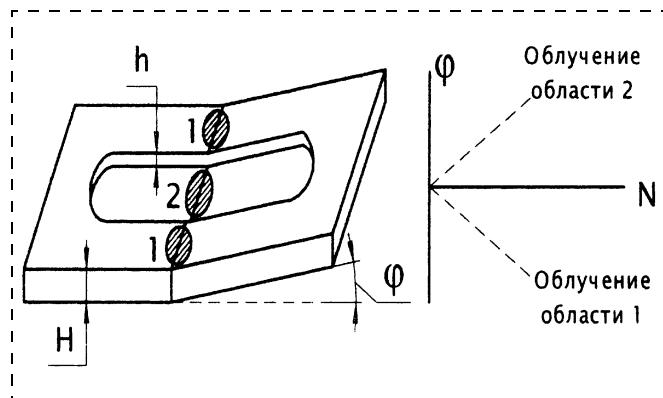


Рис. 7. Привод из пластины с заглублением

ходит укорачивание центральной или боковых частей пластины (зоны 1 или 2), вследствие чего свободная часть привода изгибаются в противоположных направлениях.

Еще одна конструкция актоатора представлена на рис. 8, он состоит из двух полых металлических цилиндров, соединенных тремя узкими перемычками (1, 2 и 3). Нагревая лазером эти перемычки, мы получаем поворот верхней, незакрепленной части, на некоторый угол α . Комбинируя прогреваемые участки и изменения степень их нагрева, мы можем получить сложное движение.

Аналогичные методики могут быть использованы в области микрооптики, в частности, для юстировки фотодиодов в устройствах считывания компакт-дисков. Кроме этого, Центром промышленных технологий фирмы Phillips ведется разработка оправ для микролинз, юстируемых с помощью лазерного излучения. Методы с использованием лазерного излучения также позволяют регулировать механические элементы, которые трудно или невозможно регулировать известными методами, например, элементы, помещенные в вакуумированную стеклянную колбу или расположенные на движущихся узлах. Цель этих методов —

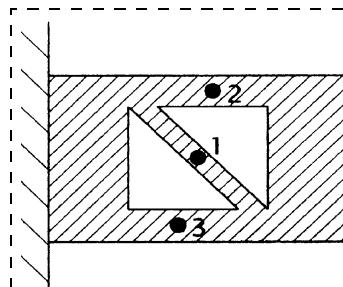


Рис. 5. Решетчатый привод

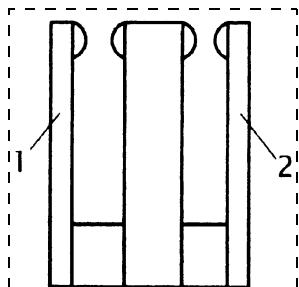


Рис. 6. Микрореле. Расстояние между контактами менее 1 мкм

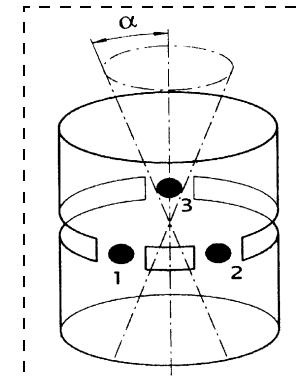


Рис. 8. Цилиндрический актоатор

повышение экономической эффективности, скорости, точности и производительности высокоточной сборки.

Следует указать также другую область возможного применения указанного механизма: использование лазерного излучения для осуществления пространственной развертки луча оптико-механическим дефлектором (сканером) [20]. Примеры такой конструкции изображены на рис. 9. В первом случае за аналог взята конструкция зеркала, помещенного в плоский кардановый подвес [22]. Во втором случае эта конструкция дополнена перемычками, предложенными в работе [8] и сделавшими ее оригинальной.

При облучении лазерным лучом перемычек возникают температурные напряжения и деформации, вызывающие поворот зеркала по двум угловым координатам. Видоизменяя конструкции перемычек, можно изменить технические характеристики актиоатора.

Другая конструкция оптико-механического дефлектора приведена на рис. 10. Дефлектор пред-

ставляет собой зеркало, установленное на трех сферических опорах, изготовленных из специального материала — ситалла, который имеет свойство изменять свои геометрические параметры при облучении лазером. При облучении лазером и нагревании шариков из ситалла наблюдается увеличение их объема примерно в 1,5 раза, при прекращении облучения объект уменьшается до первоначальных размеров. То есть, подвергая облучению шарообразную опору, мы изменяем ее радиус, и зеркало поднимается или опускается в определенную сторону. Варьируя облучаемые опоры и дозу облучения, можно добиться сканирования дефлектором по двум координатам.

Рассматриваемое направление появилось недавно и описано лишь в ограниченном числе работ [7, 8, 10, 11, 19, 23].

Указанные принципы построения актиоаторов имеют большие перспективы. К преимуществам рассмотренных актиоаторов можно отнести возможность автоматизации и отсутствие механического контакта между источником энергии и ис-

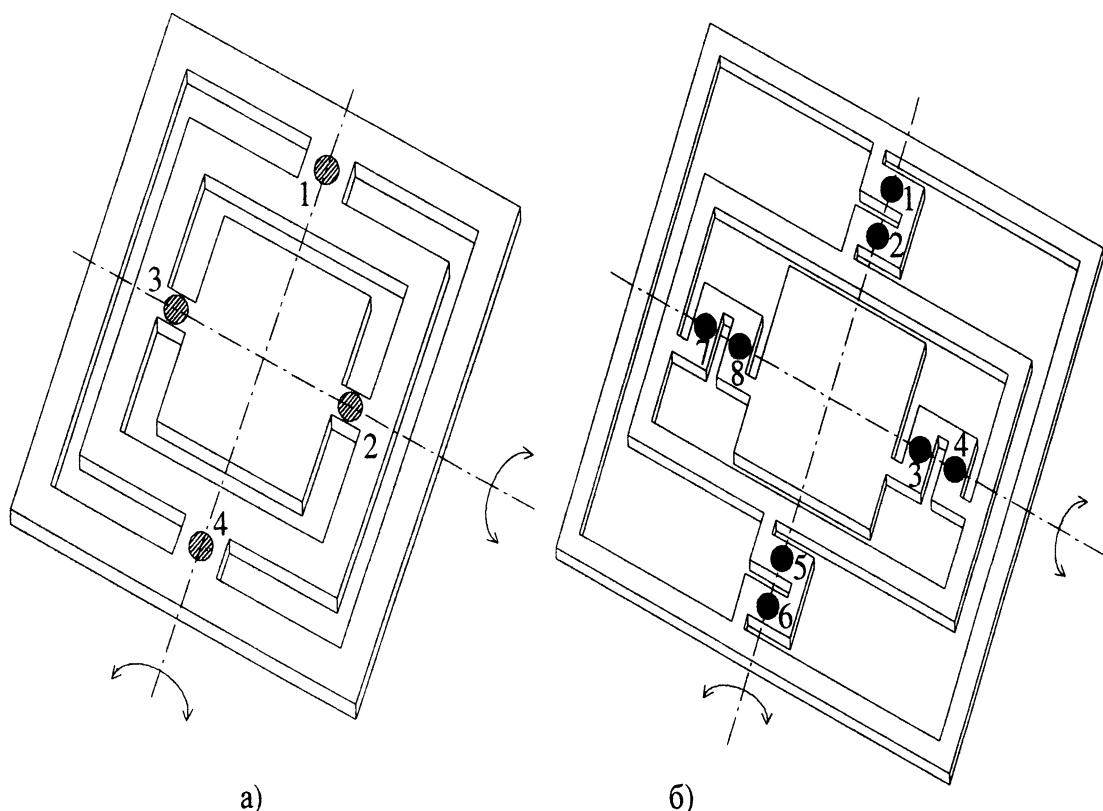


Рис. 9. Оптико-механический дефлектор (сканер) с бесконтактным приводом (цифрами обозначены области облучения)

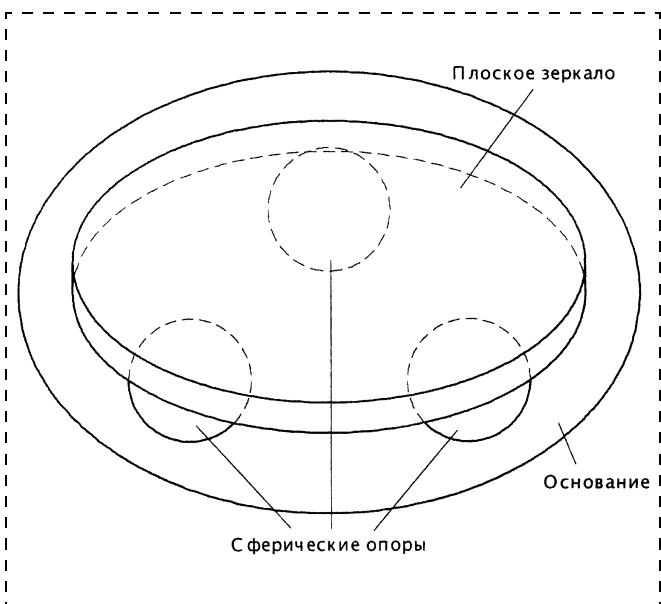


Рис. 10. Оптико-механический дефлектор на сферических опорах

полнительным механизмом в разных средах. Рассматриваемый метод можно использовать для регулировки пространственного положения деталей различного размера, но наиболее актуальным является применение лазера для позиционирования микродеталей [8], так как традиционные способы в этом случае малопригодны. Для решения вопроса о возможном обеспечении точности лазерного позиционирования необходимо провести ряд дополнительных исследований.

Таким образом, приведенные в настоящей работе результаты показывают, что лазер в режиме свободной генерации может быть использован для подстройки механических элементов, требующих точного углового позиционирования в указанных выше пределах.

Список литературы

1. Шалобаев Е. В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения макро- и микроуровней // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 5–10.
2. Пятышев Е. Н. и др. Специфика технологии микромеханических устройств / Е. Н. Пятышев, М. С. Лурье, И. В. Попова, А. Н. Казакин // Прикладная физика. 2000. № 2. С. 133–136.
3. Шалобаев Е. В. Сенсорика и 21-й век // Датчики и системы. 2001. № 1. С. 72–74.
4. Тринклер Х.-Р., Каноун О. Современное состояние сенсорной техники // Датчики и системы. 2001. № 11. С. 53–62.
5. Корляков А. В. Термомеханический микроактиuator / А. В. Корляков, В. В. Лучинин, И. В. Никитин, М. Н. Серкова // Петербургский журнал электроники. 2001. № 4. С. 65–70.
6. Афонин С. М. Пьезопривод наноперемещений с корректирующим пьезодатчиком // Датчики и системы. 2000. № 9. С. 31–34.
7. Вейко В. П., Петров А. А. Лазерная юстировка положения микродеталей в пространстве // Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ). Вып. 4. 2001. С. 113–118.
8. Вейко В. П., Петров А. А. Пространственное позиционирование микродеталей с помощью лазерного излучения // Микросистемная техника. 2002. № 5. С. 23–27.
9. Пятышев Е. Н. и др. Микротехнологии: от микроэлектроники к микросистемной технике / Е. Н. Пятышев, М. С. Лурье, Ю. Д. Акульшев, А. И. Скалон // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 58–66.
10. Muller B. Virtual Engineering helps to get laser adjustment industrially accepted. First international Symposium on Laser Precision Microfabrication // Proc. SPIE Vol. 4088. 2000. P. 164–167.
11. Vollertsen F., Geiger M. Laserstrahljustieren mechatronischer Komponenten. Laser – von der Wissenschaft zur Anwendung. Strahltechnik Bd. 10. Bremen: BIAS Verlag, 1997. P. 309–320.
12. Шалобаев Е. В. К вопросу о международном трансляторе по магнетронике // Магнетроника. 2002. № 2. С. 13–14.
13. Сазыкин Ю. М. О некоторых проблемах и перспективах развития теории управления в технических системах. Ковров: КГТА, 2001. С. 25–31.
14. Юрьевич Е. И. Робототехника в развитии идей кибернетики // Материалы X научно-технической конференции: Экстремальная робототехника. СПб.: СПбГТУ, 1999.
15. Сабинин Ю. А. Позиционные и следящие электромеханические системы. СПб.: Энергоатомиздат, 2001. 208 с.
16. Вейко В. П., Либенсон М. Н. Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973.
17. Вейко В. П. Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986. 210 с.
18. Вейко В. П., Мемов В. Лазерные технологии в микроэлектронике. София: Изд-во БолгАН, 1991. 364 с.
19. Вейко В. П. Лазерная микрообработка // Известия вузов. Приборостроение. 2002. № 6. С. 5–16.
20. Ефименко В. Т. и др. Сканирующие лазерные датчики в системе лечения и диагностики заболеваний / В. Т. Ефименко, Е. В. Шалобаев, А. В. Ефименко, Г. Н. Юркова // Датчики и системы. 2001. № 11. С. 47–49.
21. Локальное лазерное нанесение тонких пленок / В. П. Вейко, Ю. Д. Березин, В. А. Чуйко и др. // Известия РАН. Серия физики. 1997. Т. 61. № 8. С. 1627–1631.
22. Еременко А. Н. и др. Анализ влияния на устойчивость и операционные характеристики микромеханического зеркала параметров его проектирования / А. Н. Еременко, Е. С. Горнев, Н. А. Зайцев, И. В. Матюшкин, М. Ф. Равилов // Микросистемная техника. 2003. № 1. С. 7–12.
23. Hoving W. Laser adjustment, a novel technique to obtain fast, sub-micron accuracy in mass production // Second International Symposium on Laser Precision Microfabrication. Proc. SPIE. 2002. Vol. 4426.

Конструирование и моделирование МСТ

УДК 004.327.68

Ю. Н. Слесарев, канд. техн. наук,
Пензенский государственный университет

ИСКАЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМОМАГНИТНОЙ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

Приведен анализ искажений сигнала при термомагнитной записи информации. Выявлены основные причины, вызывающие нарушения временных и пространственных соотношений между исходными и записанными сигналами.

Плотность записи информации накопителей на оптических дисках во многом определяется разрешающей способностью тракта записи—воспроизведения, которую можно определить с учетом искажений временных параметров сигналов воспроизведения. При термической записи наибольшее влияние на искажения временных параметров оказывают искажения следа записи, поэтому анализ и возможность их уменьшения являются задачей, решение которой необходимо при построении оптоэлектронных запоминающих устройств с термомагнитной записью информации (ТМЗ).

Для решения задачи теплопроводности на движущемся носителе была выбрана следующая одномерная модель: толщина информационного слоя мала (т. е. температура одинакова по всей толщине слоя), подложка имеет малый (много меньше, чем информационный слой) коэффициент температуропроводности и бесконечную толщину. Более того, предполагаем, что вся теплота, генерируемая в течение одного такта записи, полностью рассеивается к следующему такту, т. е. к началу такта записи предыстория не известна. Градиент температуры через информационный слой также не учитывался, а это означает, что вся теплота поглощается в информационном слое. Принятые упрощения и предположения приведут только к количественному отличию от точного решения, качественный характер рассмотренного процесса, как показывают экспериментальные данные, сохраняется. Эти предположения вполне приемлемы для целей данного анализа.

Выберем систему координат, в которой ось x направлена по движению носителя. При данных допущениях решаем уравнение теплопроводности [1]

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + \frac{f(x, t)}{k_1 h},$$

где $f(x, t)$ — источник теплоты, имеющий гауссовское распределение интенсивности:

$$f(x, t) = \frac{P_{\text{зап}}}{\sqrt{2\pi(1+u^2)}r_0} e^{-\frac{2(x+vt)^2}{r_0^2(1+u^2)}},$$

k_1 — коэффициент теплопроводности носителя для записи; a_1^2 — коэффициент температуропроводности; $P_{\text{зап}}$ — мощность светового пучка записи; r_0 — радиус цветового пучка записи; u — нормированная расфокусировка светового пучка записи; v — скорость движения носителя; h — толщина носителя; $T(x, t)$ — температура в носителе за время t в точке с координатой x .

Распределение температуры можно найти, используя подход, изложенный в работе [2]:

$$T(y, y_t) = U_1 \{B(y_t - y_2)[F(y_t) - F(y_2)] - B(y_t - y_3)[F(y_t) - F(y_3)]\},$$

где $U_1 = \frac{I_{\text{зап}}r_0}{c_1\rho_1vh}$; $I_{\text{зап}}$ — интенсивность светового пучка записи; c_1 , ρ_1 — удельная теплоемкость и плотность носителя информации;

$$F(\xi) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left\{ e^{4\beta^2(\beta^2 + y_t - y)} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{2\beta^2 + 2y_t - y}{\sqrt{1 + \frac{y_t}{\beta^2}}}\right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \operatorname{erf}\left(\frac{2\beta^2 + 2y_t - \xi - y}{1 + \left|\frac{y_t - \xi}{\beta^2}\right|}\right) \right] + \operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{1 + \frac{y_t}{\beta^2}}}\right) - \right. \\ \left. - \operatorname{erf}\left(\frac{y - \xi}{\sqrt{1 + \frac{y_t - \xi}{\beta^2}}}\right) \right\};$$

$$\beta = \frac{1}{4a_1^2};$$

$y = \frac{x}{r_0}$ — нормированная пространственная координата; $y_t = \frac{vt}{r_0}$ — нормированное время наблюдения; $y_2 = \frac{vt_2}{r_0}$ — нормированное время включения импульса записи; $y_3 = \frac{vt_3}{r_0}$ — нормированное время выключения импульса записи; $B(\cdot)$ — функция включения Хевисайда.

Анализ распределения температуры на носителе записи для данной модели был проведен при изменении таких параметров, как диаметр лазерного пучка, длительность импульса записи, расфокусировка, скорость движения носителя и теплофизических параметров информационного слоя в широком диапазоне.

Результаты расчета представлены на рис. 1—4 для момента окончания импульса записи. На рис. 1 приведены графики распределения температуры поверхности носителя в зависимости от скорости его движения для фиксированной длительности импульса записи t . Длина следа записи L_{S_i} определяется пересечением кривой температуры с пороговой прямой. На всех рисунках длина следа обозначена толстой линией. Протяженность области переключения в значительной степени зависит от скорости записи и связана с расположением порога записи (соотношения максимальной температуры и пороговой температуры). Длительность импульса записи 200 нс.

Длина следа записи может как увеличиваться, так и уменьшаться с увеличением скорости записи.

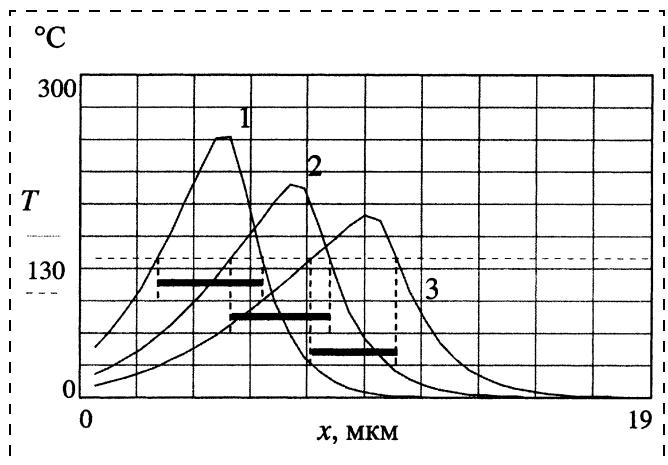


Рис. 1. Распределение температуры в зависимости от скорости движения носителя:

кривые 1, 2, 3 соответствуют скоростям движения 10, 15, 20 м/с; $r_0 = 0,5$ мкм

Регулирование уровня мощности записи (здесь рассматривается пороговая модель с пороговой температурой 130 °C) при записи дорожки с одной скоростью не устраняет полностью искажения длины следа записи при движении дорожки носителя с другой скоростью, т. е. отсутствует пропорциональность между длиной следа записи L_{S_i} и скоростью движения носителя, которую желательно иметь в соответствии с формулой

$$L_{S_i} = v_i t.$$

Для уменьшения данных искажений необходимо регулировать мощность лазерного излучения по мере изменения скорости записываемой дорожки. При уменьшении скорости дорожки мощность лазерного излучения должна уменьшаться по закону, близкому к линейному. С увеличением скорости движения носителя становится заметной асимметрия огибающей максимальных температур. Асимметрия температуры при ТМЗ приведет к неравномерности распределения намагниченности, поля записи и дополнительным искажениям следа записи.

На рис. 2 приведена зависимость распределения температуры от расфокусировки лазерного пятна записи, $r_0 = 0,5$ мкм. Скорость движения носителя записи 10 м/с. Если пороговый уровень будет таким, что при точной фокусировке записанный сигнал не будет искаженным (длительность сигнала воспроизведения будет равна длительности импульса записи), то при увеличении диаметра сфокусированного луча на 10 и 20 % искажения будут составлять 16 и 25 % от длительности следа записи при точной фокусировке. Поэтому устройство записи должно обеспечивать устойчивую работу системы фокусировки.

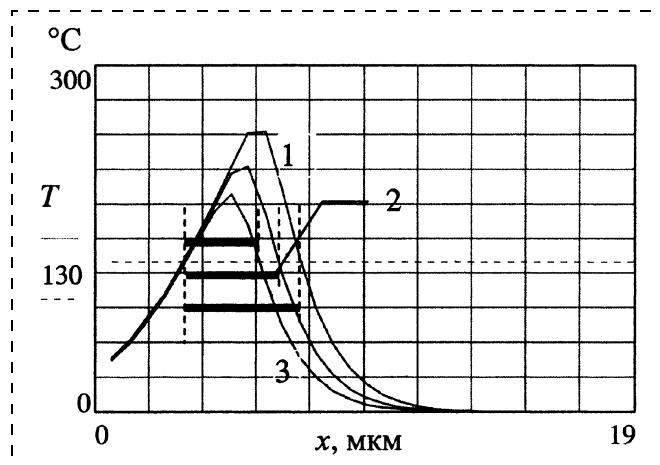


Рис. 2. Распределение температуры в зависимости от расфокусировки светового луча записи:

кривые 1, 2, 3 соответствуют записи точно в фокусе, 10- и 20%-ному увеличению диаметра сфокусированного пучка записи

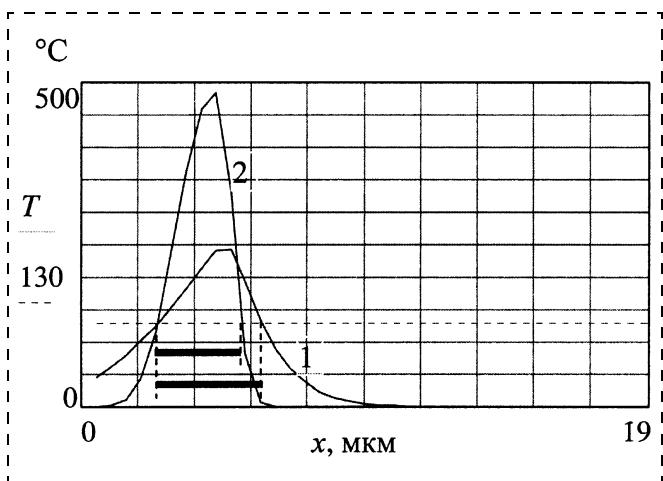


Рис. 3. Распределение температуры от изменения параметров информационного слоя:
кривые 1, 2 соответствуют параметру a_1^2 , равному 1 и 0,5

На рис. 3 приведена зависимость распределения температуры от изменения тепловых параметров информационного слоя (температуропроводности, теплоемкости, удельной плотности информационного слоя), $r_0 = 0,5$ мкм. Скорость движения носителя записи 10 м/с. Неодинаковость тепловых параметров свойственна носителям, изготовленным различными фирмами, поскольку эти параметры не регламентируются стандартами. Различие в тепловых свойствах может привести к несовместимости регистрирующих сред. Легко заметить, что искажения длительности следа записи можно уменьшить путем выбора соответствующей мощности источника излучения. Таким образом, флуктуации параметров носителя информационного слоя будут оказывать влияние на искажения следа записи.

На рис. 4 приведено распределение температуры на движущемся носителе в зависимости от длительности импульса записи, $r_0 = 0,5$ мкм. Скорость движения носителя записи 10 м/с. На рисунке видно, что для любого порогового уровня наблюдается непропорциональность между дли-

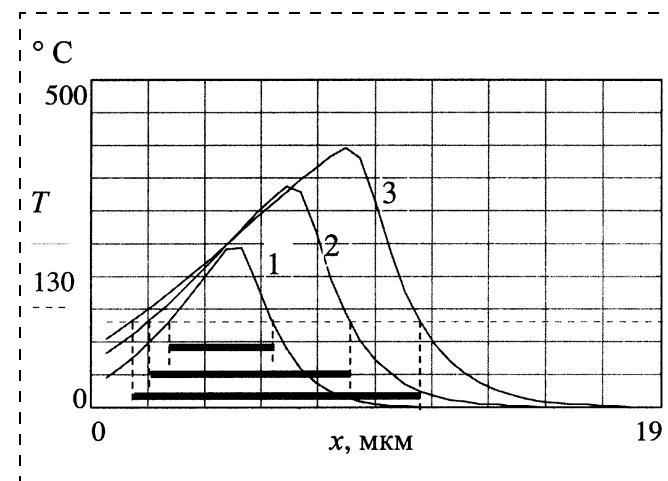


Рис. 4. Распределение температуры от изменения длительности импульса записи:
кривые 1, 2, 3 соответствуют длительности 200, 400, 600 нс

тельностью импульса записи и длиной следа записи, что при воспроизведении приводит к временным ошибкам формирования импульсов воспроизведения. Воспроизводимые импульсы по длительности не будут соответствовать записываемым.

Все рассмотренные искажения влияют на положение передней или задней кромок следа записи и их положение лишь приближенно соответствует временному положению сигналов записи. А так как для потенциальных методов записи именно положение области переключения соответствует сигналу 1 или 0, то они менее пригодны для высокоплотной записи, чем импульсные методы, хотя и обладают большей информативностью.

Список литературы

1. **Фотографирование** на магнитные пленки / Л. М. Клюкин, Б. М. Степанов, В. А. Фабриков, А. В. Хромов. М.: Атомиздат, 1971. 110 с.
2. **Бузин О. Ф.** Лазерное испарение тонких пленок при термооптической записи информации на движущийся носитель / О. Ф. Бузин, В. И. Притченко // Вопросы радиоэлектроники. ЭВТ. 1985. Вып. 13. С. 31—37.

В. П. Драгунов, канд. физ.-мат. наук,
Новосибирский государственный технический
университет

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Приведена обобщенная модель для эффекта неконтролируемого электростатического притяжения (*pull-in instability*) в микроэлектромеханических системах с электростатическим управлением. Модель сведена к системе алгебраических уравнений. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить критический прогиб и критическое напряжение для упругих элементов круглой, квадратной, треугольной и шестиугольной формы.

Введение

При разработке микроэлектромеханических систем (МЭМС) возникает необходимость в оценке влияния электростатических полей на поведение их упругого элемента (УЭ). В МЭМС электрическое поле может использоваться для управления движением УЭ (микроклапаны, микрореле, перестраивающие зеркала, интеллектуальные среды) и преобразования механического перемещения в электрический сигнал (емкостные преобразователи, микрофоны, гироскопы). Одной из первых работ по исследованию влияния электрического поля на УЭ МЭМС была работа [1], где проанализировано поведение простейшей механической системы (рис. 1) (*mass-spring model*). Предполагалось, что на электроды действуют только сила $F_{\text{уп}}$ упругости пружи-

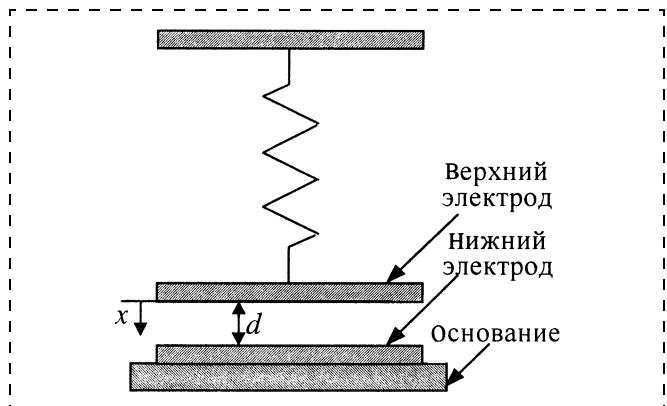


Рис. 1. Схема простейшей электромеханической системы

ны и электростатическая сила $F_{\text{эл}}$. В этом случае уравнение равновесия представляется в виде

$$F_{\text{уп}} + F_{\text{эл}} = -kx + \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{2} \left(\frac{V}{d-x} \right)^2 = 0,$$

где k — коэффициент квазиупругой силы; ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость; S — площадь электрода; V — приложенное напряжение. В безразмерных переменных уравнение равновесия можно представить в следующей форме:

$$W(W-1)^2 = V^*, \quad (1)$$

где $W = x/d$ и $V^* = \epsilon_0 \epsilon S V^2 / (2 k d^3)$.

Зависимость относительного смещения W верхнего электрода от приведенного напряжения V^* , рассчитанная с использованием формулы (1), показана на рис. 2. Данная кривая отражает характерные особенности поведения МЭМС при изменении управляющего напряжения. Видно, что в интервале $0 - V_{\text{кр}}^*$ каждому значению управляющего напряжения соответствуют два состояния системы. При этом нижняя ветвь с $0 \leq W < W_{\text{кр}}$ соответствует устойчивому состоянию, а верхняя с $W \geq W_{\text{кр}}$ — неустойчивому.

Анализируя поведение относительного изменения приращения силы упругости F_1 и электростатической силы F_2 , где

$$F_1 = \frac{1}{F_{\text{уп}}} \frac{\partial F_{\text{уп}}}{\partial W} = \frac{1}{W}, \quad F_2 = \frac{1}{F_{\text{эл}}} \frac{\partial F_{\text{эл}}}{\partial W} = \frac{2}{(1-W)},$$

от смещения W (рис. 3), видно, что при изменении W от нуля до $W_{\text{кр}}$ превалирует F_1 , а при $W > W_{\text{кр}} - F_2$. В точке "a" (см. рис. 2) $F_1 = F_2$. Таким образом, в критической точке не только $F_{\text{уп}} + F_{\text{эл}} = 0$, но и $\partial F_{\text{уп}} / \partial W + \partial F_{\text{эл}} / \partial W = 0$. В результате на участке

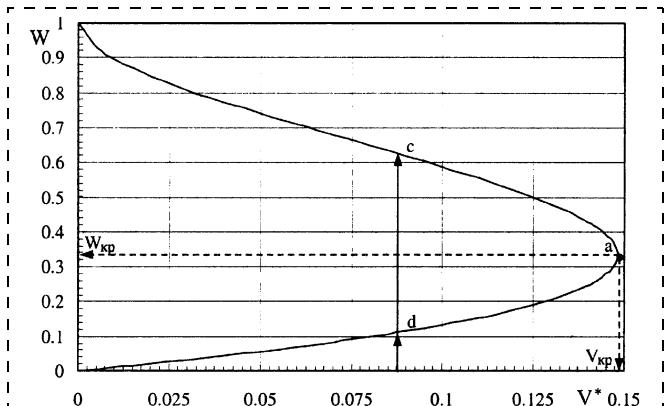


Рис. 2. Зависимость относительного смещения верхнего электрода W от приведенного напряжения V^* для электромеханической системы, показанной на рис. 1

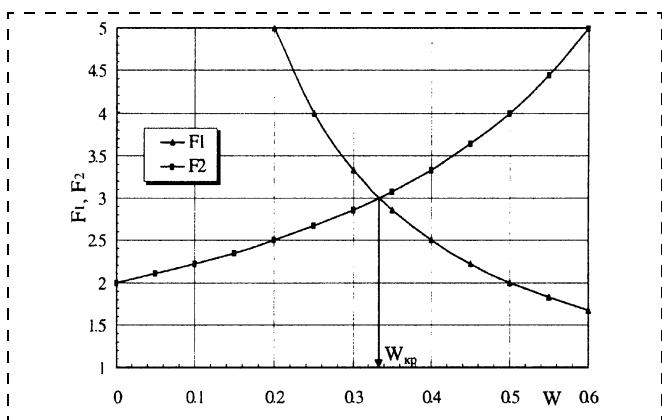


Рис. 3. Зависимости относительного изменения приращения силы упругости F_1 и электростатической силы F_2 от прогиба W

с $0 \leq W < W_{kp}$ силе упругости удается скомпенсировать возрастание электростатической силы при случайных флуктуациях системы, приводящих к увеличению смещения. Однако на участке с $W \geq W_{kp}$ малейшие флуктуации в сторону увеличения смещения приведут к дальнейшему увеличению смещения вплоть до $W = 1$ (т. е. до схлопывания электродов), так как в этом случае сила упругости уже не сможет скомпенсировать приращение электростатической силы. Анализ показывает, что для данной системы

$$W_{kp} = 1/3, \quad \text{а} \quad V_{kp} = 0,183 \cdot 10^6 \sqrt{kSd^3}/S.$$

После схлопывания система перестает реагировать на изменения управляющего напряжения (stiction effect). В этом случае работоспособность системы может быть восстановлена либо с помощью принудительного отрыва упругого элемента от основания, либо при уменьшении управляющего напряжения до нуля.

Явление схлопывания (pull-in instability) является типичным для электромеханических систем с подвижными электродами. Особенности, присущие конкретной системе, могут быть связаны с формой УЭ и электродов, с зависимостью прогиба от координаты, с жесткостью системы и ее конструктивными особенностями.

Проведем анализ влияния электрического поля на поведение основных видов УЭ, используемых в МЭМС [2].

Постановка задачи

При приложении электрического напряжения между УЭ МЭМС — мемброй и нижним электродом (рис. 4) — УЭ прогибается, что и используется для совершения полезной работы. Прогиб УЭ определяется, в первую очередь, его конструкцией

(топологией и анизотропией упругих свойств), а также формой и особенностями электродов (наличием диэлектрического покрытия, величиной и распределением электрических зарядов).

При моделировании работы подвижного узла МЭМС необходимо находить самосогласованные решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих распределение электрического поля в зазоре УЭ — нижний электрод (уравнение Пуассона) и механические характеристики УЭ. В свою очередь, наличие точки ветвления существенно затрудняет численные расчеты и делает актуальным поиск аналитических решений.

В данной статье ограничимся рассмотрением упругих элементов с малым аспектным отношением. Тогда при оценке распределения напряженности электрического поля под мембраной можно не учитывать искривление силовых линий, а также пренебречь краевыми эффектами.

Упругий элемент круглой формы

Рассмотрим решение задачи об изгибе плоской круглой изотропной мембранны радиуса R и толщины h , жесткозашемленной по контуру, под действием однородного электрического поля (рис. 4). Если между такой мембраной и основанием приложить электрическое напряжение V , то мембра подвергнется осесимметричному изгибу. При этом давление, действующее на мембрану со стороны однородного электрического поля, будет определяться выражением

$$P_{\text{эл}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon V^2}{2(d - W(r))^2}, \quad (2)$$

здесь $W(r)$ — прогиб мембранны.

Поскольку рассматривается осесимметричный изгиб, то все напряжения и деформации в мемbrane будут зависеть только от координаты r . Если предположить, что мембра относится к классу жестких пластин и прогибы ее достаточно малы



Рис. 4. Микромеханическая система с электростатическим управлением

$(W \ll h)$, то уравнение равновесия представится в виде

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dW(r)}{dr} \right) \right] \right\} - \frac{P_{\text{эл}}}{D} = 0, \quad (3)$$

где D — изгибная жесткость.

Уравнение (3) можно решить лишь приближенными методами или численно. Рассмотрим решение задачи методом Бубнова—Галеркина (БГ).

В данном случае уравнение метода БГ для вариации прогиба $\delta W(r)$ можно представить в виде

$$\int_0^R \left\{ \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dW(r)}{dr} \right) \right] \right\} - \frac{P_{\text{эл}}}{D} \right] \delta W(r) \right\} r dr = 0. \quad (4)$$

В качестве аппроксимирующей функции для прогиба мембранны $W(r)$ будем использовать выражение

$$W(r) = W(0)(1 - r^2/R^2)^2, \quad (5)$$

удовлетворяющее граничным условиям жесткого защемления и совпадающее с точным решением для прогиба жесткозашемленной пластинки при воздействии равномерно распределенного поперечного давления P . Подставляя (5) в (4), после интегрирования можно представить уравнение для определения $W(0)$ в виде

$$421,104z^2\sqrt{z}(1-z) - [z + (z-1)\operatorname{arcth}\sqrt{z}]SV = 0, \quad (6)$$

где $z = W(0)/d$, $SV = 0,5\epsilon_0\epsilon S^2V^2/(Dd^3)$, а S — площадь мембранны. Решая (6), найдем $W(0)$, удовлетворяющее данной задаче.

На рис. 5 приведена зависимость относительного прогиба центра круглой мембранны от величины SV (кривая $Wd(0)$). Данная зависимость является универсальной и позволяет определить прогиб в центре круглой жесткозашемленной мембранны при заданном значении приложенного напряжения. Линейное приближение предполагает, что максимальные прогибы не превышают $0,2h$.

Используя (6), можно рассчитать критический прогиб (pull-in displacement) и критическое напряжение (pull-in voltage). Оказалось, что

$$W_{\text{кр}} = 0,464d, \quad \text{а} \quad V_{\text{кр}} = 5,63 \cdot 10^6 \sqrt{d^3 D / S}. \quad (7)$$

Таким образом, при сделанных допущениях критический прогиб, как и в mass—spring model, определяется только зазором между мембранны и жестким основанием. Однако значение $W_{\text{кр}}$ для круг-

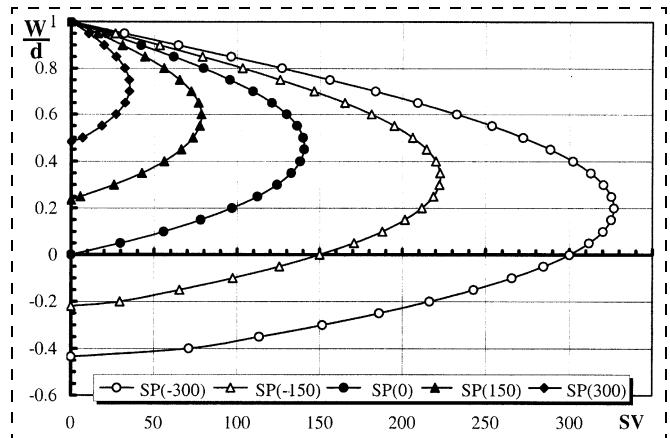


Рис. 5. Зависимости нормированного прогиба W/d для круглой мембранны от приведенного электрического напряжения SV при значениях нормированного внешнего давления SP : $-300, -150, 0, 150$ и 300

лой мембранны в 1,39 раза больше. Критическое же напряжение, как и в рамках простой модели, оказалось зависящим от всех механических характеристик системы и возрастает не только при увеличении зазора d , но и при увеличении жесткости мембранны.

В рамках метода БГ наряду с электрическим полем удается учесть и воздействие внешнего давления P . При этом второе слагаемое в (4) принимает вид $(P_{\text{эл}} + P)/D$ и вместо (6) получим

$$(105,276z - 0,1667SP)4z\sqrt{z}(1-z) - [\sqrt{z} + (z-1)\operatorname{arcth}\sqrt{z}]SV = 0, \quad (8)$$

здесь $SP = S^2P/(dD)$ — нормированное внешнее давление.

Результаты расчета прогибов круглой мембранны при одновременном воздействии электрического поля и внешнего давления приведены на рис. 5. При расчете за положительное принимали давление, прижимающее мембранны к жесткому основанию. В области устойчивого равновесия внешнее давление приводит к параллельному сдвигу кривых, изменению $W_{\text{кр}}$ и $V_{\text{кр}}$. Анализ показывает, что в этом случае

$$W_{\text{кр}} = \frac{10,457 + 0,01638SP}{10,2445 - 0,006898SP + 12,249\sqrt{1 + 1,0553 \cdot 10^{-6}SP^2}} d; \quad (9)$$

$$SV_{\text{кр}} = -0,484SP - 718,872 + 859,534\sqrt{1 + 1,0553 \cdot 10^{-6}SP^2}. \quad (10)$$

Зависимости $W_{\text{кр}}$ и $SV_{\text{кр}}$ приведены на рис. 6 и 7. Видно, что при увеличении внешнего давления критический прогиб центра мембранны растет, а критическое напряжение — уменьшается, причем рост $W_{\text{кр}}$ происходит медленнее, чем увеличивается на-

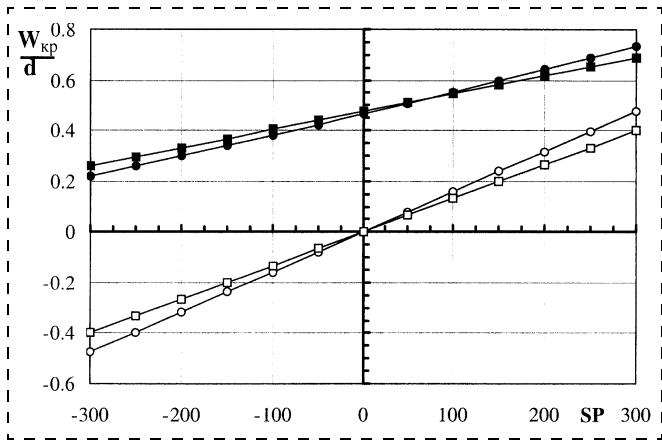


Рис. 6. Зависимости критического (●■) и максимального (при $V = 0$) (○□) прогибов для круглой и квадратной мембран от нормированного внешнего давления SP

чальный прогиб центра данной мембраны в отсутствие электрического напряжения. Отметим также, что согласно (9) в области отрицательных внешних давлений могут наблюдаться отрицательные значения W_{kp} , т. е. в случае, когда внешнее давление действует против электрического поля, при увеличении управляющего напряжения состояние неустойчивого равновесия может быть достигнуто при плоской мемbrane и даже когда мембра на выгнута от основания. В свою очередь, данный эффект может существенно сказываться при функционировании различного рода компенсационных устройств.

Квадратный упругий элемент

Рассмотрим влияние электрического поля на прогиб УЭ МЭМС, содержащей плоскую квадратную мембрану толщиной h , расположенную на расстоянии d от жесткого основания, как показано на рис. 4. Давление, действующее на мембрану со стороны однородного электрического поля, и в данном случае определяется выражением (2), но с $W = W(x, y)$. При этом, в отличие от случая с круглой мембраной, данная задача не сводится к одномерной.

Будем полагать, что мембра на относится к классу жестких пластин и прогибы ее достаточно малы ($W \ll h$). Тогда уравнение равновесия для изотропной мембраны можно представить в виде

$$X = \left(\frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial y^4} \right) - \frac{P_{\text{эл}}}{D} = 0.$$

Для случая жесткого защемления по внешнему контуру представим прогиб квадратной мембраны в виде

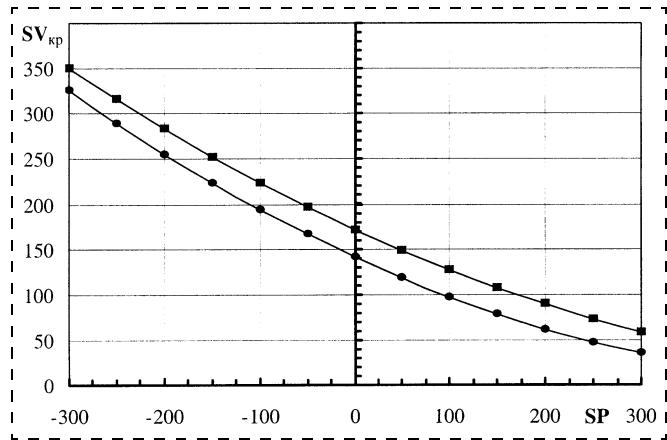


Рис. 7. Зависимости критического напряжения для круглой (●) и квадратной (■) мембранны от нормированного внешнего давления SP

$$W(x, y) = A_{00}(x^2 - a^2)^2(y^2 - a^2)^2, \quad (11)$$

здесь $2a$ — ширина мембраны.

Теперь, используя (11), в рамках метода БГ можно определить A_{00} и, следовательно, прогиб мембраны при воздействии электрического поля. Получающееся при этом уравнение оказывается громоздким и неудобным для практического применения [3]. Однако в интервале $0 \leq z \leq 0,94$ (где $z = W(0, 0)/d$) с погрешностью менее 5 % его можно аппроксимировать выражением

$$0,2178z^3 - 1,2178z^2 + z - 0,001307SV = 0. \quad (12)$$

Анализ (12) показывает, что в случае упругого элемента квадратной формы значения критического прогиба и критического напряжения можно оценить, используя выражения

$$W_{kp} = 0,477d, \quad V_{kp} = 6,22 \cdot 10^6 \sqrt{d^3 D / S}. \quad (13)$$

Результаты расчета прогибов центра квадратного УЭ при одновременном воздействии электрического поля и внешнего давления приведены на рис. 8. Видно, что и в данном случае учет внешнего давления приводит к параллельному сдвигу кривых в области устойчивого равновесия, а также к изменению W_{kp} и V_{kp} . При этом зависимости W_{kp} и V_{kp} от нормированного внешнего давления SP могут быть представлены в виде

$$\frac{W_{kp}}{d} = 2,294 + 0,0004431SP - \sqrt{3,3022 - 0,001016SP + 1,96 \cdot 10^{-7}SP^2}; \quad (14)$$

$$SV_{kp} \approx 171,3882 - 0,48243SP + 3,6919 \cdot 10^{-4}SP^2 - 4,1144 \cdot 10^{-8}SP^3. \quad (15)$$

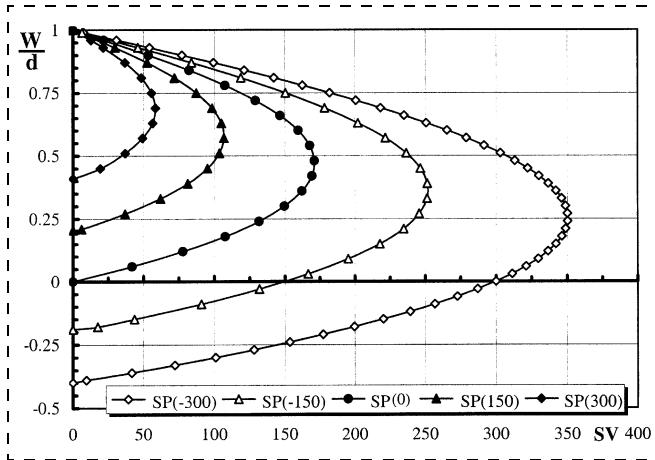


Рис. 8. Зависимости нормированного прогиба W/d для квадратной мембранны от приведенного электрического напряжения SV при значениях нормированного внешнего давления SP : $-300, -150, 0, 150$ и 300

Данные зависимости показаны на рис. 6 и 7. Видно, что они схожи с соответствующими кривыми для круглой мембранны, однако для квадратной мембранны изменения несколько меньше.

Треугольный упругий элемент

В настоящее время технологии микроэлектроники позволяют создавать УЭ не только круглой и квадратной, но и другой формы [2]. Используя метод БГ, можно провести анализ поведения МЭМС, имеющих УЭ практически любой формы. Например, полагая, что УЭ имеет форму равностороннего треугольника со сторонами длиной $2a$, жестко защемленного по контуру, в качестве пробной функции можно выбрать функцию

$$W(x, y) = A_{00} y^2 [(y - \sqrt{3} a)^2 - 3x^2]^2. \quad (16)$$

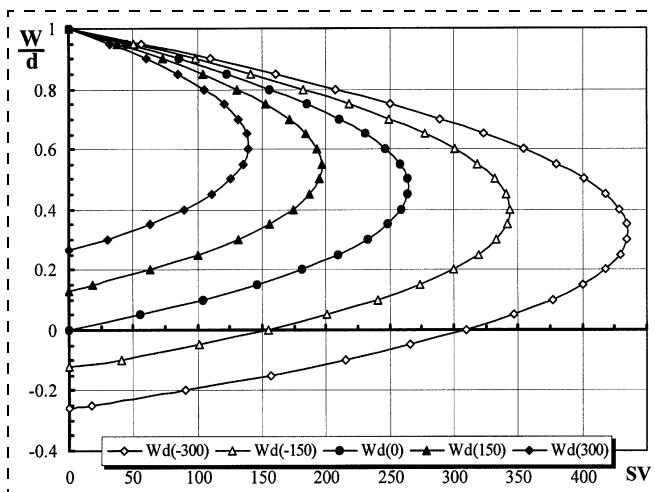


Рис. 9. Зависимости нормированного прогиба W/d для треугольной мембранны от приведенного электрического напряжения SV при значениях нормированного внешнего давления SP : $-300, -150, 0, 150$ и 300

Тогда выражение для нормированного прогиба центра мембранны удается представить в следующем виде:

$$260,62z^3 - 1445,2z^2 + 1184,6z - SV = 0, \quad (17)$$

где $z = W(0, 0)/d$. Отсюда получим, что

$$W_{kp} = 0,47d, \quad \text{а } V_{kp} = 7,73 \cdot 10^6 \sqrt{d^3 D/S}. \quad (18)$$

Кроме того, при учете внешнего давления можно показать, что

$$\frac{W_{kp}}{d} = 1,8485 + 0,0002904 SP - 1,38 \sqrt{1 - 2,822 \cdot 10^{-4} SP + 4,43 \cdot 10^{-8} SP^2}, \quad (19)$$

$$\text{а } SV_{kp} \approx 264,58 - 0,49086 SP + 2,535 \cdot 10^{-4} SP^2 - 2,368 \cdot 10^{-8} SP^3. \quad (20)$$

Соответствующие зависимости, рассчитанные с использованием (17), (19) и (20), показаны на рис. 9, 10 и 11. Видно, что они подобны соответствующим характеристикам для УЭ круглой и квадратной формы. Однако для достижения одинаковых прогибов в случае треугольного УЭ требуется существенно большие электрические напряжения и внешние давления.

Шестиугольный упругий элемент

Полагая, что упругий элемент имеет форму шестиугольника (рис. 12), жесткозашемленного по

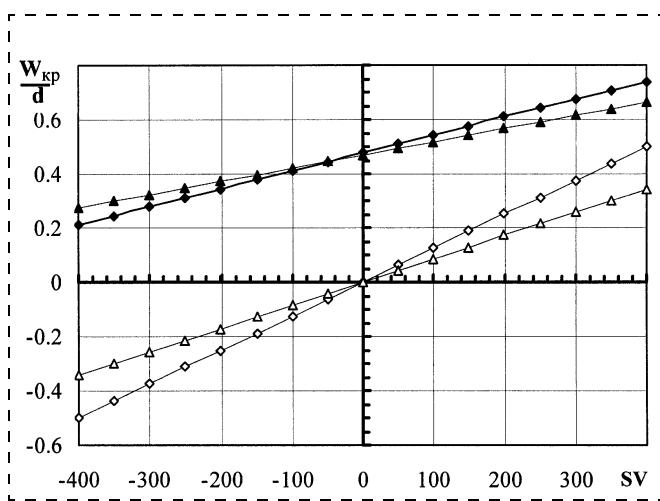


Рис. 10. Зависимости критического ($\blacktriangle\blacksquare$) и максимального (при $V = 0$) ($\Delta\delta$) прогиба для треугольной и шестиугольной мембранны от нормированного внешнего давления SP

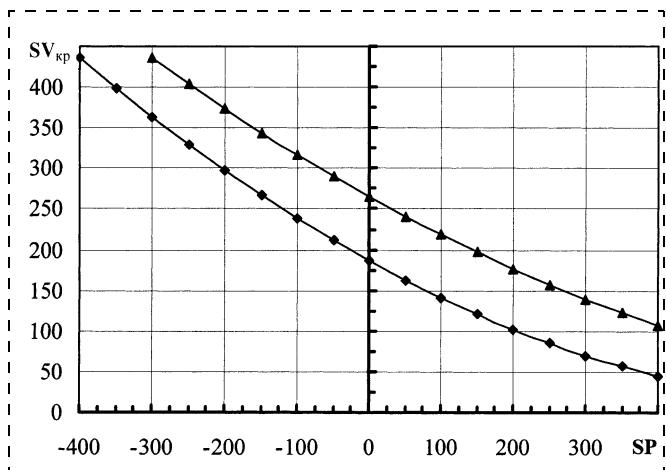


Рис. 11. Зависимости критического напряжения для треугольной (▲) и шестиугольной (◆) мембран от нормированного внешнего давления SP

контуру, в качестве пробной функции можно выбрать функцию

$$W(X_1, X_2) = A_0(X_2^2 - 1)^2[(X_2(1 - n) - 1)^2 - X_1^2]^2[(X_2(1 - n) + 1)^2 - X_1^2]^2, \quad (21)$$

где $X_1 = x/a$ и $X_2 = y/b$, $n = c/a$.

Рассматривая влияние электрического поля на МЭМС (см. рис. 4) с шестиугольным УЭ, в рамках метода БГ выражение для нормированного прогиба центра мембранны при $n = 0,5$ можно представить в виде

$$193,6z(1 - z^2)(2\eta^{-2} + 1 + 1,125\eta^2) - SV(1 + 1,125z + 0,0724z^2 + 0,251z^3) = 0, \quad (22)$$

где $z = W(0, 0)/d$; $\eta = b/a$. Анализ (22) показывает, что для УЭ в форме шестиугольника

$$W_{kp} = 0,477d, \quad a \\ V_{kp} = 3,19 \cdot 10^6 \sqrt{(2\eta^{-2} + 1 + 1,125\eta^2)d^3 D/S}. \quad (23)$$

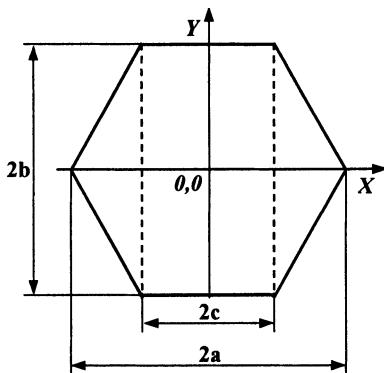


Рис. 12. Шестиугольный упругий элемент

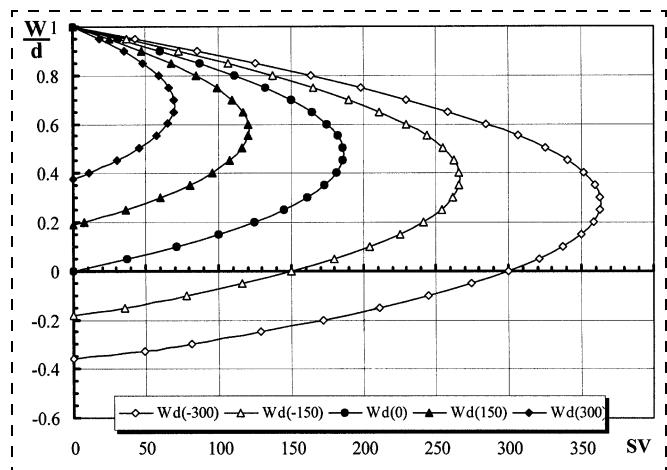


Рис. 13. Зависимости нормированного прогиба W/d для шестиугольной мембранны от приведенного электрического напряжения SV при значениях нормированного внешнего давления SP : -300, -150, 0, 150 и 300

Согласно (23) минимальное V_{kp} будет у мембранны с $\eta \approx 1,155$

Если наряду с электрическим полем на УЭ действует и внешнее давление P , то выражение для критического прогиба при $\eta = 1$ можно представить в виде

$$W_{kp} = (-13,3 + 13,7767 \sqrt{1 + 9,579 \cdot 10^5 SP})d. \quad (24)$$

При этом для критического напряжения получим

$$SV_{kp} = 186,1 - 0,49 SP + 3,4 \cdot 10^{-4} SP^2. \quad (25)$$

Результаты расчета прогибов УЭ с $\eta = 1$ и $\eta = 0,5$ при одновременном воздействии электрического поля и внешнего давления приведены на рис. 13. Зависимости W_{kp}/d и SV_{kp} для шестиугольного УЭ от нормированного внешнего давления SP при $\eta = 1$ и $n = 0,5$ приведены на рис. 10 и 11. На рис. 10 представлена также зависимость прогиба центра данной мембранны от нормированного внешнего давления SP при отсутствии электрического поля. Видно, что качественно зависимости для шестиугольного УЭ аналогичны соответствующим зависимостям для круглого, квадратного и треугольного упругих элементов.

Заключение

Исследовано влияние электрического поля и внешнего давления на характеристики МЭМС, содержащих УЭ круглой, квадратной, треугольной и шестиугольной формы. Установлено, что критический прогиб слабо зависит от формы УЭ и определяется начальным зазором между электродами $W_{kp} \approx 0,47d$, в то время как критическое напряжение оказывается более чувствительным к изменению формы УЭ. Сопоставление наших результатов для упругого элемента квадратной формы с резуль-

татами численного анализа [4] показало, что отличие в оценке значения приведенного критического напряжения SV_{kp} не превышает 1 %.

Список литературы

1. Nathanson H. C., Newell W. E., Wickstrom R. A., Davis J. R. The resonant gate transistor // IEEE Trans. On Electron Devices. 1967. N 14. P. 117–133.
2. Dragunov V. P., Voroshilov V. P. Optimization of the arrangement of the piezoresistors on the elastic elements of the non-

traditional form // Proc. 4th Russian-Korean Int. Symp. on Science and Technology (KORUS—2000), Ulsan, Republic of Korea. 2000. V. 2. P. 240–243.

3. Dragunov V. P. A simple technique for the simulation of capacitive pressure transducers // Proc. 6th Int. Conf. on actual problems of electronic instrument engineering, Novosibirsk. 2002. V. 1. P. 11–15.

4. Francais O., Dufour I. Normalized abacus for the global behavior of diaphragms: pneumatic, electrostatic, piezoelectric or electromagnetic actuation // J. of Modeling and Simulation of Microsystems. 1999. V. 1. N 2. P. 149–160.

ФИНАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 544.478.02

С. Ю. Царева, канд. хим. наук,
Российский химико-технологический
университет им. Д. И. Менделеева, Москва

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ КАТАЛИЗАТОРА И ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА НА МОРФОЛОГИЮ МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ПИРОЛИЗА УГЛЕВОДОРОДОВ

Работа посвящена изучению влияния природы катализатора и некоторых технологических параметров на морфологию многослойных углеродных нанотрубок (УНТ) в методе каталитического пиролиза углеводородов. Проведено несколько серий синтезов с различными соединениями железа и никеля в качестве источников металлических наноразмерных частиц катализатора, с бензolem и толуолом в качестве источников углерода. Продукты синтеза анализировали с использованием методов сканирующей электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, рамановской спектроскопии. По результатам исследования на частицах Fe катализатора получены многослойные УНТ преимущественно коаксиально-конической структуры, на частицах Ni — коаксиально-цилиндрической структуры. Добавление в процесс серосодержащих соединений приводит к увеличению размеров внутренней полости трубки и в некоторых случаях — к заполнению полости материалом катализатора. Добавление водорода приводит к увеличению выхода УНТ.

Введение

Углеродные нанотрубки — один из самых перспективных новых материалов для использования в разнообразных областях науки и техники, таких

как наноэлектроника, новейшие композиционные материалы и др. [1]. Огромные (до несколько тысяч раз) отношения длины к диаметру и отсутствие свободных связей по длине трубы определяют уникальную прочность, проводимость и химическую стабильность этого материала. По числу слоев нанотрубки классифицируют как однослойные (структура представляется как цилиндр, свернутый из графитовой плоскости) [2] или многослойные с различным расположением слоев (коаксиально-конические, коаксиально-цилиндрические, бамбукоподобные) [3–5]. Структура нанотрубок определяет их свойства. В зависимости от ориентировки углеродных шестиугольников в слое относительно ее оси (хиральности трубы) однослойные нанотрубки могут обладать проводимостью металла или полупроводника [2].

Многослойные нанотрубки коаксиально-цилиндрической структуры имеют ровный внутренний канал и внешнюю поверхность, что определяет их большую прочность по сравнению с другими многослойными нанотрубками и может быть использовано для получения легких сверхпрочных композитов [6]. Выход графитовых слоев на поверхность в коаксиально-конической нанотрубке облегчает эмиссию электронов в этих трубках [7]. Такие трубы интересны для получения новых интеркалированных соединений [8]. Хорошая эмиттирующая способность концов нанотрубки предопределяет использование ее для создания дисплеев высокой яркости [9]. В свою очередь, морфология нанотрубки определяется условиями синтеза.

Основными методами получения углеродных нанотрубок на сегодняшний день являются электродуговой метод [10], метод лазерной абляции [11], метод каталитического пиролиза углеводородов и CO [12, 13]. Из всех известных способов синтеза углеродных нанотрубок можно выделить метод каталитического пиролиза углеводородов как наибо-

лее перспективный. В этом методе, по сравнению с другими, можно контролировать наибольшее число параметров процесса. К таким параметрам относятся вид источника углерода и катализатора, способ ввода их в процесс, общее и парциальное давление, температура синтеза, различные добавки и др. Кроме того, метод имеет значительные преимущества благодаря более низким температурам процесса. И это единственный метод (не считая HiPCO [13], где источником углерода служит CO), в котором можно получать массивы из ориентированных нанотрубок, интересные для различного использования (например, для создания дисплеев).

Задача установления зависимости выхода и морфологии нанотрубок от различных параметров проведения синтеза — ключевая для разработки технологии получения трубок желаемого качества. Решению этой задачи и посвящена данная статья.

Частицы катализатора являются центрами зарождения и дальнейшего роста углеродных нанотрубок. К катализаторам, способным растворять некоторое количество углерода и образовывать с ним слабые химические связи, относятся металлы переменной валентности (Fe, Ni, Co и др.). Наличие высокотемпературной неустойчивой карбидной фазы может являться косвенным признаком возможности применения данного металла в качестве катализатора процесса образования углеродных нанотрубок. Однородность по размеру частиц катализатора позволяет при прочих равных условиях получать однородные по размеру и качеству нанотрубки. Диаметр растущих нанотрубок (D_{tube}) связан с диаметром частиц катализатора ($D_{particle}$) как $D_{tube} = 0,8D_{particle}$ [14]. Исходя из этого соотношения нетрудно подсчитать, что в процесс получения однослойных нанотрубок необходимо ввести частицы катализатора размером порядка единиц—десятков нанометров, для многослойных — десятков—сотен нанометров. При температурах синтеза 700–1000 °C (в пиролитических методах) частицы металлов такого размера жидккие и способны обеспечить достаточную подвижность хемосорбированного углерода, образующегося в процессе пиролиза углеводорода. Обеспечение процесса однородными и малыми по размеру частицами металла является достаточно сложной технологической задачей, так как частицы такого размера обладают избытком поверхностной энергии и, стремясь снизить ее, будут взаимодействовать с друг с другом и материалом подложки (если катализатор нанесен на подложку).

Эксперимент

Для введения в процесс наноразмерных частиц катализатора предложено распылять в зону пиролиза колloidный или истинный раствор углеводо-

рода и соли металла ("предкатализатор"), которые разлагаются при температуре синтеза [1]. Другими словами, наноразмерные активные частицы катализатора образуются непосредственно в зоне пиролиза, где тут же и участвуют в процессе зарождения и дальнейшего роста нанотрубок, хемосорбируя углерод, поступающий из углеводорода при его разложении. Для распыления смеси предкатализатора и углеводорода использованы пневматическое и ультразвуковое (УЗ) распыление. УЗ распыление среди прочих является наиболее регулируемым и производительным. Размер аэрозольных частиц при ультразвуковом распылении соответствует полудлине капиллярной волны [15], т. е. размер частиц аэрозоля регулируется частотой распыления.

По результатам проведенных расчетов сделан вывод, что при УЗ распылении реакционной смеси на частоте от 2,5 МГц размер жидкой капли углеводорода с катализатором составляет порядка 1,7 мкм, а размер образующихся частиц металлического железа — 74 нм, никеля — 72 нм. На частицах катализатора такого размера можно ожидать формирования структуры многослойной нанотрубки.

Проведено несколько серий синтезов с различными соединениями железа (хлоридом, салицилатом и пентакарбонилом железа) и никеля (диэтилдиокарбаматом никеля) в качестве предкатализаторов и с бензолом и толуолом в качестве источников углерода. Кроме экспериментов с распылением смеси углеводорода и предкатализатора проведена серия экспериментов с нанесенным на подложку (Al_2O_3) катализатором. Сульфат никеля, которым пропитывалась подложка, непосредственно перед проведением синтеза разлагался с образованием металлического никеля в зоне пиролиза при температуре 500 °C в токе смеси аргона и водорода.

Для исследования влияния различных добавок на морфологию образующихся нанотрубок проведены эксперименты с введением в процесс водорода, добавок серы, которая сама катализатором не является, но активно ускоряет процесс образования нанотрубок [16].

Для проведения синтеза углеродных нанотрубок использовалась установка, описанная в работе [17]. Для распыления углеводорода и предкатализатора кроме УЗ распыления (с частотой 2,64 МГц) также использовали пневматическое, в котором распыл осуществлялся направленным потоком аргона. При пневматическом распылении смеси уменьшали длину кварцевого реактора и зону обогрева, при этом аэрозоль сразу попадал в зону с высокой температурой.

Углеродный материал, полученный при синтезе, собирали со стенок кварцевого реактора. В зоне печи пиролиза находилась основная масса продукта, незначительные количества материала осажда-

лись также в начале зоны охлаждения. Продукт состоял из плотного налета на стенках реактора, на котором осаждался рыхлый материал, обладающий определенной эластичностью.

Полученный продукт состоял из смеси нанотрубок, частиц катализатора и оксидов железа и никеля, аморфного углерода и графита, смол и фуллеренов. Для отделения нанотрубок от побочных продуктов синтеза использовались следующие методы очистки:

- прокаливание в закрытой кварцевой ампуле при температуре 600 °C (для удаления летучих органических соединений и летучих фуллеренов);
- промывка в бензole для удаления бензолорасстворимых соединений (высших фуллеренов);
- кипячение с обратным холодильником в концентрированной соляной кислоте (для освобождения продуктов реакции от несвязанных частиц катализатора и частиц оксидов);
- кипячение с обратным холодильником в смеси концентрированных азотной и серной кислот (для освобождения смеси от аморфного углерода и графита).

Анализ продуктов пиролиза и определение размера частиц катализатора проводили на электронных сканирующих микроскопах Tesla BS340 (РХТУ), Jeol JSM-5910LV (ИОФ РАН) при разрешающей способности вторичных электронов 7 нм (70 Å) и ускоряющем напряжении 30 кВ. Структуру и размеры нанотрубок определяли на просвечивающих электронных микроскопах CM 20 Philips TEM с ускоряющим напряжением 200 кэВ (Бирмингемский университет, Великобритания) и Jeol JEM-100S с ускоряющим напряжением 80 кэВ (НИИ Химфотопроект). Для установления существования в образце нанотрубок использовали также рамановскую спектроскопию на спектрографе JOBIN YVON S3000 (ЦЕНИ ИОФ РАН).

В таблице собраны некоторые сведения об условиях проведения синтезов и структуре полученного материала.

Обсуждение результатов

Синтезы с Fe катализатором

Как показали результаты исследования образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии, рыхлый материал представляет собой крупные волокнистые образования из сажи, среди которых распределены более тонкие нитевидные образования углерода с внешним диаметром до 100 нм. Основная масса нитевидного углерода наблюдалась не среди волокнистых образований из сажевых частиц, а среди плотной пристеночной сажи. Выход углеродного материала, содержащего нанотрубки, значительно выше при использовании в качестве предкатализатора салицилата железа. Размер углеродных нитей, полученных при пиролизе бензола с хлоридом железа при соотношении Fe:C = 1:1000, составляет ~300—100 нм (рис. 1, *a*, см. вторую сторону обложки). Для салицилата железа при том же соотношении установлено образование нанотрубок диаметром 20—60 нм. Это может быть объяснено тем, что при разложении салицилата железа образуется углерод, который может сразу же участвовать в реакции восстановления оксида железа до металлического железа. Поэтому восстановление оксида железа до металлического железа на поверхности частицы происходит быстрее, чем при разложении хлорида. Кроме того, салицилат железа разлагается при более низких температурах, чем хлорид железа, и образующиеся при этом многочисленные газообразные продукты вызывают, как мы думаем, распад конгломерата на более мелкие частицы.

На рис. 1, *b* (см. вторую сторону обложки) приведены результаты съемок методом сканирующей

C_xH_y	Источник катализатора	$T, ^\circ C$	Способ введения катализатора	Добавки	Характеристики полученного материала
Бензол	Хлорид $FeCl_3$	950	Пневматическое распыление	—	Многослойные нанотрубки внешним диаметром до 100 нм
Бензол	Салицилат $Fe[C_6H_4(OH)COO]_3$	850—950	Пневматическое распыление	—	Многослойные нанотрубки коаксиально-конической структуры с внешним диаметром 8,5—60 нм. Большое число нанотрубок, выросших по механизму двухстороннего роста [18]
Бензол, толуол	Пентакарбонил $Fe(CO)_5$	950	Испарение раствора углеводорода и предкатализатора; пневматическое распыление	—	Нитевидные углеродные образования (диаметр нитей 100—200 нм, длина — до нескольких микрометров)
Толуол	Диэтилдитиокарбомат $[Ni(C_2H_5)_2NC(S)S_2]$	600—700	УЗ распыление с частотой 2,64 МГц	Сера в составе предкатализатора	Многослойные нанотрубки с широкой внутренней полостью (внешний диаметр от 16 до 100 нм, длина до 2 мкм)
Бензол	Сульфат $NiSO_4$	700	Нанесение на подложку	Сера, водород	Многослойные нанотрубки с коаксиально-цилиндрической структурой и бамбукоподобные, средний диаметр 32—40 нм, длина от 2 мкм

электронной микроскопии продуктов, полученных при пиролизе бензола в присутствии пентакарбонила железа. Мы видим здесь большое число углеродных нитей и углеродных наносфер. Рамановская спектроскопия не подтвердила присутствие в этих образцах углеродных нанотрубок. Однако вид и размер полученных нитей (100–200 нм) позволяют сделать предположение о том, что эти нитевидные образования углерода могут быть многослойными нанотрубками или волокнами углерода, не имеющими полого внутреннего канала.

На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) приведены результаты съемок с помощью просвечивающего электронного микроскопа образцов, полученных пиролизом бензола с салицилатом железа. Видно, что нитевидные образования имеют полукоаксиально-коническую структуру (рис. 2, а). Это позволяет однозначно идентифицировать их как многослойные углеродные нанотрубки. На рис. 2, б стрелками показаны частицы катализатора, на которых растут нанотрубки в обе стороны от частицы. Эти результаты хорошо соотносятся с описываемым в научной литературе механизмом твердо—жидкость—тврдое, согласно которому на одной частице металлического катализатора образуются сразу несколько центров зарождения нанотрубок [18]. Кроме того, в образце отмечено присутствие нанотрубок гораздо меньших размеров (с внешним диаметром порядка нескольких единиц нанометров), чем это было определено по данным сканирующей электронной микроскопии.

На рис. 3 приведены результаты рамановской спектроскопии для очищенных образцов, полученных при пиролизе смеси бензола с салицилатом железа (образец 1) и хлоридом железа (образец 2).

Присутствие на рамановских спектрах D-пика при 1300–1350 cm^{-1} свидетельствует о присутствии в образце аморфного углерода, G-пика при 1580–1610 cm^{-1} — об образовании организованной углеродной структуры. Присутствие на спектре интенсивного D-пика при 1357 cm^{-1} для образца 1 и 1350 cm^{-1} для образца 2 свидетельствует о значительном загрязнении образцов аморфным углеродом.

Синтезы с Ni катализатором

Как показали результаты исследований с использованием методов электронной микроскопии, при синтезах с Ni в качестве катализатора образующиеся нанотрубки преимущественно имеют коаксиально-цилиндрическую структуру (рис. 4), и они более прямые по сравнению с трубками, выросшими на частицах железа. Кроме того, число образующихся трубок в этих сериях синтеза превосходит выходы НТ с Fe катализатором.

Средний диаметр большинства нанотрубок, полученных при пиролизе толуола с диэтилдитиокарбаматом никеля, (порядка 50 нм) ожидаем из предварительно проведенных расчетов диаметра частиц металлического никеля, образующихся при пиролизе предкатализатора, распыленного вместе с толуолом (о связи диаметра частицы катализатора и растущей на ней трубке упоминалось выше в разделе Эксперимент). Особенностью трубок, полученных в этой серии синтезов, является довольно широкая внутренняя полость (рис. 5, см. вторую сторону обложки).

При синтезе нанотрубок на нанесенном на поверхность подложки (Al_2O_3) катализаторе установлено образование многослойных трубок с внеш-

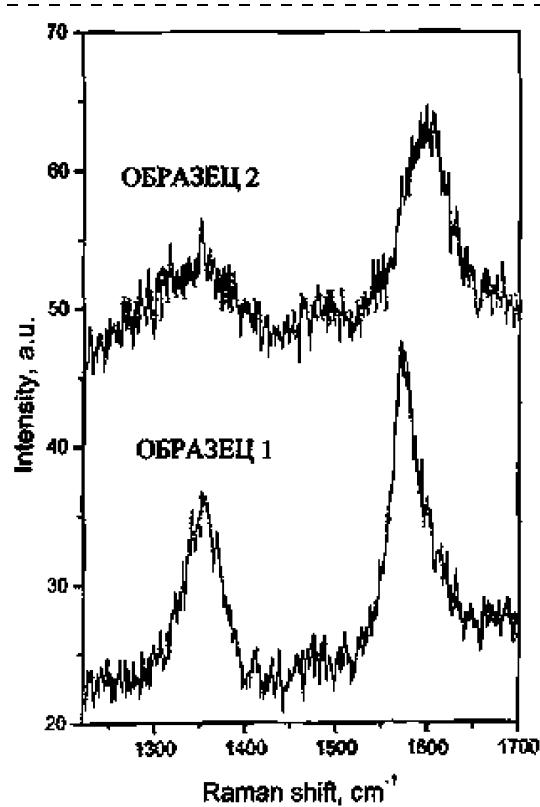


Рис. 3. Рамановские спектры продуктов пиролиза с салицилатом железа (III) (образец 1) и хлоридом железа (III) (образец 2)

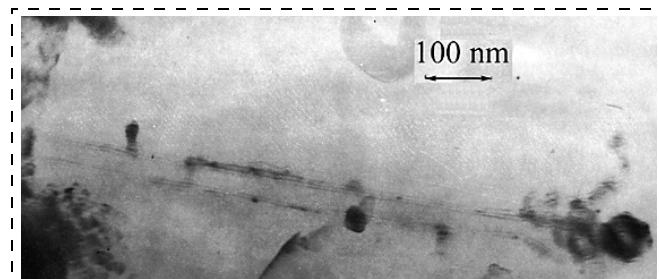


Рис. 4. Коаксиально-цилиндрическая многослойная нанотрубка с частицей Ni (внешний диаметр трубы 48 нм, частицы Ni — 72 нм)

ним диаметром до 80 нм (рис. 6, а). При исследовании образцов с помощью просвечивающей электронной микроскопии установлено существование нанотрубок с заполненной катализатором внутренней полостью (рис. 6, б).

Уширение внутренней полости нанотрубки, а также заполнение ее материалом катализатора может быть объяснено присутствием серы в зоне пиролиза, которая способствует протеканию этих процессов [16]. Увеличение выхода нанотрубок мы связываем с влиянием водорода на кинетику протекающих при синтезе процессов. Подобное влияние объясняется гидрогенизацией карбидов металла на поверхности частиц катализатора, в результате чего частица катализатора сохраняет свою активность по отношению к процессу образования нанотрубок [4]. Однако установление оптимальных для этого концентраций водорода в процессе — отдельная задача, так как его избыток приводит к увеличению слоев растущей нанотрубки.

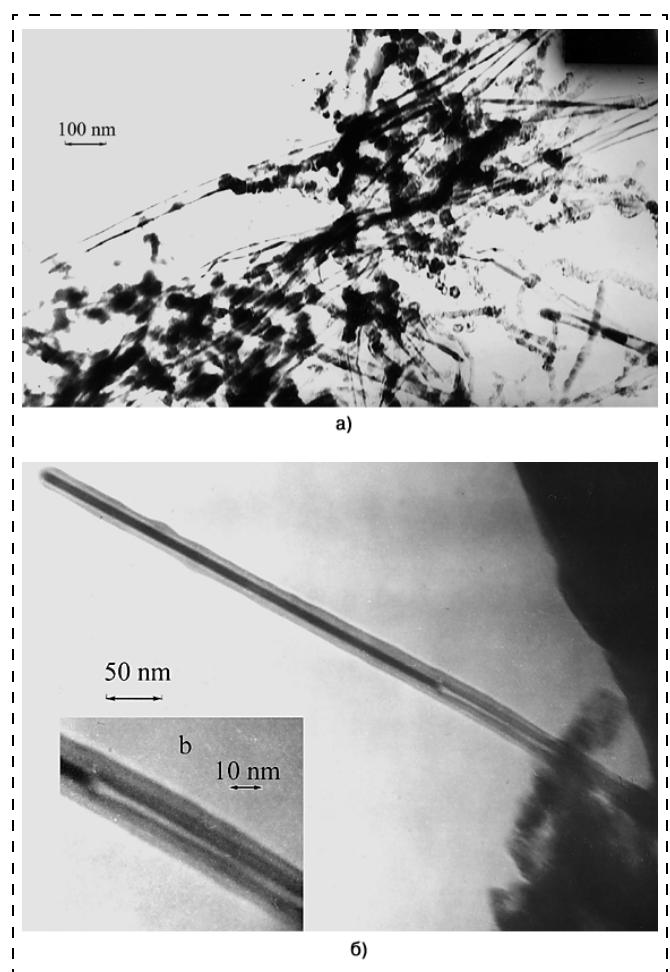


Рис. 6. Образец, полученный пиролизом бензола на частицах Ni на подложке при температуре 700 °С:

а — структура многослойных нанотрубок; б — нанотрубка с внутренним каналом, заполненным материалом катализатора

Заключение

Природа катализатора влияет на морфологию и выход углеродных нанотрубок. Так, при использовании железа в качестве катализатора были получены многослойные нанотрубки коаксиально-конической структуры. На частицах никеля росли многослойные коаксиально-цилиндрические нанотрубки, в редких случаях — бамбукоподобные. Введение серы в зону пиролиза способствует увеличению выхода нанотрубок, но также приводит и к увеличению внутренней полости растущих трубок, в некоторых случаях — к заполнению этой полости материалом катализатора. Добавление водорода в процесс приводит к уменьшению в смеси продуктов количества сплошных углеродных структур, а также сохранению каталитической активности частиц металла вследствие гидрогенизации карбидов на поверхности частицы катализатора. Вместе с этим, введение больших количеств водорода может изменять морфологию и увеличивать число слоев растущей нанотрубки.

Использование УЗ распыления смеси углеводорода с предкатализатором является одним из эффективных способов решения проблемы формирования каталитически активных наноразмерных частиц металлов переменной валентности в процессе синтеза углеродных нанотрубок.

Данная работа была выдвинута Ученым Советом РХТУ им. Д. И. Менделеева для участия в конкурсе 2003 года на соискание медали РАН с премиями для молодых ученых РАН, других учреждений, организаций России. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ (гранты № 208.06.01.103; № 202.01.01.029; № 208.01.01.059).

Список литературы

1. Жариков Е. В., Царева С. Ю., Коваленко А. Н. О перспективах развития технологии получения углеродных нанотрубок методом катализического пиролиза углеводородов // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2002. № 3. С. 4—10.
2. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Saito R. Physics of carbon nanotubes // Carbon. 1995. V. 33. N 7. P. 883—891.
3. Hernadi K., Fonseca A., Piedigrosso P. et al. Carbon nanotubes production over Co/silica catalysts // Catalysis Letters. 1997. V. 48. N 3—4. P. 229—238.
4. Чесноков В. В., Буянов Р. А. Образование углеродных нитей при каталитическом разложении углеводородов на металлах подгруппы железа и их сплавах // Успехи химии. 2000. Т. 69. № 7. С. 675.
5. Chen J., Li Y., Ma Y. et al. Formation of bamboo-shaped carbon filaments and dependence of their morphology on catalyst composition and reaction conditions // Carbon. 2001. V. 39. N 10. P. 1467—1475.
6. Lourie O., Cox D. M., Wagner H. D. Buckling and Collapse of Embedded Carbon Nanotubes // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 1638—1641.
7. Раков Э. Г. Химия и применение углеродных нанотрубок // Успехи химии. 2001. Т. 70. № 10. С. 934—973.

8. Simon B., Maurin G., Bousquet C. et al. Electrochemical intercalation of lithium into multiwall carbon nanotubes // Chem. Phys. Lett. 1999. V. 312. N 1. P. 14–18.
9. Saito Y., Uemura S., Hamaguchi K. Cathode Ray Tube Lighting Elements with Carbon Nanotube Field Emitters // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P. 346–348.
10. Tang D., Xie S., Zhou W. et al. Effect of cupped cathode on microstructures of carbon nanotubes in arc discharge // Carbon. 2002. V. 40. N 9. P. 1609–1613.
11. Guo T., Nikolaev P., Rinzler A. G. et al. Self-Assembly of Tubular Fullerenes // J. Phys. Chem. 1995. V. 99. N 10. P. 10694.
12. Zhy H., Xu C., Wei B., Wu D. A new method for synthesizing doublewalled carbon nanotubes // Carbon. 2002. V. 40. N 11. P. 2023–2025.
13. Resasco D. E., Alvarez W. E., Harwell J. H. Kitayanan. Controlled production of single-wall carbon nanotubes by catalytic de-
- composition of CO on bimetallic Co–Mo catalysts // Chem. Phys. Lett. 2000. V. 317. N 3–5. P. 497–503.
14. Zhang X. X., Li Z. Q., Wen G. H. et al. Microstructure and growth of bamboo-shaped carbon nanotubes // Chem. Phys. Lett. 2001. V. 333. N 6. P. 509.
15. Эльпинер И. Е. Биофизика ультразвука. М.: Наука, 1973. 384 с.
16. Brun N., Loiseau A., Demoncey N. et al. Sulfur: The key for filling carbon nanotubes with metals // Synthetic Metals. 1999. V. 103. N 1–3. P. 2380–2383.
17. Царева С. Ю., Жариков Е. В., Аношкин А. Н., Коваленко А. Н. Образование углеродных нанотрубок при каталитическом пиролизе углеводородов с железосодержащим катализатором // Изв. вузов. Электроника. 2003. № 1. С. 20–24.
18. Gorbunov A., Jost O., Pompe W., Graff A. Solid-liquid-solid growth mechanism of single-wall carbon nanotubes // Carbon. 2002. V. 40. N 1. P. 113–118.

УДК 538.95

**И. Н. Серов¹, Г. Н. Лукьянов², д-р техн. наук, проф.,
В. И. Марголин¹, д-р техн. наук, проф., Н. А. Потсар³,
И. А. Солтковская¹, В. С. Фантиков³, В. А. Тупик³ канд. техн. наук, доц.**

¹Исследовательский центр Фонда развития новых медицинских технологий "Айрэс", Санкт-Петербург.

²Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (технический университет).

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ".

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК МЕДИ С ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

Исследована возможность влияния на структуру тонких пленок, получаемых методом магнетронного ионного напыления, фрактально-матричных структуризаторов в целях инициации процессов самоорганизации и создания локальных участков пленки, имеющих четко выраженную фрактальную структуру.

Введение

Развитие субмикронной технологии и нанотехнологии приводит к прогрессирующему уменьшению размеров производимых элементов электронной техники и, соответственно, элементов их структуры. Существующие традиционные методы генерации изображения на подложке (практически все виды литографии, включая электронную литографию) вплотную приблизились к физическим пределам, ограничивающим дальнейшее уменьшение раз-

меров элементов [1–4]. В идеале представляется возможным реализовать технологию атомной сборки, заключающуюся в переносе с помощью туннельно-зондовых методов отдельных атомов или кластеров прямо на подложку [5–7]. Однако предварительные оценки показывают, что применение для практических целей методов индивидуальной обработки, таких как туннельно-зондовые, приводит к необходимости обеспечения в течение порядка 100 ч непрерывной работы высадку с иглы туннельно-зондово-

го устройства около 100 атомов в секунду для плотного заполнения площади в один квадратный микрометр. Поэтому более практическим представляется применение не индивидуальных, а групповых методов обработки, когда за один цикл обрабатывается либо вся подложка, либо ее значительная часть.

При этом наибольший интерес представляет получение тонкопленочных покрытий, имеющих упорядоченную структуру, чаще всего возникающую за счет инициации процессов самоорганизации и самоупорядочения пленок в процессе роста. Применение таких упорядоченных структур в практических целях позволит в дальнейшем получать элементы электронной техники со сверхмалыми размерами и без сложностей, связанных с индивидуальными методами обработки. Необходимо разработать групповые методы структурирования наноразмерных пленок, которые позволяли бы за один цикл обработки создавать регулярную упорядоченную структуру одновременно на всей площади обрабатываемого образца.

Для того чтобы система стала генерировать самоподобные поверхности, необходимо, чтобы внешнее воздействие достигло не-

которого критического значения. Данное утверждение находится в полном согласии с принципами самоорганизации и физики открытых систем, начало которым положили работы И. Пригожина и И. Стенгерса [8]. В случае структур Белоусова—Жаботинского — это определенное значение концентрационного потока реагентов, в случае ячеек Бенара — градиента температур. Общим свойством самоорганизующихся систем является самосогласованность микрообъектов системы. Такое поведение называется ко-герентным и требует специфических динамических связей внутри системы. Необходимо обеспечивать определенную мощность воздействия, оно должно быть настолько интенсивным, чтобы был возможен переход системы в осо-бую, нелинейную область, назы-ваемую областью, удаленной от равновесия [9]. Процесс самоор-ганизации является переходом от менее упорядоченного состояния системы к более упорядоченному.

Наиболее привлекательным с практической и технологической точек зрения является создание на поверхности подложки макси-мально свободного от примесей и структурных несовершенств и не-однородностей переходного тон-копленочного или толстопленоч-ного слоя и реализация на его по-верхности наноразмерной и на-ноструктурированной пленки. Поскольку на поверхности под-ложки при этом не имеется (в идеале) примесей и структурных несовершенств, а миграция ато-мов по поверхности в поисках нерегулярностей структуры про-должает иметь место, то необхо-дим некий физический агент, ко-торый реализовал бы на поверхно-сти подложки в создаваемой плен-ке требуемую неоднородность ка-кого-либо параметра.

Естественно, что эта неодно-родность должна иметь упорядо-ченную структуру и соответство-вать тому локальному распреде-

лению атомов на поверхности, которое является необходимым. Подобный процесс будет полно-стью соответствовать принципам реализации группового метода об-работки, поскольку позволит на всей поверхности пленки за один цикл получить требуемую регу-лярную структуру, состоящую из локальных упорядоченных групп различных атомов. Необходимо заметить, что если структурные несовершенства (дислокации, вакансии, дефекты) являются зна-чительными и протяженными нарушениями структуры поверх-ности, то примеси, как центры локализации процесса зароды-шеобразования, являются всего лишь незначительными наруше-ниями волновой регулярности структуры твердого тела, выходя-щей на поверхность.

Мы предлагаем на роль физи-ческого агента электромагнитное поле, а для информационного структурирования резонансного электромагнитного поля восполь-зоваться разработанными и изго-тovляемыми Фондом "Айрэс" фрактально-матричными струк-туризаторами, представляющими собой фотошаблон с нанесенной фрактально-матричной топологи-ей, фактически являющейся гео-метрически синтезированной голограммой, размеры штриха ко-торой к настоящему времени со-ставляют 1,0 мкм.

Существует довольно смелое утверждение, что элементарные частицы материи — это всего лишь сгущения электромагнитного по-ля [10]. Тогда материальный объ-ект представляет собой опреде-ленным образом сформированный импульс энергии или полевую структуру [11]. Перевести его в другую форму можно множест-вом способов, причем проблема не в мощности информационно-структурированного электромаг-нитного поля, а в точности соот-ветствия фрактально-матричной топологии, необходимой для структурирования твердого тела

информации. А точность соот-ветствия определяется точностью рисунка топологии фрактально-матричного транспаранта.

Из сказанного следует, что вполне реальным путем создания наноразмерной и наноструктури-рованной пленки является ис-пользование процессов самоор-ганизации образуемых структур под воздействи-ем информацион-но-структурированного электро-магнитного поля либо непосред-ственно в процессе выращива-ния пленки, либо в процессе ее модификации и структурной пе-рестройки.

Методики проведения экспериментальных исследований

Предметом исследования явля-лось определение возможности влияния структуризаторов "Айрэс" на качество, топологию, структуру и иные характеристики получае-мых тонкопленочных структур.

Экспериментальные исследо-вания проводились на установках магнетронного напыления, раз-работанных на базе стандартного вакуумного поста ВУП-4 и уста-новки "Булат", а также на уста-новке термического вакуумного напыления УВН-71. Образцы рас-полагались в вакуумной камере таким образом, чтобы на аноде (массивной медной планшайбе, обес-печивающей интенсивный отвод теплоты от образца, что по-зволяет напылять пленки на под-ложку практически при темпера-туре 20 °C) по определенной сис-теме располагались структуриза-торы, на поверхности которых в свою очередь фиксировалась подложка, предна-значенная для напыления исследуемой пленки.

Рентгенофазовый анализ вы-полнялся на установке рентгено-графического исследования типа ДРОН-2.

Поверхность полученных об-разцов тонкопленочных структур исследовалась с помощью оптиче-ских микроскопов разного класса, растро-вых электронных микро-

скопах JSM-35CF (JEOL), Sam-Scan MV 2300 SEM и HITACHI S-3500N и атомно-силовых микроскопах SOLVER 47, SOLVER 47P и Autoprobe 5.

В качестве воздействующего субъекта использовались структуризаторы "Айрэс" с различной топологией, некоторые разновидности которой представлены на рис. 1. Размер линии составлял от 80—100 мкм при плотности заполнения порядка 1—5 % и размере пластины 76 мм и до 1 мкм на чипах размером 7,5 × 7,5 мм с плотностью заполнения порядка 50 %. Также применялись фрактально-матричные топологии, выполненные по гексагональному принципу и состоящие из набора отдельных шестиугольных элементов, собранных в пределах одной композиции в структуризатор, по внешним размерам совпадающий с диаметром подложки. В развитие этих экспериментов структуризаторы дополнительным образом размещались также на внутренней поверхности полого кварцевого цилиндра, располагавшегося соосно с подложкой, но вне зоны действия потока наносимого материала. В качестве наносимого на подложку материала использовались электролитическая медь, титан и индий. В качестве подложек использовались пластины оптически полированного кремния марки 76 КДБ-7,5 с ориентацией пластин $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ и пластины оптически полированного стекла марки К-8.

Экспериментальные результаты

Применение обычного метода магнетронного распыления приводит к росту пленок, практически полностью повторяющих структуру подложки [12]. Особенно это характерно для субмикрометровых пленок, при этом пленки меди, нанесенные на оптически полированные пластины кремния или стеклянные подложки полностью повторяют структуру

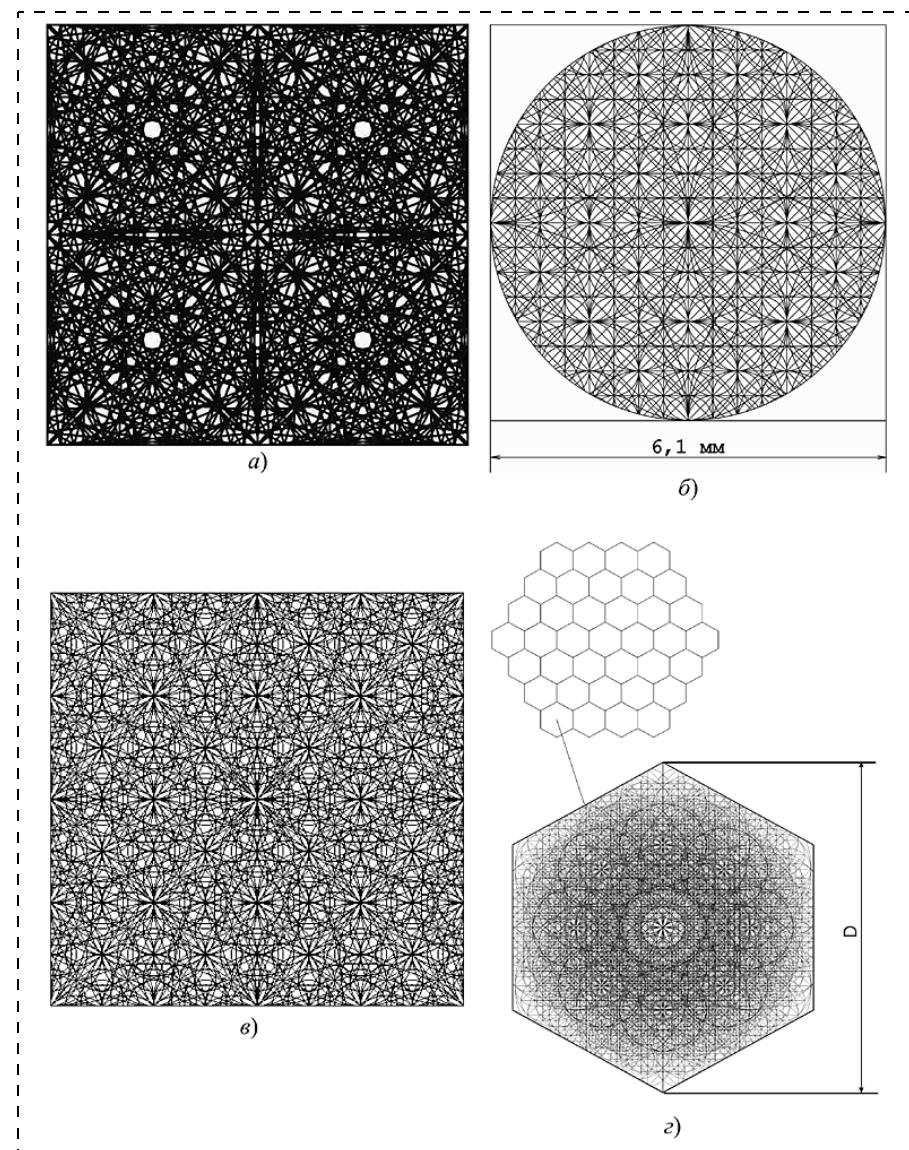


Рис. 1. Примеры топологий структуризаторов "Аирэс":

а — второго поколения (оптического фильтра); *б* — первого поколения (аппликатора); *в* — третьего поколения на кремниевом чипе; *г* — четвертого поколения (гексагональная структура)

подложки, и, естественно, никакого изменения структуры получаемых пленок не наблюдается (рис. 2, *a*).

Применение структуризатора третьего поколения, расположенного в центре под подложкой, или системы структуризаторов, расположенных по схеме прямого или косого креста (5 штук), приводит к образованию слабо выраженных элементов структуры в пленке, имеющих признаки фрактального подобия (рис. 2, *б*). Следует отметить, что применение схемы косого креста позво-

ляет получить гораздо более выраженные структуры, чем применение схемы прямого креста. Применение системы структуризаторов третьего и четвертого поколения, расположенных специальным образом по определенному алгоритму, позволяет получить топологию пленок с явно выраженной тенденцией к самоорганизации, причем сложность топологического рисунка увеличивается по мере продвижения от края подложки (рис. 2, *в* и *д*) к средней области (рис. 2, *г* и *е*). Надо

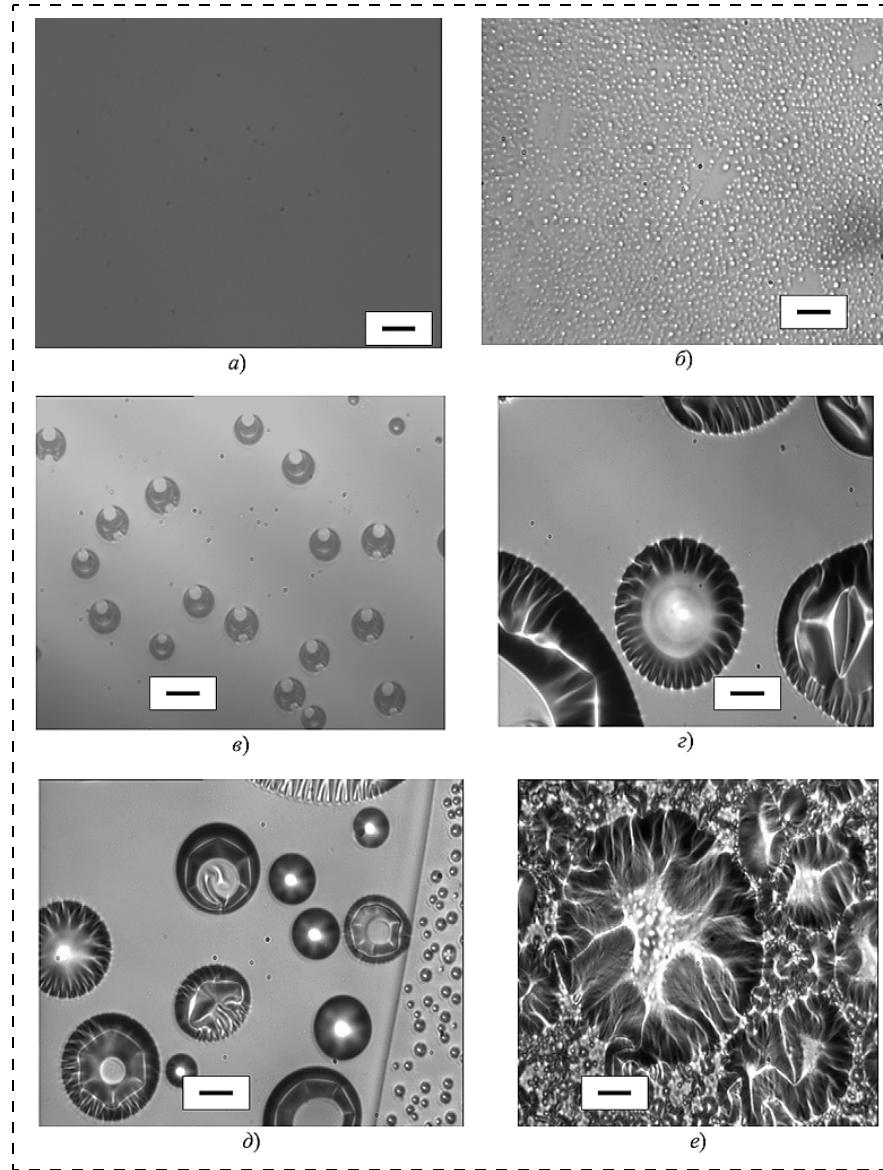


Рис. 2. Поверхность пленок меди, полученных оптической микроскопией:
а — без воздействия структуризаторов; б — под воздействием одного структуризатора третьего поколения; в—г — под воздействием системы структуризаторов; в — на краю подложки; г — средняя область подложки (ближе к краю); д — средняя область подложки (ближе к центру); е — центральная область подложки. Размер марки — 20 мкм

отметить, что по мере продвижения к центру возрастает не только уровень самоорганизации локальных участков пленки, но и возникает конкуренция между различными фрагментами. На рис. 2, *д* зафиксировано наличие трех различных типов структур, еще не вступивших в "конкурентную борьбу" на одном локальном участке.

В центральной области уже практически невозможно обнаружить фрагменты гладкой плен-

ки, повторяющей структуру подложки. Вся центральная область занята фрагментами различной топологии, "прорастающими" друг в друга и образующими сложную взаимопроникающую структуру.

По ходу движения от периферии к центру пластины обнаруживаются кольцевидные и куполоподобные структуры, причем происходит увеличение диаметра кольцевых образований, наблюдается градация элементов от мелких до более крупных. В зоне

центрального пятна имеются крупные кольцевые образования, высота стенки которых достигает в отдельных случаях единиц микрометров. Причем следует отметить, что кольцевые образования, локализованные в центральной зоне, имеют существенно более сложную структуру, чем расположенные в периферийной зоне. Во внутреннем пространстве элементов, находящихся в центральной зоне, обнаружены зародышевые зерна, причем их расположение носит не хаотический характер. Вне этих крупных кольцевых образований наблюдаются кольцевые и куполообразные элементы различного диаметра, причем как изолированные один от другого, так и имеющие сложную взаимопроникающую структуру. Общая картина представляет собой сложное фрактальное образование, имеющее, по нашим соображениям, несколько уровней самоорганизации и самоподобия.

Внутри таких элементов расположены мелкие зерна-зародыши. Вне этих крупных образований наблюдаются кольцевые элементы разного диаметра и элементыстыкок колец. Общая картина представляет собой фрактальное образование. При движении от края к центру хорошо видна поуровневая градация фрактального объекта за счет большой толщины пленки. Все элементы имеют помимо описанной выше планарной геометрии еще и куполоподобную структуру. Среди них встречаются конструкции в виде срезанных 3-, 4-, 6-гранных "квазипирамид", окруженных подобными более мелкими образованиями. Некоторые из этих "квазипирамид" имеют в центре отверстие в виде кратера. Помимо этих элементов наблюдаются куполообразные спиральные элементы с фрактальным характером компоновки.

Поскольку каждое экспериментальное напыление повторялось не менее трех раз (с целью

исключить фактор случайности и набрать достаточный статистический материал), то авторы обнаружили, что по мере перехода от одного образца к последующему в одинаковых условиях напыления и параметрах процесса картина структуры пленки меняется в сторону конкретизации фрактального рисунка и увеличения отдельных элементов. Можно предположить, что на стенках камеры и конструкционных элементах осаждается структурированная пленка (такая же, как непосредственно на подложке), которая оказывает информационное воздействие на последующие этапы нанесения пленки [13]. Полученную пленку можно трактовать как репликант топологии структуризатора, сохраняющий его определенные свойства и являющийся носителем информации о топологии структуризатора. Это предположение нуждается в дополнительном обосновании и проведении экспериментов по сравнению оптических свойств получаемых пленок со свойствами структуризатора.

Авторы склонны полагать, что полевая структура, создаваемая фрактально-матричными структуризаторами, используемыми в эксперименте, в совокупности со структурой монокристаллической кремниевой подложки оказывает решающее воздействие на формирование экспериментально обнаруженных структурных элементов, возникающих в процессе напыления в тонкой медной пленке [14]. Причем вследствие того, что напылению подвергается не только строго локализованная область подложки, но и конструкционные элементы камеры объектов, механическая заслонка и прочие детали, то, по-видимому, структура, создаваемая фрактально-матричными структуризаторами, остается существовать в рабочем пространстве камеры, вероятно за счет ее консервации тонкопленочными структурами,

сформировавшимися на стенках камеры и конструкционных элементах) и осуществляет дополнительное структурирование процесса роста медных пленок на последующих образцах. Следует отметить, что подобным структурирующим свойством обладают, хотя и в значительно более слабом виде, и ряд других строго упорядоченных и структурированных элементов, которые использовались нами в экспериментах вместо фрактально-матричных структуризаторов.

Также были проведены эксперименты по созданию тонких наноразмерных пленок титана, никеля и индия. Получены результаты, аналогичные достигнутым на медных пленках. Микрофотография пленки индия, нанесенного методом термического вакуумного напыления, приведена на рис. 3, а (см. третью сторону обложки). Полученные этим же методом пленки селенида свинца также имеют фрактальную, но более слабовыраженную структуру (рис. 3, б, см. третью сторону обложки). При нанесении магнетронным методом пленок титана на тыльную поверхность структуризатора второго поколения на подложке формируется сложный фрактальный объект, структура которого однозначно связана с топологией структуризатора, нанесенной на обратной стороне (рис. 3, в). На рис. 3, г и д приведены полученные с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) микрофотографии локальных участков медной пленки, нанесенной на кремниевую подложку под воздействием структуризатора четвертого поколения. На рис. 3, е для сравнения приводится микрофотография медной пленки, полученной в тех же условиях, но без воздействия структуризатора.

Для подтверждения предположения авторов о фрактальном характере получаемых структур были проведены исследования пле-

нок в целях определения фрактальной размерности. Обработка полученных данных базируется на предположениях, что поверхность может быть рассмотрена как фрактал и что любой фрактал может рассматриваться в двух аспектах:

- как застывшая форма;
- как объект, эволюционирующий на основе законов самоподобия и масштабной инвариантности.

Для изучения свойств поверхности и на основе сделанных предположений построена ее фрактальная модель, размерность которой составила величину $D_f = 2,3347\dots$. Расчеты размерности, выполненные для этой же поверхности по экспериментальным данным, дают значение $D_B = 2,1\dots2,2$.

Были рассмотрены двумерные, плоские изображения сечений поверхности в каком-то определенном направлении. Для этого исходное изображение рассекается параллельными, отстоящими друг от друга на равное расстояние плоскостями, перпендикулярными плоскости подложки. Тогда линии пересечения исходной поверхности с этими плоскостями дают изображения кривых, которые можно обрабатывать, пользуясь стандартными, хорошо разработанными методами.

На основе предположения, что в процессе изготовления поверхность эволюционировала, предлагается рассмотреть полученные кривые как выборки из какой-то сложной кривой, генерируемой динамической системой, свойства которой нам неизвестны, но мы хотим их оценить и изучить. Это делается также на основе предположения, что рассматриваемые кривые фрактальны.

Поскольку характерные свойства фрактала из-за его самоподобия проявляются при разных масштабах, то выделив на исходном изображении мелкие детали, можно попытаться исследовать

характерные свойства полученных кривых. Для этой операции использовалась сплайн-интерполяция полученных кривых (сечений) и выделялась разница между исходным изображением и результатом его интерполяции.

На каждом из выполненных сечений открылись повторяющиеся от графика к графику особенности в виде рельефа, переходящего от сечения к сечению с постоянным шагом. При этом в рельефах имеются отличия, так как поверхность представляет собой случайный фрактал и общие закономерности выполняются статистически.

Для получения информации о системе, "генерирующей" сечения, результаты рассматривались как переменные неизвестной нам системы вида

$$\frac{dz}{dx} = F(z(x)), \quad (1)$$

где $z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_n\}$ — переменные, число которых определяет порядок, или размерность, системы; x — переменная, относительно которой задается система (1), для динамических систем — это время, в системе (1) — это пространственная координата; $F = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_n\}$ — некоторые нелинейные функции.

Так как система (1) нам неизвестна, мы можем лишь наблюдать какие-то ее переменные z_i . Имеется методика [15], практическое применение которой для разных случаев рассмотрено в [16] и которая позволяет восстанавливать фазовую траекторию (аттрактор) системы по результатам экспериментальных наблюдений только одной ее переменной. Данная траектория является топологическим эквивалентом истинной, неизвестной нам, траектории и может быть использована для исследования свойств исходной, также неизвестной системы вида (1). Это означает, что по восстановленной фазовой траектории можно, например, опре-

делить такое важное ее свойство, как размерность, которая в общем случае является дробной, фрактальной.

Расчеты корреляционных размерностей D_2 , выполненные для каждого из рассмотренных профилей, показали, что ее значение лежит в пределах от 2,40 до 2,75. Это также является аргументом в пользу того, что исходная поверхность имеет фрактальный характер.

Рассмотрим особенности изучаемой системы как фрактальной поверхности. На рис. 4, *a* хорошо видны изображения куполооб-

разных структур, расположенных типично для хаотичных объектов — по спиралям. Можно даже увидеть расположение куполов на почти идеальных окружностях, а также то, что купола расположены на параллельных прямых, идущих с нижней стороны на правую под углом около 30°. Чтобы рассматривать поверхность как фрактальный объект, нужно восстановить свойства этого фрактала, например его размерность. Размерность можно определить либо по экспериментальным данным, либо по геометрическому описанию поверхности.

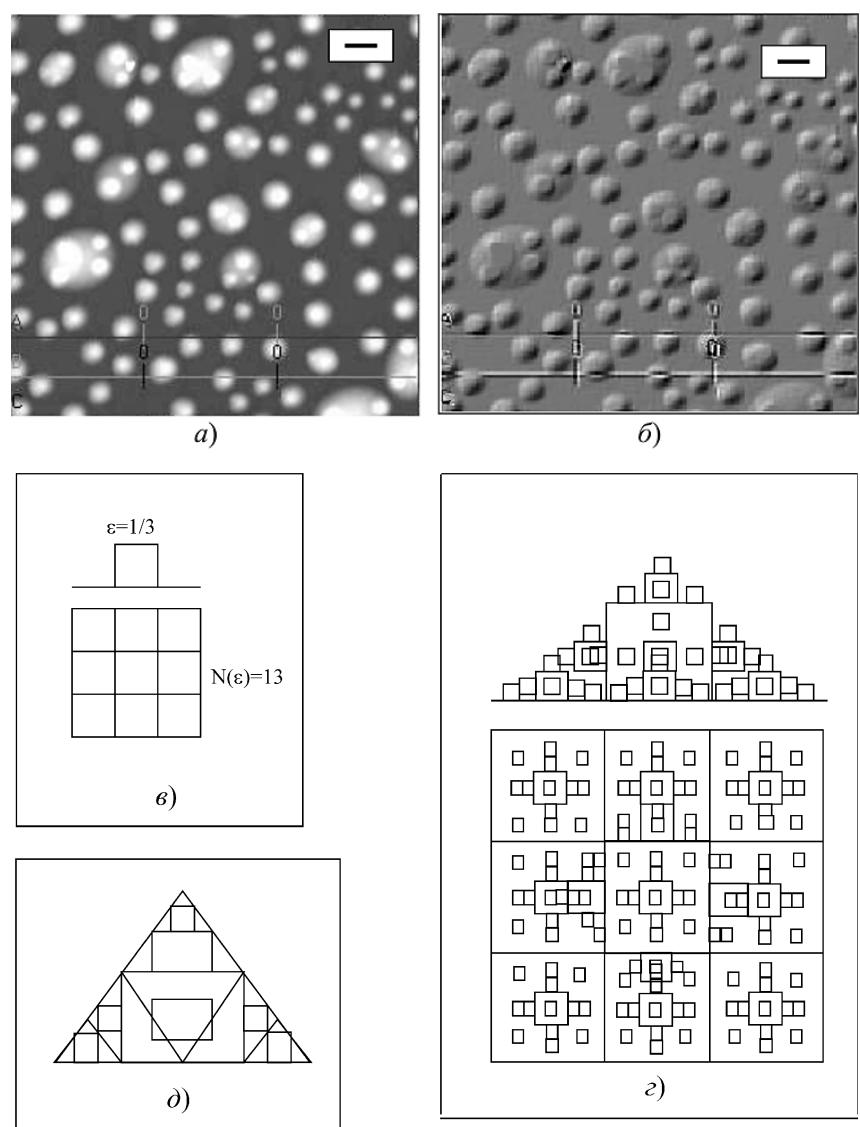


Рис. 4. Исходное (*а*) и преобразованное (*б*) изображение поверхности медной пленки; *в* — первая ступень моделирования; *г* — результат третьей итерации; *д* — часть полученного геометрического фрактала

Для определения размерности на основании опытных данных удобно представить ее либо как емкостную, либо как информационную.

Емкостная размерность определяется следующим выражением [17]:

$$D_C = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\ln(1/r)}, \quad (2)$$

где r — характерный размер элемента разбиения (при кубическом разбиении — длина ребра куба); N — число элементов разбиения.

Информационная размерность определяется по следующей формуле [18]:

$$D_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log I(r)}{\ln(1/r)}, \quad (3)$$

где $I(r) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i(r_i)} \log(p_i(r_i))$ — информация по Шеннону, или информация первого порядка; $p_i(r_i)$ — вероятность посещения элементом поверхности рассматриваемого объема с характерным размером r_i ; $\frac{1}{p_i(r_i)}$ — естественная мера.

Для определения размерности поверхности она была определена как емкостная с использованием прямоугольных покрытий и составила величину $D \approx 2,1...2,2$. Для проверки правомочности такого подхода рассмотрена следующая модель.

Первая ступень моделирования — для моделирования изображения купола аппроксимируются кубиками, в серединной части которых строится меньший куб со стороной $a = 1/3$ (рис. 4, в). Тогда длина покрытия $r = 1/3$ и число покрытых частей поверхности на каждом шаге построения фрактального купола $N(r) = 13$. Формула для расчета емкостной

размерности дает для такого объекта размерность

$$D = \frac{\log 13}{\log 3} = 2,3347\dots$$

Рис. 4, г показывает результат третьей итерации. Объект стал выглядеть как поле с пирамидами, размеры которых подчиняются заданным масштабным соотношениям. От исходного изображения отличает регулярность, которая в нем отсутствует. На рис. 4, г модель изображена в двух проекциях: нижняя проекция — вид сверху и верхняя проекция — вид сбоку. На рис. 4, д приведена часть этого фрактала. Из рисунка видно, что она действительно в пределе примет форму пирамиды. Поэтому можно заключить, что изучение свойств системы, "генерирующей" рассматриваемую поверхность, дает основание для заключения о том, что даже для производства плоского среза ее размерность имеет величину $\dim = 3$; а регулярный фрактал, использованный для аппроксимации исходной поверхности, имеет размерность

$$D = \frac{\log 13}{\log 3} = 2,3347\dots$$

Так как реальный фрактал не-регулярен и на поверхности имеются купола, стоящие на разных ступенях эволюции и имеющие разные размеры, то следует ожидать, что его размерность окажется ниже и составит величину $D = 2,1...2,2$. Такое значение дает и расчет, проведенный на основе покрытий изображения поверхности кубиками разных размеров.

В заключение авторы приносят свою благодарность сотрудникам СПбГЭТУ "ЛЭТИ" аспиранту С. В. Кощееву за РЭМ-микрофотографии (рис. 3, г, д) и профессору В. А. Мошникову и аспиранту М. А. Иошуту за нанесение пленок индия и селенида свинца и представленные микрофотографии (рис. 3, а, б).

Список литературы

1. Марголин В. И., Тупик В. А. Процессы прецизионной литографии в электронике. СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ". СПб., 2001. 211 с. Рус. Деп. в ВИНИТИ 12.07.2001, № 1640-В 2001.
2. Марголин В. И., Тупик В. А. Основы нанотехнологии. Электронная литография и ионная имплантация: Учеб. пос. по дисциплине "Основы нанотехнологии". СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2000. 56 с.
3. Жабрев В. А., Марголин В. И., Мошников В. А. Основы субмикронной технологии: Учеб. пос. СПб.: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2001. 108 с.
4. Марголин В. И., Тупик В. А. Исследование литографических характеристик электронно- и рентгенорезистов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 1998. Вып. 1. С. 82—85.
5. От субмикронной к нанотехнологии / Ю. С. Боков, Б. С. Борисов, В. В. Ракитин, Н. С. Самсонов // Электронная промышленность. 1994. № 7, 8. С. 99—102.
6. Нанотехнология в ближайшем десятилетии / Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса // М.: Мир. 2002. 292 с.
7. Лякишев Н. П. Новые функциональные материалы // Материалы научно-практ. конф. "Новые функциональные материалы и экология". М., 2002. С. 14—16.
8. Приожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 431 с.
9. Николос Г., Приожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979, 512 с.
10. Эйнштейн А. Собрание научных трудов М.: Наука, 1965. Т. 1. С. 689.
11. Серов И. Н. Общий курс ВИР. СПб.: Изд-во Акцидент. 2002.
12. Кукушкин А. С., Осипов А. В. Процессы конденсации тонких пленок // УФН. 1998. Т. 168. № 10. С. 1083—1116.
13. Серов И. Н., Бельская Г. Н., Марголин В. И., Мошников В. А., Потсар Н. А., Солтовская И. А. Применение метода магнетронного распыления для получения структурированных тонких пленок // Изв. РАН, сер. физическая. 2003. Т. 67. № 4. С. 587—590.
14. Серов И. И., Жабрев В. А., Марголин В. И. Проблемы нанотехнологии в современном материаловедении // Физика и химия стекла. 2003. Т. 29. № 2. С. 242—256.
15. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors. Physica. 1983. Vol. D9. P. 189—208.
16. Лукьянов Г. Н. Идентификация параметров хаотических процессов в экспериментальных исследованиях. СПб.: Вестник Академии Технического Творчества. 1998. № 11. С. 24—67 (www.att.da.ru).
17. Grassberger P. and Procaccia I. Characterisation of strange attractors // Physical Review Letters. 1983. Vol. 50. P. 346.
18. Hentschel H. G. E. and Procaccia I. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors // Physica. 1983. V. 8. P. 435—444.

УДК 389.159

**П. А. Тодуа¹, В. А. Быков², Ч. П. Волк³,
Е. С. Горнев³, Ж. Желкобаев¹, Л. М. Зыкин,
А. Б. Ишанов, В. В. Календин¹,
Ю. А. Новиков⁴, Ю. В. Озерин³,
Ю. И. Плотников³, А. М. Прохоров¹**

А. В. Раков⁴, С. А. Саунин², В. Н. Черняков¹

¹ФГУП "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума" Госстандарта России, Москва.

²ЗАО "НТ-МДТ", Зеленоград.

³ОАО "НИИ молекулярной электроники и "Микрон", Зеленоград.

⁴Центр естественно-научных исследований Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИНЫ В МИКРОМЕТРОВОМ И НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ И НАНОТЕХНОЛОГИЮ ЧАСТЬ I

Представлены основы метрологического обеспечения измерений, включая методы и средства воспроизведения и передачи размера единицы длины в указанном диапазоне с абсолютной привязкой к государственному первичному эталону единицы длины — метру, основанные на методах сканирующей зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии-фазометрии; разработана технология и созданы трехмерные меры микро-, нанорельефа поверхности, обеспечивающие не только калибровку зондовых микроскопов (сканирующих туннельных, атомно-силовых, растровых электронных) — основных средств линейных измерений в указанном диапазоне, но и подтверждающие достоверность результатов измерения размеров реальных объектов. Созданы алгоритмы и пакет программ, позволяющие реализовать автоматизированное трехмерное измерение рельефа поверхности конденсированных сред.

Введение

История развития науки, техники, промышленности неразрывно связана с развитием системы, методов и средств измерений. Яркой иллюстрацией этого факта служит динамика представления

единиц основных физических величин — длины, массы и времени, являющих собой базис системы физических величин, и среди них особенно длины, представляющей предмет настоящей работы.

Научно-технический прогресс XIX века, углубляющиеся экономические, торговые и культурные связи между разными странами настоятельно потребовали не только ликвидации разнобоя в определении и применении единиц физических величин внутри каждой отдельно взятой страны, но и их унификации и создания единой и общей для всех стран гармоничной системы измерений.

20 мая 1875 г. в Париже 17 государств, в том числе и Россия, подписали Метрическую конвенцию, в соответствии с которой метрическая система мер и весов была принята под покровительство этих государств, и тем самыми ее развитие обрело межгосударственный статус.

На 1-й Генеральной конференции по мерам и весам в сентябре 1886 г. в Париже в качестве Международного эталона метра был избран платиново-иридиевый жезл (прототип), на внутренней поверхности которого были нанесены метки-штрихи, расстояние между ними соответствовало одной сорокамиллионной части длины земного меридиана, проходящего через Париж. Государства-участники Метрической конвенции получили по прототипу эталону метра. Длина международного эталона метра, хранящегося в Международном бюро мер и весов в Париже, была определена с неопределенностью 0,1 мкм (относительная неопределенность 10^{-7}), а расхождение в длине национальных эталонов не превышало 0,2 мкм.

Двадцатый век потребовал большей точности измерений линейных размеров. Реальная возможность определения единицы длины — метра — через длину волн оптического излучения появилась лишь после фундаментальных работ американского физика Майкельсона по применению интерферометрии в линейных измерениях, выполненных в конце XIX века.

На XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 г. было принято новое определение метра, а именно: метр есть длина, равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между $2p_{10}$ и $5d_5$ уровнями атома криптона-86.

Переход от прототипа метра на эталонную длину волны излучения позволил:

- реализовать возможность воспроизведения единицы длины в различных лабораториях;
- повысить точность измерений более чем на порядок;
- обеспечить неуничтожимость эталона основной физической величины, т. е. возможность его воссоздания в случае утраты.

Использование монохроматического оптического излучения решило проблему воспроизведения и передачи размера единицы длины от эталона средствам измерений более низшего разряда в иерархии "эталон — рабочие средства измерений с помощью оптических интерферометров для измерения концевых или штриховых мер — носителей размера".

Открытие и бурное развитие физики, техники и технологии оптических квантовых генераторов — источников монохроматического излучения с высокой степенью пространственной и временной когерентности, привнесло в метрологию линейных измерений возможность перехода от линии излучения криптона-86 к излучению оптического квантового генератора, обладающего более высокой стабильностью и добротностью.

Прямые измерения частоты оптического излучения высокостабилизированного Не—Не-лазера позволили определить скорость света c , исходя из соотношения

$$c = \lambda v,$$

где частота v определена, исходя из эталона частоты, а длина волны λ — из определения эталона метра. Это позволило XVII Генеральной конференции по мерам и весам в 1983 г. принять в качестве неизменяемой фундаментальной константы значение скорости света в вакууме

$$c = 299792458 \text{ м/с.}$$

На этой же конференции метр был определен как длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/c$ секунды.

На 9-й сессии Консультативного комитета по длине в сентябре 1997 г. рекомендованные значения частоты и длины волны излучения Не—Не/ J_2 -лазера, стабилизированного по линии насыщенно-го поглощения в молекулярном йоде

$$\begin{aligned} v &= 473612214705 \text{ кГц,} \\ \lambda &= 632,99139822 \text{ нм.} \end{aligned}$$

Государственный первичный эталон метра [1], реализующий этот физический принцип, обеспечивает воспроизведение единицы длины — метра — с относительным средним квадратичным отклонением (неопределенностью) $2 \cdot 10^{-11}$. Таким образом, за промежуток времени немногим более 100 лет (активная жизнь трех поколений) точность эталона метра увеличилась более, чем на четыре порядка (10 000 раз).

Измерения длины (линейные измерения) можно условно разбить на два класса: измерения больших длин (длина много больше длины волны излучения) и измерения малых длин (значения порядка и менее длины волны излучения). Диапазон измерений больших длин простирается от единиц-

десятков микрометров и далее, включая метры, километры, вплоть до длин, таких как астрономическая единица длины ($1,5 \cdot 10^{11}$ м — расстояние от Земли до Солнца), световой год ($9,5 \cdot 10^{15}$ м — расстояние, которое свет пройдет за время, равное 365 земным суткам) и парсек ($3,1 \cdot 10^{16}$ м). Диапазон измерений малых длин простирается от единиц микрометра до нуля, который, впрочем, также недостижим, как ноль градусов Кельвина. Характерные размеры здесь: 10^{-6} метра — микрометр, 10^{-9} метра — нанометр, 10^{-10} метра — ангстрем. Диаметр первой невозбужденной орбиты электрона в атоме водорода как раз составляет примерно один ангстрем.

Если использование интерферометрии в передаче размера единицы длины в области больших длин не встречает принципиальных трудностей и ограничено лишь пространственно-временной когерентностью источника эталонного излучения, то линейные измерения объектов, характеризующихся значениями размеров меньших и много меньших длины волны излучения, требуют принципиально нового подхода.

Настоящая работа посвящена именно основам обеспечения единства линейных измерений в микро- и нанометровом диапазонах. Постановка и выполнение этой работы обусловлены объективной необходимостью **опережающего развития метрологии** линейных измерений в области **малых длин** — области, в которую стремительно вторгаются **наукоемкие технологии**. Промедление с метрологическим обеспечением может серьезным образом сказаться, в первую очередь, на темпах развития таких отраслей, как микроэлектроника и нанотехнология.

Современные высокие технологии, например микроэлектроника, оперируют с элементами, имею-

Таблица 1
Перспективы развития технологии полупроводниковой
микроэлектроники США на период 1995—2010 гг.

Технологические характеристики	Годы					
	1995	1998	2001	2004	2007	2010
Критический размер (КР), нм	350	250	180	130	100	70
Точность измерений КР, нм	3,5	2,5	1,8	1,3	1,0	0,7

Таблица 2
Планируемые в Международной программе 2001 г.
минимальные размеры элементов микросхем по годам

Технологические характеристики	Годы					
	2002	2004	2007	2010	2013	2014
Критический размер (КР), нм	130	90	65	45	32	22
Точность измерений КР, нм	1,3	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2

щими длину в сотни нанометров, и в ближайшие годы ожидается переход к элементам с длиной в десятки нанометров [2, 3]. Так, согласно Международной технологической маршрутной карте полупроводниковой промышленности [3] к 2014 г. намечен выпуск микросхем с минимальным размером элементов (критический размер — КР) в 22 нм. Однако развитие микроэлектроники идет опережающими темпами. Так в Программе США, разработанной в 1994 г. [2] (табл. 1), достижение критического размера в 130 нм планировалось на 2004 г., в то время как он был достигнут уже в 2002 г. (табл. 2). Поэтому следует ожидать, что критический размер в 22 нм будет получен ранее 2014 г.

Бурное развитие нанотехнологии, имеющей дело с объектами, размеры которых порядка атомных, уже сейчас требует решения проблемы обеспечения единства линейных измерений в нанометровом и субмикрометровом диапазонах. Линейные измерения в этой области длин проводятся с помощью зондовых микроскопов: оптических ближнего поля, растровых электронных, сканирующих туннельных и атомно-силовых, обладающих высоким разрешением. Казалось бы, калибровка этих высокоточных средств измерений может быть осуществлена с помощью периодических мер малой длины, выполненных в виде голограммических дифракционных решеток, значения периода которых от $\lambda/2$ и более, могут быть измерены лазерным интерференционным дифрактометром с погрешностью порядка 1 нм. Однако практика линейных измерений требует для калибровки этих сложных измерительных устройств создания мер малой длины, выполненных в виде рельефной шаговой структуры с заданными шириной, высотой (глубиной) и формой профиля ее элемента.

Именно такие трехмерные меры малой длины — материальные носители размера — необходимы не только для самой калибровки перечисленных зондовых микроскопов, но и для подтверждения достоверности результатов измерения ширины элемента реального объекта, изображение которого регистрируется в микроскопе.

К моменту начала работ (1990 г.) существовало только метрологическое обеспечение измерений длины в диапазоне 1 мкм ÷ 1 м, которому соответствовала многоступенчатая структурная схема передачи размера единицы длины от государственного первичного эталона (ГПЭ) — метра — к измеряемому объекту. Эту схему можно представить образно в виде пирамиды, в основании которой находится вся совокупность рабочих средств измерений, а вершину занимает государственный первичный эталон единицы длины. На промежуточных уровнях (на различных сечениях, параллельных основанию) расположены эталоны 1, 2, 3

(иногда и 4) разрядов. Такое большое число уровней понижает точность измерений от 0,02 нм для государственного первичного эталона до 100 нм на измеряемом объекте.

Переход к измерениям длин в диапазоне 1...1000 нм потребовал **принципиально новых решений** с кардинальным пересмотром традиционных подходов. Для перехода к измерениям длины в указанном диапазоне необходимо:

- провести фундаментальные исследования **механизмов формирования** изображения объекта на рабочем средстве измерений;
- максимально **сократить многоступенчатость** структурной схемы передачи размера единицы длины от государственного первичного эталона к рабочим средствам измерений;
- разработать **новые алгоритмы измерений** и соответствующее им математическое обеспечение, которые позволили бы учитывать **влияние взаимодействия** зонда рабочих средств измерений с измеряемым объектом;
- создать **новую меру**, обладающую свойствами, аналогичными свойствам вторичного эталона длины и измеряемого объекта.

В результате выполнения настоящей работы была полностью решена задача создания основ метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1...1000 нм. При этом созданы:

- методология обеспечения единства измерений в диапазоне длин от 1 нм до 1 мкм, основанная на принципах зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии-фазометрии;
- эталонный комплекс средств измерений, обеспечивающий воспроизведение и передачу размера единицы длины в диапазоне 1 нм...1 мкм вещественным мерам длины с погрешностью 0,5 нм;
- новое поколение мер малой длины для калибровки средств измерений в диапазоне 1 нм...1 мкм, в том числе меры нанорельефа поверхности;
- методология и алгоритмы измерения параметров профиля элементов сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) и пакет компьютерных программ для автоматизации таких измерений.

Полученные результаты были успешно применены в условиях производства СБИС. Испытания показали, что выполняемые измерения уже сейчас соответствуют метрологическим требованиям, изложенным в "Международной программе развития полупроводниковой промышленности вплоть до 2010 г." [3]. Необходимо отметить, что нигде больше в мире проблема метрологического обеспечения развития микроэлектронной промышленности пока не решена.

Выполненная работа соответствует тематике "Перспективные диагностические методы и аппаратура для метрологии, анализа компонентов и

структур, мониторинга технологических процессов в микро- и наноэлектронике", входящей в "Перечень критических технологий Российской Федерации" [4], раздел "Информационно-телекоммуникационные технологии и электроника", п.5 "Элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров", одобренной Протоколом совместного заседания Совета безопасности Российской Федерации, Президиумом Госсовета Российской Федерации и Совета при Президенте Российской Федерации по науке и высоким технологиям (Протокол № 2 от 20 марта 2002 г., пункт 3) и утвержденной Президентом Российской Федерации 30 марта 2002 г. № ПР-578.

Проблемы линейных измерений в процессах современных высоких технологий

1. Линейные измерения в процессах субмикрометровой литографии (нанолитографии)

При производстве современных сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) выполняются порядка 10 процессов литографии (перенос изображения топологического рисунка с шаблона-маски на полупроводниковую пластину с использованием вспомогательного фоторезистового слоя). При этом необходимо сохранить размеры элементов, заложенные в шаблоне, и выполнить точное совмещение рисунков, соответствующих разным конструкционным слоям СБИС. Процесс совмещения рисунков можно контролировать по значению смещения специальных маркерных знаков совмещения. Уход размеров элементов из-за недопроявки или перепроявки (недоэкспонирования или переэкспонирования) фоторезистового слоя определяют путем измерения полученной после проявления фоторезистовой маски. На этой стадии контроля размера возможно исправление допущенных технологических погрешностей путем снятия проявленного слоя фоторезиста и повторения процесса литографии по вновь нанесенному слою фоторезиста. Поэтому измерение размеров элементов микросхем на стадии формирования резистовой маски позволяет повысить выход годных микросхем и снизить их стоимость.

По мере уменьшения размеров элементов СБИС от сотен до десятков нанометров требуемая абсолютная погрешность линейных измерений будет стремиться к значению, соизмеримому с межатомным расстоянием. Особенно остро встает проблема определения положения края элемента и формы его профиля. Решение этой проблемы требует, в свою очередь, правильного выбора рабочих средств измерений и разработки методов учета ап-

паратной функции этих средств. Таким образом, дальнейшее развитие и совершенствование технологии производства СБИС ставит задачу развития и совершенствования метрологического обеспечения линейных измерений в диапазоне 1...1000 нм.

1.2. Физические методы реализации линейных измерений в диапазоне 1...1000 нм

В настоящее время в промышленности для измерения малых длин используются приборы, основанные на методах физической оптики, растровой электронной и сканирующей зондовой (туннельной и атомно-силовой) микроскопии. На верхней границе диапазона 1...1000 нм еще возможно использование традиционной оптической микроскопии. Техническое совершенствование оптических микроскопов превратило их в высокоавтоматизированные измерительные инструменты [5]. Однако принципиальные ограничения метода оптической микроскопии привели к появлению новых оптических измерителей. К числу таких методов относится сканирующая микроскопия ближнего поля [6].

Этот метод основан на сканировании объекта контроля зондирующим пучком, прошедшим, например, через диафрагму в непрозрачном экране, имеющую размер менее длины волны света. Электромагнитное поле за такой диафрагмой, как говорят, "привисает" на расстояние, примерно равное половине длины волны света, и взаимодействует с поверхностью объекта контроля, расположенного за экраном на расстоянии, меньшем половины длины волны света. Отраженный или прошедший сигнал регистрируется чувствительным фотоприемником. Как видно, по своему принципу действия сканирующий микроскоп ближнего поля похож на сканирующий туннельный или атомно-силовой микроскоп. Наименьший размер элемента, различимого на изображении, полученном на сканирующем микроскопе ближнего поля при длине волны света 486 нм, составляет 20 нм. Однако регистрируемое на таком микроскопе изображение очень чувствительно к оптическим характеристикам материала контролируемого объекта, что сильно влияет на точность измерения с его помощью размеров элементов микроструктур.

Наибольшая перспектива развития методов измерения длины во всем диапазоне 1...1000 нм связана с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ). Этому направлению посвящено огромное число публикаций. Укажем лишь большие обзорные статьи, вышедшие за последние 10 лет — [7—10]. В настоящее время современные модели РЭМ выпускают ряд фирм мира, среди которых можно назвать: *Amray, Biord, Cambridge, Etec, Hitachi, JEOL, Nanometrics, Philips*. Практически все

РЭМ этих фирм имеют возможность регистрации изображения в цифровом виде на компьютере.

Наряду с моделями РЭМ, предназначеными для решения широкого класса исследовательских задач, в последнее время разработаны и изготовлены автоматизированные РЭМ для цеховых измерений в линии производства СБИС, например модель S-6200H (*Hitachi*). Кроме того, созданы специальные электронно-оптические средства измерений линейных размеров, которые можно использовать для аттестации эталонных мер в микрометровом и субмикрометровом диапазонах [11–13]. Принципиальные схемы этих измерительных систем практически одинаковы. Объект крепится на подвижном столике, перемещение которого измеряется с помощью лазерного интерферометра в единицах длины волны излучения Не–Не-лазера.

В 80-е годы прошлого столетия широкое развитие получила сканирующая зондовая микроскопия. Сначала был создан сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), использующий квантовый эффект туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер между исследуемой проводящей поверхностью и острием микрозонда [14, 15]. Работа СТМ осуществляется следующим образом: с помощью обратной связи туннельный ток между острием микрозонда и поверхностью объекта поддерживается постоянным. В этом случае в соответствии с рельефом поверхности меняется напряжение на управляемом пьезоэлементе. Если значение работы выхода электронов постоянно вдоль поверхности, то получаемый при сканировании сигнал дает информацию о топографии поверхности в атомном масштабе.

Получившая уже достаточно широкое развитие сканирующая туннельная микроскопия, хотя и обладает более высоким разрешением по сравнению

с РЭМ, но не позволяет исследовать структуры из непроводящих материалов. Кроме того, на точность отображения рельефа поверхности в СТМ заметно влияет плотность поверхностных электронных состояний, наличие природных и индуцированных током иглы микрозонда адсорбатов [16].

Сканирующая атомно-силовая микроскопия, предложенная в 1986 г. [17], реализует принцип измерения силы, действующей на острие иглы (зонда) со стороны исследуемой поверхности. В отличие от туннельного микроскопа, где измеряемой величиной является туннельный ток, здесь изменяется сила, что позволяет использовать атомно-силовой микроскоп (АСМ) для измерения топографии поверхности как проводящих, так и диэлектрических сред. Игла АСМ, расположенная над сканируемой поверхностью, закреплена на кронштейне, образуя с ним единое целое — кантилевер. Силы, действующие на острие иглы, вызывают изгиб (смещение) кантилевера, что фиксируется датчиком смещений, преобразующим смещение в электрический сигнал. С помощью обратной связи положение образца меняется таким образом, чтобы сила, действующая между острием кантилевера и объектом, оставалась бы постоянной в процессе сканирования. При этом регистрируют все три координаты положения острия кантилевера, что позволяет получать трехмерное изображение топографии поверхности.

Сила, действующая между образцом и иглой, есть суперпозиция сил Ван-дер-Ваальса и сил отталкивания. Первые являются силами притяжения и эффективны на расстояниях от десятых долей до десятков нанометров. Силы отталкивания — очень короткодействующие и резко спадают на расстояниях в несколько десятых нанометра. При работе АСМ в режиме неконтактной моды, когда доми-

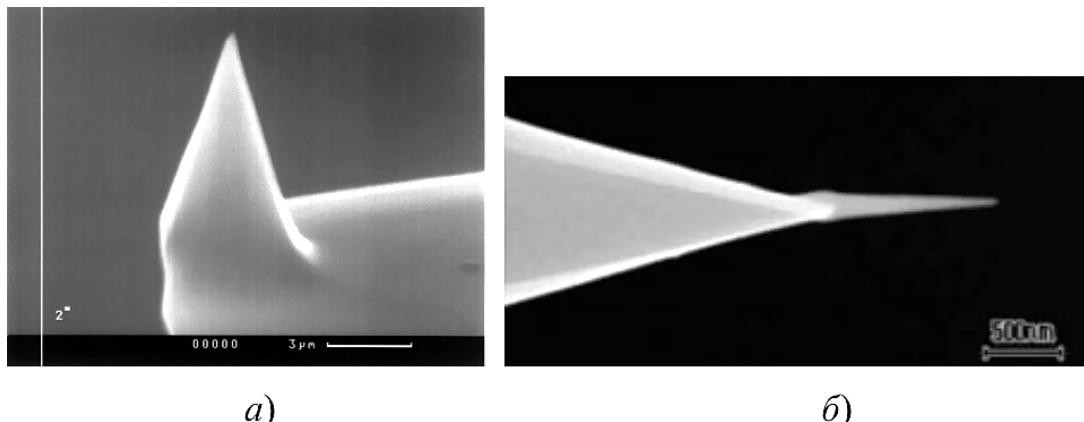


Рис. 1. Микрофотографии в РЭМ обычного (а) и нитевидного (б) кантилеверов

нируют силы притяжения, разрешение составляет единицы нанометра. Атомное разрешение достигается в режиме контактной моды, когда расстояние между иглой и поверхностью не превышает несколько десятых долей нанометров.

Необходимо отметить, что зондом СТМ и АСМ является острье иглы, размеры которой (рис. 1, *a*) накладывают ограничения на получение информации об истинном рельефе поверхности исследуемого образца. В последние годы появились конструкции микрозондов в виде тонких нитевидных волокон [18] с радиусом около 10 нм (рис. 1, *b*) и еще более тонких нанотрубок. Преимуществами СТМ и АСМ перед РЭМ являются их возможность работать как в вакууме, так и на воздухе, а также существенно меньшая стоимость. Однако использование этих приборов в метрологических задачах требует дополнительных исследований.

Рассмотренные выше средства измерений (сканирующий микроскоп ближнего поля, РЭМ, СТМ, АСМ) имеют один общий недостаток: регистрируемое изображение **неадекватно** реальному профилю контролируемого элемента рельефа. Поэтому во всех случаях использования перечисленных средств измерений встает задача построения модели формирования регистрируемого сигнала отклика, **адекватно** отражающей **реальную** форму рельефа поверхности измеряемого объекта.

3. Эталонные средства воспроизведения единицы длины и способы ее передачи к рабочим средствам измерений

В задаче измерения малых длин имеется два принципиально разных случая. Первый случай (наиболее простой) соответствует измерению расстояния (длины) между двумя эквивалентными сторонами соседних элементов, которое определяет шаг в шаговой (периодической) структуре. В этом случае геометрия зонда не оказывает существенного влияния на результат измерения. Здесь требуется только калибровка увеличения прибора. Второй случай (наиболее важный для промышленных технологий) соответствует измерению расстояния (длины) между противоположными сторонами одного элемента рельефа. Этот случай требует еще и учета геометрической формы зонда прибора. Поэтому для решения задачи измерения размера отдельных элементов СБИС необходимо создание **специальных эталонных средств** воспроизведения единицы длины и способов ее передачи к рабочим средствам измерений.

Во введении уже указывалось, что признанный в международной практике способ передачи единицы длины основан на лазерной интерферометрии. Если за эталонный тест-объект выбрать ша-

говую структуру, то с помощью лазерной интерферометрии можно откалибровать шаг этой структуры в единицах (или долях) длины волны эталонного лазерного излучения и использовать эту структуру в качестве вторичного эталона для калибровки увеличения средств измерений. Однако для измерений размеров отдельных элементов СБИС требуется этalon, позволяющий выполнить еще и учет геометрических размеров зонда измерительного устройства, т. е. одновременно с калибровкой увеличения определить размеры зонда.

Анализ отечественных и зарубежных эталонных образцов (мер) показал, что до 2000 г. не существовало эталонной структуры, позволяющей одновременно откалибровать средство измерений малых длин и определить геометрические размеры его зонда. Впервые на возможность создания такой структуры было указано в работе [19], где была продемонстрирована калибровка увеличения РЭМ с одновременным измерением диаметра зонда по зарегистрированным кривым видеосигнала. Именно эта работа послужила прототипом для разработки новой меры [20], которая позволила решить как проблему калибровки увеличения РЭМ с одновременным измерением диаметра его зонда, так и проблему калибровки АСМ с одновременным измерением эффективного радиуса зонда АСМ.

4. Средства измерений малых длин в диапазоне 1...1000 нм

В разделе 2 отмечалось, что для диапазона 1...1000 нм имеется широкий набор моделей РЭМ, выпускаемых различными зарубежными фирмами. К сожалению, в России не производят приборы, соответствующие уровню зарубежных РЭМ, поэтому российская электронная промышленность вынуждена покупать зарубежные образцы такого оборудования.

В настоящее время широкое развитие в мировом приборостроении получила сканирующая зондовая микроскопия. Освоено серийное производство сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) как туннельных, так и атомно-силовых, рядом зарубежных фирм: *JEOL* (Япония), *WA Technology* (Англия), *Burleigh* (Германия), *Spiral* (Франция), *Angstrem Technology*, *Digital Instruments* и *Hewlett Packard* (США). В России наложен серийный выпуск таких приборов в ЗАО "НТ-МДТ" (АСМ НТ-МДТ). На рис. 2 приведена фотография одной из моделей АСМ, выпускаемых фирмой НТ-МДТ.

Отметим, что в соответствии с требованиями потребителей указанный выше парк средств измерений малых длин в диапазоне 1...1000 нм может совершенствоваться. Для СЗМ одной из важных

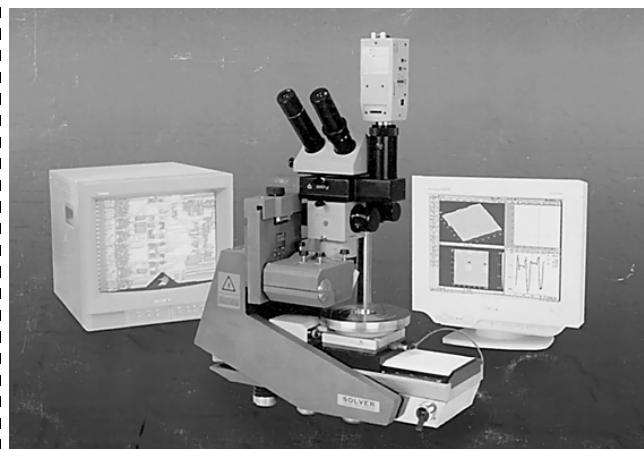


Рис. 2. Сканирующий атомно-силовой микроскоп модели Р7-SPMLS российской фирмы НТ—МДТ, пригодный для использования в микроэлектронике

задач является разработка конструкций микрозондов, позволяющих регистрировать элементы, отстоящие друг от друга на десятки нанометров и имеющие большую глубину рельефа (500...1000 нм). Так уже в настоящее время фирма НТ—МДТ по заказу потребителя может поставлять АСМ, укомплектованные кантileвером с нитевидным острием (см. рис. 1, б).

Использование указанного парка средств измерений малых длин невозможно без упомянутого в разделе 3 эталона, позволяющего откалибровать увеличение прибора и одновременно определить параметры его зонда. Кроме того, эти средства должны быть обеспечены пакетом программ для автоматизированных измерений с применением персонального компьютера.

*Продолжение статьи
см. в следующих номерах журнала.*

Список литературы

1. **Федорин В. Л.** Государственный первичный эталон единицы длины // Российская метрологическая энциклопедия. С.-Петербург: Лики России. 2001. С. 228—231.
2. **The National Technology Roadmap for Semiconductors.** SIA. San Jose. California. USA. 1994. 168 p.
3. **International Technology Roadmap for Semiconductors.** 2001. Edition, Metrology. <http://public.itrs.net>.
4. **Перечень** критических технологий Российской Федерации / Утвержден Президентом Российской Федерации 30 марта 2002 г. № ПР-578.
5. **Nyyssonen D. N.** // J. Opt. Soc. Amer. 1982. V. 72. N 10. P. 1425.
6. **Wilson T., Sheppard C. J. P.** Theory and practice of the scanning optical microscopy. L: Acad. Press. 1984.
7. **Postek M. T.** Critical Issues in Scanning Electron Microscope Metrology // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1994. V. 99. P. 641—671.
8. **Новиков Ю. А., Раков А. В.** Проблемы РЭМ-измерений размеров субмикронных элементов рельефа поверхности твердого тела (ч. 1 и ч. 2) // Микроэлектроника. 1996. Т. 25. № 6. С. 417—435.
9. **Новиков Ю. А., Раков А. В.** Метрология критических размеров элементов СБИС // Измерительная техника. 1999. № 1. С. 14—18.
10. **Postek M. T.** Critical-Dimension Metrology and the Scanning Elctron Microscope // Handbook of silicon semiconductor metrology. Pt. 14 / 2001. New York — Basel: Marcel Dekker. Inc. P. 205—333.
11. **Nyyssonen D. N., Postek M. T.** SEM-based system for the calibration of linewidth SEM's for the IC industry // Proceedings SPIE. 1985. V. 565. P. 181—186.
12. **Natsuzawa T., Toyoda K., Tanimura Y.** Metrological Electron Microscope System for Microfeature of very Large Scale Integrated Circuits // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. N 3. P. 975—979.
13. **Huessler-Grohne W., Bosse H.** An electron optical metrology system for pattern placement measurements // Meas. Sci. Technol. 1998. V. 9. P. 1120—1128.
14. **Binning G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.** Tunneling through a controllable vacuum gap // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. P. 178—180.
15. **Биннинг Г., Рорер Г.** Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности // УФН. 1988. Т. 151. № 2. С. 261—278.
16. **Бухараев А. А.** Диагностика поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии // Заводская лаборатория. 1994. № 10. С. 15—23.
17. **Binning G., Quate C. F., Gerber Ch.** Atomic Force Microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 930—933.
18. **Быков В. А., Лемешко С. В., Новиков Ю. А., Раков А. В.** Исследование субмикронных канавок с помощью атомно-силовых микроскопов // 12 Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел: Тезисы докладов. Черноголовка. "Богородский печатник". 2001. С. 173.
19. **Волк Ч. П., Новиков Ю. А., Раков А. В.** Калибровка РЭМ с помощью периодической линейной меры микронного и субмикронного диапазонов // Измерительная техника. 2000. № 4. С. 48—52.
20. **Волк Ч. П., Горнев Е. С., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В.** Тестовый объект для калибровки растровых электронных микроскопов: Патент на изобретение № 2207503. Дата приоритета 29.03.2001.
21. **Postek M. T., Keery W. J., Larrabee R. D.** The relationship between accelerating voltage and electron detection modes to linewidth measurement an SEM // Scanning. 1988. V. 10. P. 10—18.
22. **Postek M. T.** Low accelerating voltage SEM imaging and metrology using backscattered electrons // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 60. N 12. P. 3750—3754.
23. **Novikov Yu. A., Rakov A. V.** About Accuracy of Dimensions Measurements of Microrelief Elements in an SEM // Preprint N 3. General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences. 1996. 9 p.
24. **Hatsuzawa T., Toyoda K., Tanimura Y.** Metrological electron microscope system for Microfeature of very large scale integrated circuits // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. N 3. P. 975—979.
25. **Miyoshi M., Kanoh M., Yamaji H., Okumura K.** A precise and automatic very large scale integrated circuit pattern linewidth measurement method using a scanning electron microscope // J. Vac. Sci. Technol. 1986. V. B4. P. 493—499.
26. **Postek M. T., Vladar A. E., Villarrubia J.** Is a Production Level Scanning Electron Microscope Linewidth Standard Possible? // Proceedings SPIE. 2000. V. 3998. P. 42—56.
27. **Новиков Ю. А., Раков А. В.** Вторичная электронная эмиссия рельефной поверхности твердого тела // Труды ИОФАН. 1998. Т. 55. С. 3—99.


Страница РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1998 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ № 6 за 1998 г. <http://intra.rfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Рентгенографическое наблюдение влияния вибрации на движение неоднородных несмешивающихся жидкостей через пористые среды

Номер проекта 98-01-00712

Год представления отчета: 2001

Для проведения долгосрочных экспериментальных исследований влияния акустических воздействий на движение неоднородной жидкости через пористую среду созданы экспериментальные стенды и программно-компьютерный комплекс для автоматизации управления оборудованием, сбора и анализа получаемых результатов. Разработан и апробирован программный пакет для автоматизации обработки рентгенограмм движения нефти и воды в образцах нефтяного коллектора. С помощью разработанного оборудования и программного обеспечения исследовалось движение нефти и воды в образцах породы при реальных условиях нефтеносного пласта (давления до 200 атм. температура до 80—100 °C). Проведено рентгенографическое исследование влияния вибрационных воздействий на движение границы раздела, на интегральное предельное количество вытесняемой нефти и на скорость вытеснения нефти при вытеснении нефти водой из пористой среды. Исследовались ситуации как с гравитационным вытеснением, так и с вытеснением потоком воды с заданным градиентом давления. Установлено, что пропитанный нефтью пористый песчаник проявляет гидрофобные свойства при комнатной температуре и становится гидрофильтром при повышении температуры и давления. Определены оптимальные параметры акустических воздействий, которые позволяют выровнять границу раздела.

Исследовано влияние вибрационных воздействий на статические и динамические свойства пористых образцов, пропитанных нефтью и погруженных в соляной раствор.

Предложена математическая модель акустических колебаний капиллярно запертой сплошной среды для малых колебаний, локализованных в окрестности сужения капилляров для всех случаев капиллярного запирания. На основании этой модели определены частоты эффективного акустического воздействия для ликвидации капиллярного запирания. Определены оптимальные частоты и амплитуды воздействий в зависимости от физических свойств пористой среды и свойств вытесняемой и вытесняющей жидкостей, которые хорошо согласуются с экспериментальными дан-

ными. Полученные результаты исследований были использованы для проведения натурных экспериментов по акустическому облучению настоящих нефтеносных скважин. Прирост темпов добычи нефти составлял не менее 10 % при длительности эксперимента 1,5 года.

Двухфазные течения в сильно неоднородных пористых средах: структуры течений, макроскопические модели, макрокинетика (теория + эксперимент)

Номер проекта: 98-01-00460

Год представления отчета: 2000

Построены новые замкнутые математические модели фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости с капиллярными силами и без в сильно неоднородных средах двух основных типов. В среде с двойной пористостью обнаружены (теоретически и экспериментально) три класса течений, различающихся геометрией линий тока и физической природой доминирующего компонента переноса. Модель описывает нелокальное во времени и неравновесное поведение системы при полностью расщепленных быстрых и медленных переменных. Показано, что осредненные фазовые проницаемости и капиллярное давление зависят явно от времени. Рассчитаны времена капиллярной релаксации как нелинейные функции насыщенности. Определены эффективные тензоры фазовых проницаемостей, для которых получено расщепление на сумму произведений известных функций насыщенности на постоянные тензоры, которые вычисляются из решения линейных ячееких задач.

В среде псевдокавернозной (высокопроницаемые изолированные включения) экспериментально и теоретически обнаружены моды двухфазных течений, отличающиеся типом предельного состояния капиллярного равновесия. Для регулярной моды построена осредненная модель, которая описывает поведение полностью равновесной системы. Новым эффектом является независимость эффективных фазовых проницаемостей от локальных фазовых проницаемостей и капиллярного давления на высокопроницаемых блоках. Сингулярная мода течения исследована численно на решеточной модели пористой среды перколяционно-разностным методом.

Для среды кавернозной получена осредненная модель однофазной фильтрации усреднением стоксова течения. Доказано, что ее эффективная проницаемость совпадает с предельной проницаемостью псевдокавернозной среды при бесконечном возрастании проницаемости ее блоков. Для построения моделей применен ме-

тод неравномерного осреднения, базирующийся на пре-дельном переходе к нулю по масштабу неоднородности со специальным выбором формы асимптотических разложений. Получены численные решения ряда ячееких задач, на базе которых построены универсальные зависимости эффективных коэффициентов от параметров неоднородности.

Двухфазная фильтрация при малых капиллярных силах исследовалась методами усреднения в линеаризованном случае и численно в нелинейном случае. В численных экспериментах решалась краевая двумерная задача двухфазной фильтрации в блочно-неоднородной среде конечно-разностным методом с энтропийным условием. Показано, что даже при сильной неоднородности в отсутствии капиллярных сил не происходит расщепления поля насыщенности на два поля и осредненным пределом системы является одна функция насыщенности. Однако макроскопический тензор дисперсии оказывается на порядки больше, чем в классическом случае. Для неупорядоченной среды разработан метод двойного осреднения (по пространству и ансамблю реализаций).

Динамика капель, вращающихся в вязкой жидкости

Номер проекта: 98-01-00182

Год представления отчета: 2001

Теоретически и экспериментально решена задача о вращении деформируемой капли магнитной жидкости в вязкой среде. Капля помещена во вращающееся магнитное поле. Аналитическое решение получено разложением в ряд по напряженности поля (в случае слабых полей) и энергетическим методом (в области сильных полей). В экспериментах использовалась техника Плато и вращающееся магнитное поле с амплитудой до 5 кА/м. Применялись магнитные жидкости с различной концентрацией магнитной фазы. Определены форма капли, магнитные поля и скорости в обеих жидкостях. Показано, что в слабых полях капля принимает сфероидальную форму при любых соотношениях между параметрами системы. С ростом магнитного числа Бонда сфероидальная форма капли переходит в дискообразную. Сценарий перехода определяется магнитной проницаемостью капли. При небольших (до пяти единиц) значениях проницаемости превращение происходит непрерывным образом. При больших проницаемостях наблюдается неустойчивость сфероидальной формы. Капля вначале принимает форму трехосного эллипсоида, вытянутого в экваториальной плоскости, а затем (по мере увеличения напряженности) — форму тонкого диска. Две последовательные бифуркции проходили мягко или жестко в зависимости от магнитной проницаемости жидкости. Построена диаграмма стационарных форм вращающейся капли. Аналитические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Теоретически и экспериментально исследована форма цилиндрического столба магнитной жидкости, сформированного вокруг линейного проводника с током. Под действием постоянного внешнего поля, ортогонального проводнику с током, поперечное сечение капли становится эллипсоидальным, а плоскость симметрии капли смещается вбок параллельно проводнику. В слабом поле смещение пропорционально напряженности внешнего поля. С ростом напряженности поля цилиндрическая поверхность кап-

ли становится неустойчивой, гофрированной. Показано, что критическое значение поля растет с увеличением тока по проводнику по закону, близкому к линейному. Исследована устойчивость цилиндрической капли магнитной жидкости при ее вращении в вязкой среде. Вращение капли обеспечивалось либо вращением линейного проводника, либо вращением внешнего магнитного поля, ортогонального проводнику.

Рассматриваемая задача отличается от классической задачи Тейлора наличием свободной деформируемой границы внутреннего цилиндра и его способностью намагничиваться. Методом Галеркина исследована устойчивость течения и определено критическое число Тейлора. Экспериментально исследованы надкритические режимы. Обнаружены стационарные винтообразные формы поверхности.

Влияние физико-химических свойств сред и внешних полей на гидродинамику движения малых капель

Номер проекта: 98-01-00004

Год представления отчета: 2001

Решена задача о растекании капли вязкой несжимаемой жидкости по горизонтальной гладкой поверхности. При этом предполагалось, что поверхность подложки изначально гидрофобна, но способна модифицироваться при взаимодействии с водой (становится более смачиваемой). Выведены уравнения движения жидкости в капле в случае квазистационарного приближения и уравнение "диффузии смачиваемости" поверхности. Проведено упрощение уравнений на основании малости некоторых безразмерных величин. Получены соотношения для скачка параметров на границе капли. Проведено сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными данными.

Теоретически описано растекание капли жидкости по пористой подложке. Выведены уравнения движения жидкости в капле и в пористом слое в случае квазистационарного течения. В пористой подложке использовано уравнение Дарси. Получены граничные условия на поверхности пористой подложки. Решены выведенные уравнения движения жидкости в различных областях. Получены уравнения, описывающие радиусы капли и ореола жидкости в пористой подложке, которые решены численно. Рассчитаны зависимости скорости и радиусов растекания и ореола, краевого угла от времени. Проведено сравнение полученных теоретических результатов с известными экспериментальными данными.

Теоретически исследовано движение капли неполярной жидкости в тонком капилляре, заполненном раствором электролита под действием перепада давления и/или разности потенциалов на концах капилляров. Выведены уравнения для толщины пленки в случае неперекрывающихся двойных электрических слоев (ДЭС). Получена зависимость скорости капли от наложенных перепада давления и разности потенциалов. Рассмотрено влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ), локализованных на поверхности раздела двух жидкостей, на закономерности движения системы капля—жидкость в капилляре. Получено модифицированное уравнение пленки под каплей. Показано, что возникает дополнительное сопротивление подобной системы, связанное с перераспределением ПАВ на поверхности капли.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА «МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР — Мальцев Петр Павлович, д-р техн. наук, проф., начальник научно-технического сектора Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, зав. каф. "Микросистемная техника" МИРЭА, г. Москва

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА — Лучинин Виктор Викторович, д-р техн. наук, проф., директор Центра диагностики и микротехнологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, г. С.-Петербург

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Антонов Борис Игоревич, директор изд-ва "Новые технологии", г. Москва

Аристов Виталий Васильевич, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института проблем технологий микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, п. Черноголовка, зав. каф. "Наноэлектроники" МФТИ

Белоус Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., зам. директора Научно-исследовательского конструкторско-технологического предприятия "БелМикроСистемы" НПО "Интеграл", республика Беларусь, г. Минск

Быков Виктор Александрович, д-р техн. наук, директор ЗАО "НТ-МДТ" ГосНИИФизпроблем им. Ф. В. Лукина, г. Зеленоград

Васильев Александр Алексеевич, начальник отдела Минпромнауки России, г. Москва

Васильев Всеволод Викторович, чл.-корр. НАН Украины, д-р техн. наук, проф., директор Отделения гибридного моделирования и систем управления в энергетике НАН Украины

Волчихин Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., ректор Пензенского государственного университета, г. Пенза

Гапонов Сергей Викторович, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института физики микроструктур РАН, зав. каф. "Электроника" НижГУ, г. Нижний Новгород

Горнев Евгений Сергеевич, д-р техн. наук, проф., зам. генерального директора НИИ молекулярной электроники и "Микрон", г. Зеленоград

Градецкий Валерий Георгиевич, д-р. техн. наук, проф., зав. лабораторией Института проблем механики РАН, г. Москва

Журавлев Петр Васильевич, канд. техн. наук, директор Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники СО РАН, г. Новосибирск

Захаревич Владимир Георгиевич, д-р техн. наук, проф., ректор Таганрогского государственного радиотехнического университета, г. Таганрог

Каляев Игорь Анатольевич, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., директор НИИ многопроцессорных вычислительных систем ТГРТУ, зав. каф. "Автомобильная электроника", г. Таганрог

Кальнов Владимир Александрович, канд. техн. наук, ученый секретарь Физико-технологического института РАН, г. Москва

Карякин Аркадий Аркадьевич, д-р хим. наук, проф., зав. лабораторией "Биосенсоры" Химического ф-та МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Климов Дмитрий Михайлович, акад. РАН, д-р техн. наук, проф., директор Института проблем механики РАН, г. Москва

Кузин Александр Юрьевич, д-р техн. наук, с. н. с., начальник центра 32 ГНИИ МО РФ, г. Мытищи

Лифшиц Виктор Георгиевич, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Научно-технологического центра по-

лупроводниковой микроэлектроники Института автоматики и процессов управления ДВО РАН, зав. каф. "Физика и технология материалов для полупроводниковой электроники" ДГУ, г. Владивосток

Мокеров Владимир Григорьевич, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, зав. каф. "Полупроводниковые приборы" МИРЭА, г. Москва

Мокров Евгений Алексеевич, д-р техн. наук, генеральный директор — главный конструктор НИИ физических измерений, г. Пенза

Никитов Сергей Аполлонович, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., зам. директора Института радиотехники и электроники РАН, г. Москва

Норенков Игорь Петрович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. "САПР" МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Панич Анатолий Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., директор — главный конструктор Научного конструкторского бюро "Пьезоприбор", г. Ростов-на-Дону

Панфилов Юрий Васильевич, д-р техн. наук, проф. МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Петросян Константин Орестович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. "Электроника и электротехника" Московского государственного института электроники и математики (технического университета)

Петрунин Вадим Федорович, д-р физ.-мат. наук, проф. Московского государственного инженерно-физического института, зав. отраслевой лабораторией Минатома России

Путилов Александр Валентинович, д-р техн. наук, проф., Минпромнауки России, г. Москва

Пятышев Евгений Нилович, канд. физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т, зав. Лаборатории микротехнологии и микроэлектромеханических систем, г. Санкт-Петербург

Сауров Александр Николаевич, д-р техн. наук, проф., директор НПК "Технологический центр" МИЭТ (технического университета), г. Зеленоград

Сигов Александр Сергеевич, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета), зав. каф. "Электроника конденсированных сред"

Станкевич Владимир Георгиевич, д-р физ.-мат. наук, проф., директор отделения "Курчатовского источника синхронного излучения" ИОЯФ РНЦ "Курчатовский институт", г. Москва

Старостин Анатолий Константинович, д-р техн. наук, проф., директор ФГУП "Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования", г. Москва

Степанов Юрий Иванович, канд. техн. наук, начальник 22 ЦНИИ МО РФ, г. Мытищи, зав. каф. "Материалы и изделия радиоэлектроники" МИРЭА

Сухопаров Анатолий Иванович, канд. техн. наук, доцент, Председатель Федерального фонда развития электронной техники, г. Москва

Телец Виталий Арсеньевич, д-р техн. наук, с. н. с., начальник центра 22 ЦНИИ МО РФ, г. Мытищи

Чаплыгин Юрий Александрович, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., ректор Московского государственного института электронной техники (технического университета), зав. каф. "Микроэлектроника и микросистемная техника", г. Зеленоград

CONTENTS

Soukhovoev S. P. Fiber Based MEMS and NEMS 2

Some possible applications of the fiber technology in the area of the micro- and nanoelectromechanical systems (MEMS and NEMS), micro robotic and self-powered micro aerial vehicles with size about 1–2 cm are discussed.

Shalobaev E. V., Monahov Y. S. The Review of Development Microactuators on a Basis Laser Technologier and Offer on to Prospects of Their Development 12

In work the opportunity of reception of small and microangular movings with the help thermostrain, controlled by laser radiation is shown. The new circuits of microdrives on a basis thermomechanical of principles of deformation of a material are offered.

Slesarev Yu. N. Signal Degradation at Termomagnetic Information Recording 17

The analysis of signal degradations is adduced at thermomagnetic record of the information at the destabilizing factors. The basic reasons of breaking time and space relations between given and record signal are discovered.

Dragunov V. P. Influence of the Form of an Elastic Element on the Characteristics of Microelectromechanical Systems 20

In this paper, a generalized model for the pull-in phenomenon in microelectromechanical systems (MEMS) is presented. The pull-in phenomenon for MEMS is represented by algebraic equations. The analytical equations, which allowed to estimate a pull-in voltage and the pull-in displacement for elastic elements of the circular, square, triangular and hexagonal forms are obtained.

Tsarjova S. Yu. Influence of Catalyst Nature and Parameters of Catalytic Pyrolysis of Hydrocarbons Process on Carbon Multi-Wall Nanotubes Morphology 26

Current work is devoted to studying of the influence of catalyst nature and some technological parameters on morphology of carbon multi-wall nanotubes (MWNT) fabricated by catalytic pyrolysis of

hydrocarbons. A number of experiments with different compounds of Iron and Nickel as source of metallic nanosized catalyst particles and benzene and toluene as source of carbon were carried out. The carbon products are studied by scanning electron microscopy, transmission electronic microscopy and Raman spectroscopy. The analysis show that the MWNT with coaxial conical structure mainly were fabricated over Fe catalyst. MWNT with coaxial cylindrical structure were obtained over Ni catalyst. Insertion of S-containing compounds into the process results in increase of the MWNT's internal cavity, in some cases — to filling this cavity by the catalyst material. Addition of H₂ resulted in yield increase of MWNT.

Serov I. N., Lukyanov G. N., Margolin V. I., Potsar N. A., Soltovskaya I. A., Fantikov V. S., Tupik V. A. Deposition and Investigation into Nano-Sized Copper Films with Fractal Structure 31

The authors studied the possibility of influencing the structure of thin films, obtained by the magnetron ion deposition technique, through using the fractal-matrix structurizers and with the aim of triggering self-organization processes and creating local areas of well-defined fractal structure in films.

Todua P. A., Bykov V. A., Volk Ch. P., Gornev E. S., Zhelkobaev Zh. etc. Scientific and Technological bases of Metrological Security of Length Dimension in Micrometer and Nanometer Ranges and their Intrusion in Microelectronics and Nanotech-nological 38

The bases of metrological security of the dimensions based on the methods of scanner probe microscopy and laser interferometer — phasemeter are represented. The methods and means of reproduction and transmission of the unit of length dimension in the indicated range with absolute binding to the state primary standard of the unit of length — the meter are offered; the technology is developed and tree-dimensional micro-nanorelief of surface are created and also the algorithms and the package of programs permitting to realize the automated tree-dimensional dimension of the condensed environments are created.

Подписку за рубежом принимают:

For foreign subscribers:

ЗАО МК-Периодика. E-mail: info@periodicals.ru;

**Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev
Index 79493.**

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: (7 095) 269-5510.