

**МСТ**

# **МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА**

**№ 7 ✦ 2004**

**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**Журнал выпускается при научно-методическом руководстве**

**Отделения информационных технологий и вычислительных систем**

**Российской Академии наук**

**Издается с 1999 г.**

**ISSN 1684-6419**

**Главный редактор**

Мальцев П. П.

**Зам. гл. редактора**

Лучинин В. В.

**Редакционный совет:**

Аристов В. В.  
Васильев В. В.  
Гапонов С. В.  
Каляев И. А.  
Климов Д. М.  
Лифшиц В. Г.  
Мокеров В. Г.  
Никитов С. А.  
Чаплыгин Ю. А.

**Редакционная коллегия:**

Антонов Б. И.  
Белоус А. И.  
Быков В. А.  
Васильев А. А.  
Волчихин В. И.  
Горнев Е. С.  
Градецкий В. Г.  
Журавлев П. В.  
Захаревич В. Г.  
Кальнов В. А.  
Карякин А. А.  
Кузин А. Ю.  
Мокров Е. А.  
Норенков И. П.  
Панич А. Е.  
Панфилов Ю. В.  
Петросянц 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.

**Отв. секретарь**

Лысенко А. В.

**Редакция:**

Безменова М. Ю.  
Григорин-Рябова Е. В.

**Учредитель:**

Издательство "Новые технологии"

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ**

Самойлович М. И., Клещева С. М., Белянин А. Ф., Житковский В. Д., Цветков М. Ю. Трехмерные нанокомпозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Часть II . . . . .	2
Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Чаплыгин Ю. А. Логические ключи на основе пучков однослойных углеродных нанотрубок . . . . .	12
Балан Н. Н. Повышение точности голограммических измерений параметров MEMS-NEMS-структур путем использования нелинейных эффектов . . . . .	15
Гришин М. В., Далидчик Ф. И., Ковалевский С. А., Колченко Н. Н., Самойленко А. А. Изучение электронных ловушек в тонких диэлектрических пленках методом сканирующей тунNELьной спектроскопии . . . . .	19

### **ЭЛЕМЕНТЫ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ**

Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А. Синергетика миниатюризации: микроэлектроника, микросистемная техника, nanoэлектроника . . . . .	23
---	----

### **МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ**

Шалобаев Е. В., Монахов Ю. С., Старжинский В. Е., Шилько С. А. Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем. Технологии поверхностной и объемной микромеханики . . . . .	30
---	----

### **КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ**

Космодемьянская Г. Н., Сорокина С. И. Упрощенные модели движения микрокапсулы в трубках малого диаметра . . . . .	36
--	----

СТРАНИЧКА РФФИ . . . . .	42
--------------------------	----

**\*\*\***

Смирнов Д. Ю., Мальцева С. В. Проектирование и управление Интернет- ресурсами сайта журнала "Микросистемная техника" . . . . .	46
Contents . . . . .	48

**Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России**

Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению  
статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>.

**ПОДПИСКА:**

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

# ФАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 539.2 + 621.38

**М. И. Самойлович**, д-р. физ.-мат. наук, проф.,  
**С. М. Клещева**, канд. геолого-минералог. наук,  
**А. Ф. Белянин**, д-р техн. наук,  
**В. Д. Житковский**, канд. техн. наук,  
**М. Ю. Цветков**,  
ОАО ЦНИТИ "Техномаш", г. Москва  
e-mail: samoylovich@technomash.ru

## ТРЕХМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ УПОРЯДОЧЕННЫХ УПАКОВОК НАНОСФЕР КРЕМНЕЗЕМА.

### Часть II\*

Разработана технология изготовления правильных кубических упаковок монодисперсных наносфер  $SiO_2$ . Это позволяет создавать новые типы материалов — трехмерные суперрешетки, включая так называемые фотонные кристаллы, или материалы с фотонной запрещенной зоной.

С использованием специально разработанных технологий проведены эксперименты по заполнению межсферического пространства полупроводниками, сверхпроводниками, оптически усиливающими, ферромагнитными и другими материалами. В созданных уникальных трехмерных наносистемах обнаружены квантово-размерные и другиеnanoэффекты, такие как, например, нелинейное взаимодействие между индивидуальными нанокластерами электронной подсистемы.

### 3. Результаты экспериментальных работ по заполнению межсферических пустот в опаловой матрице различными материалами и исследование свойств полученных нанокомпозитов

В ходе совместных работ с Санкт-Петербургским Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе и Институтом молекулярной и атомной физики Национальной академии наук Беларуси, а также и

\* Начало статьи см в № 6 журнала "Микросистемная техника"

другими организациями были проведены экспериментальные исследования по заполнению межсферических пустот в опаловой матрице различными материалами (в том числе полупроводниковыми, сверхпроводящими, магнитными, люминесцирующими) с использованием таких методик, как обработка под давлением при высоких температурах (до 973 К и до  $10^3$  кПа), гидротермальная обработка в автоклавах (до 773 К и до  $3 \cdot 10^5$  кПа), химическое осаждение и газотранспортные реакции, золь-гель метод, а также некоторых других [1—5]. Приведем некоторые наиболее интересные результаты, полученные в ходе указанных исследований.

#### 3.1. Металлы в опаловой матрице

Спектр отражения пленки чистого Ga (рис. 1, а) достаточно гладкий с небольшим увеличением в области 3 эВ, можно объяснить плазменными эффектами [6]. Спектр отражения образца незаполненной опаловой матрицы (рис. 1, б) характеризуется резко выраженным брэгговским отражением в области запрещенной зоны ~520 нм, что объясняется дифракцией от {111} плоскостей опаловой матрицы. Спектр отражения галлиевого металлического фотонного кристалла (рис. 1, в), сформированного на основе опаловой матрицы, значительно отличается от спектров отражения обоих предыдущих образцов, поскольку содержит широкую полосу брэгговского отражения в области 650 нм (1,9 эВ), а также характеризуется существенным увеличением отражения в области малых энергий.

Температурные зависимости электрического сопротивления  $R/R_0$  для опаловой матрицы, заполненной Ga, и для чистого Ga показана на рис. 2 ( $R_0$  — сопротивление образца при 273 К составляет 2,04 мОм для чистого Ga) [6]. Из сравнения этой зависимости и линейной зависимости  $R(T)$ , характерной для металлов, можно сделать вывод, что Ga, заполняющий опаловую матрицу — металлическая фаза, и, таким образом, эти образцы действительно представляют собой металлические фотонные кристаллы. Аналогичные образцы, кото-



Рис. 1. Оптическое отражение для объемного образца галлия (а); опаловой матрицы (б) и опаловой матрицы, заполненной галлием (в)

рые были получены иным способом с использованием планарных опаловых структур, показывают линейную зависимость  $R$  от температуры, хотя не обладают 100 %-ным заполнением межсферических пустот. По графику, представленному на рис. 2, установлено, что для опаловой матрицы, заполненной Ga, коэффициент сопротивления меньше, чем для чистого металла; последнее согласуется с известным феноменом изменения различных свойств в пористых материалах (см., например, [7, 8]). К тому же, как видно на графике рис. 2, в районе 50 К для Ga-фотонных кристаллов происходит качественное изменение  $R(T)$  — экспоненциальное снижение, соответствующее структурным фазовым переходам, изученным благодаря рентгенографическим исследованиям [8] (таких изменений не наблюдается в чистом Ga). Длинный хвост на графике отражения (см. рис. 1) в запрещенной зоне при увеличении длины волн можно объяснить большим межплоскостным расстоянием, что происходит при большой концентрации неоднородностей типа дефектов упаковки. Относительно низкий коэффициент отражения на графике соответствует относительно сильному отражению поверхностью опаловой матрицы.

В опаловые матрицы вводились также металлы 3d-группы в связи с ожидаемыми квантово-размерными магнитными эффектами для такого рода нанокластеров (как, например, показанные на рис. 3 частотные зависимости для планарных опаловых матриц, содержащих Co, Ni или Fe).

При заполнении сверхпроводящими металлами Pb, Bi, In, Sn и их сплавами были получены 3D-сверхрешетки джозефсоновских переходов с характерным транспортным током, обусловленным зависимостью плотности тока от параметра порядка (рис. 4). Оказалось, что каждый фрагмент такой

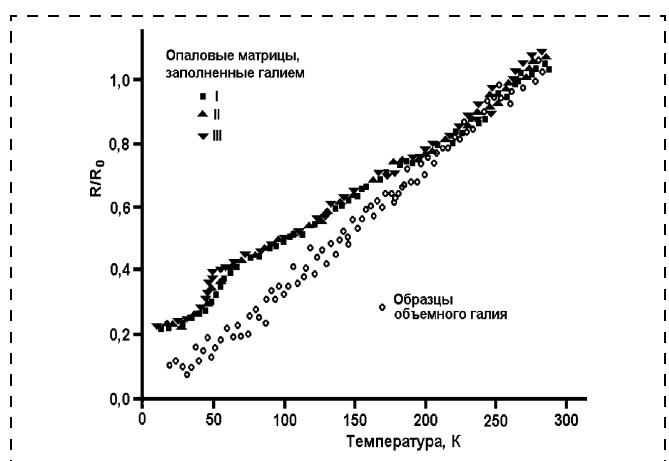


Рис. 2. Температурные зависимости электрического сопротивления Ga (объемные образцы) и для нескольких образцов (I, II, III) опаловых матриц, заполненных Ga

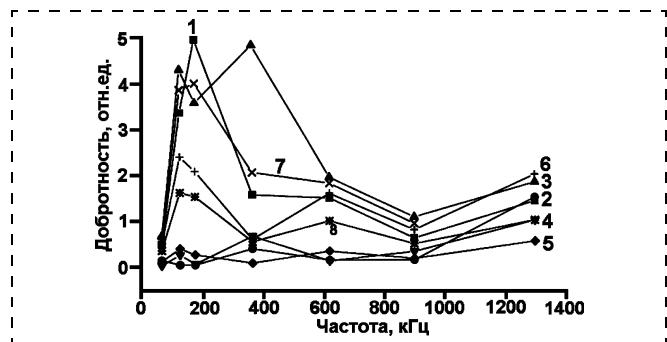


Рис. 3. Частотные зависимости для планарных опаловых матриц, содержащих Co (1, 2, 4), Ni (5, 6) или Fe (7, 8)

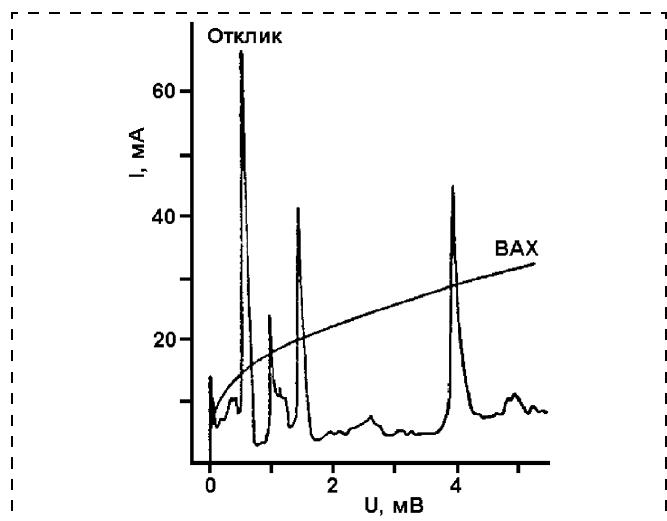


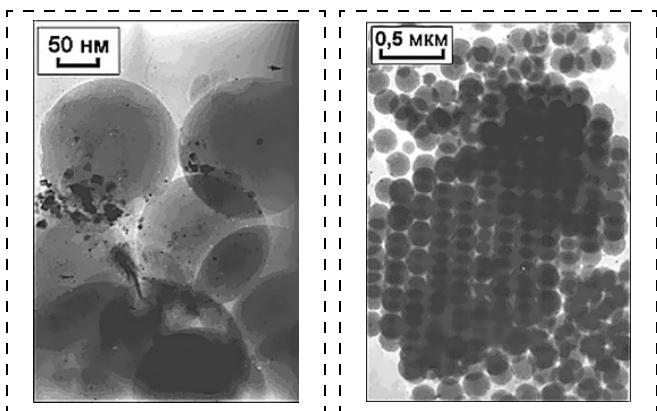
Рис. 4. Отклик трехмерной регулярной системы джозефсоновских переходов Bi—Pb на СВЧ излучение (4,2 К; 4 ГГц). ВАХ — вольт-амперная характеристика

сверхрешетки "кластер — сужение — кластер" является отдельным физическим прибором, причем все эти приборы, объединенные в 3D-сверхрешетку, образуют единый ансамбль с очень высокой плотностью элементов. Среди указанного типа обладают характерными нелинейными физическими свойствами, так как протекание электрического тока контролируется сужениями, т. е. каналами, соединяющими структурные межсферические пустоты, сопоставимыми с размерами длины волны когерентности.

В связи с эффектами, описанными в последующих разделах, отдельный интерес представляют нанокомпозиты на основе опаловых матриц с введенными в них частицами коллоидного серебра (рис. 5) или с наносферами  $\text{SiO}_2$ , во внешних слоях которых содержится серебро (рис. 6).

### 3.2. Соединения $A^{III}B^V$ в опаловой матрице

В случае заполнения опаловых матриц полупроводниками электронная подсистема формируемого нанокомпозита вследствие размерного кванто-



**Рис. 5.** Электронно-микроскопический снимок (на просвет) нанокомпозита на основе опаловых матриц с введенными в слоях которых содержится серебро

**Рис. 6.** Электронно-микроскопический снимок (на просвет) наносфер  $\text{SiO}_2$ , во внешних слоях которых содержится серебро

ния модулирована, а именно, образуется 3D-сверхрешетка квантовых ям с характерной модуляцией ширины запрещенной зоны. В тех случаях, когда глубина модуляции токоведущего канала достигает необходимого значения, а следовательно, образуется определенный потенциальный рельеф, возникает наномасштабный материал с ансамблем взаимодействующих наноэлементов.

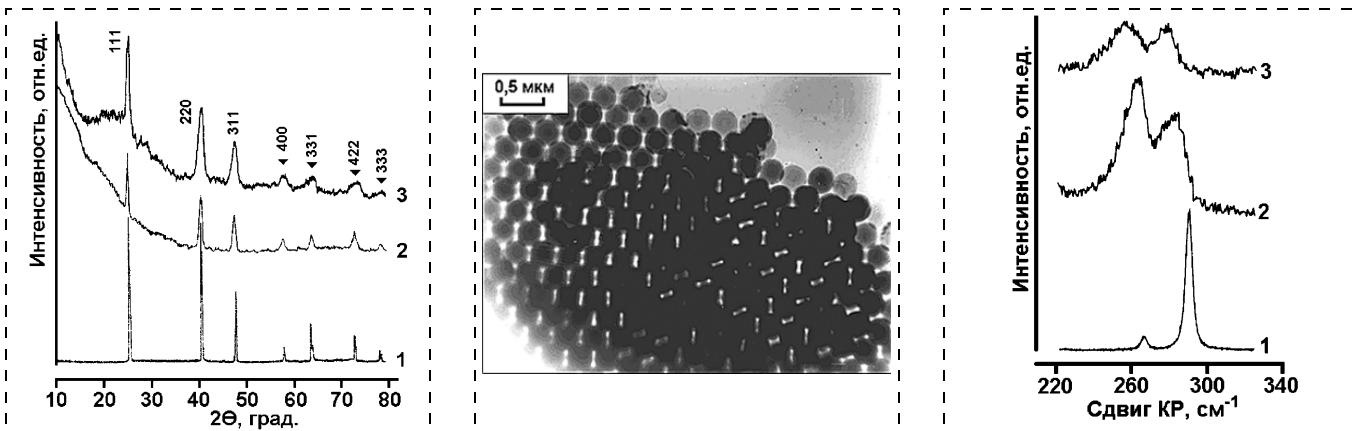
Для введения арсенида галлия в межсферические пустоты опаловых матриц использовались следующие методики. Образцы отжигались на воздухе при температуре 1073 К в течение 30 мин, после чего в межсферические пустоты опаловых матриц вводился галлий из расплава методом высоких давлений, для чего образцы помещались в ампулы из мягкой стали, ампулы заполняли расплавленным галлием и закрывали крышкой. Затем ампулы

с образцами помещались в камеру высокого давления и сжимались сверху и снизу поршнями. Образцы заполнялись при температуре 313 К и давлении  $5 \cdot 10^2$  Па. После этого образцы опалов с галлием и навеска мышьяка помещались в кварцевую ампулу, которая откачивалась и запаивалась. Образцы отжигались в парах мышьяка в двухзонной электропечи в течение 100 ч. Образцы были исследованы рентгено-дифракционным (рис. 7) и электронно-микроскопическим методами (рис. 8), а также методом комбинационного рассеяния (рис. 9).

В матрице опала была также синтезирована трехмерная решетка кластеров GaAs (45–50 нм). Вольт-амперные характеристики этой решетки показали, что получаемая система может рассматриваться как трехмернаяnanoструктура из элементов типа диодов Шоттки (размеры которых порядка 100 нм) со встречным включением [9].

Проведенные исследования позволяют предположить широкие возможности применения в оптоэлектронике нанокомпозитов на основе опаловых матриц с нитридами III группы в качестве заполнителей. В работе [10] впервые удалось ввести в опаловую матрицу нитриды Ga и In. Использование опаловой матрицы позволяет получить площадь рабочей поверхности контактов в светоэмиссионных диодах до  $10 \text{ м}^2$  на  $1 \text{ см}^3$  матрицы, что в свою очередь снижает плотность тока в наноприборах на 3–4 порядка по сравнению с конвекционными планарными технологиями.

Следует отметить некоторые особенности технологии получения нанокомпозитов состава опаловая матрица — нитриды элементов III группы. Нитриды элементов III группы (III-нитрид) могут быть синтезированы непосредственно в опаловых пустотах. Реагенты в виде солей металлов III групп-



**Рис. 7.** Рентгеновские дифрактограммы:  
1 — GaAs; 2 — GaAs в опаловой матрице (большая степень заполнения); 3 — GaAs в опаловой матрице (малая степень заполнения)

**Рис. 8.** Электронно-микроскопический снимок (на просвет) опаловой матрицы с GaAs. Светлые участки соответствуют межсферическим пустотам

**Рис. 9.** Спектры комбинационного рассеяния:  
1 — эпитаксиальный GaAs; 2 — GaAs в опаловой матрице (большая степень заполнения); 3 — GaAs в опаловой матрице (малая степень заполнения)

пы вводились в опаловые поры, затем образцы отжигались в присутствии гидрооксида аммония. Разработанная технология [10] позволила повысить фактор заполнения межсферических пустот практически до 100 %. Цинк и магний использовались как добавки для создания полупроводников *p*-типа. В образцах этих нанокомпозитов наносфера  $\text{SiO}_2$  покрывались золотом и платиной для создания омических контактов с нитридами элементов III группы. Для этого образцы опаловых матриц перед заполнением нитридами погружались в раствор  $\text{PtCl}_4$  и  $\text{AuCl}_3$  в этаноле, затем хлор замещался водородом.

Структурное состояние вещества кластеров определялось методами рентгеновской дифракции, высокоразрешающей трансмиссионной, сканирующей и тунNELьной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния. На рис. 10 представлен снимок, полученный методом тунNELьной микроскопии, опаловой матрицы, заполненной GaN. Сфера кремнезема выделена белым пунктирным кругом. Правильная гексагональная упаковка сфер кремнезема выделена белым пунктирным шестиугольником. Сфера кремнезема окружены кристаллическим веществом. Средний диаметр частиц кремнезема составляет 250 нм. На рис. 11 приведен электронно-микроскопический снимок опаловой матрицы со 100 %-ным заполнением межсферических пустот GaN. Картина микродифракции (врезка на рис. 11) подтверждает наличие гексагонального GaN в пустотах опала. Линейные размеры кристаллов GaN составляют свыше 50 нм. По результатам рентгеновских исследований вычислены параметры решетки:  $a = 0,318(1)$  нм,  $c = 0,519(1)$  нм, что хорошо согласуется со стандартными значениями для гексагональной упаковки GaN. Аналогичным образом в опаловые поры вводился нитрид In.

На рис. 12 представлен спектр композиционного рассеяния (КР) композита опал — GaN (кривая *a*), содержащий два пика. Интервал час-

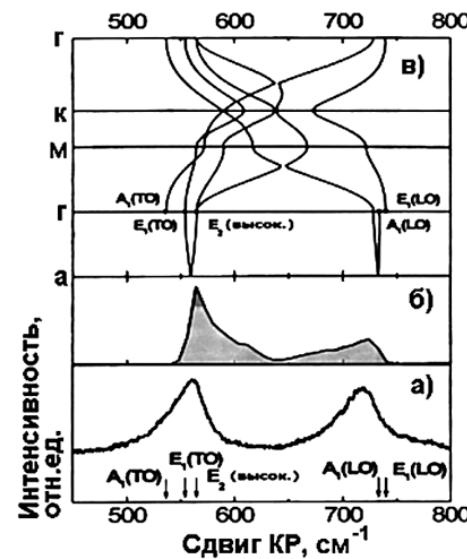


Рис. 12. Спектр КР нанокомпозита опал — GaN (*a*); вычисленная плотность однофононных состояний (ПОС) для GaN (*b*); зависимость фононных распределений для объемного GaN (*c*)

тот  $530\text{--}570 \text{ см}^{-1}$ , к которому принадлежит низкочастотный пик, относится к области колебаний для фононов  $A_1$  (TO) и  $E_1$  (TO), а также для неполяризованного фонона  $E_2$ . Более высокочастотный участок с максимумом при  $725 \text{ см}^{-1}$  определяется колебаниями продольных компонент поляризованных фононов.

Заполненные образцы опала с III-нитридами являются диэлектриками (сопротивление композита опал — GaN  $10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Композиты опаловая матрица — III-нитрид — благородный металл в случае GaN с добавками Zn обладают сопротивлением  $10^3\text{--}10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . На рис. 13 приведена вольт-амперная характеристика композита опаловая матрица — GaN: Zn — Pt. Очевидно, что Pt образует омические контакты с GaN, легированным Zn, а Mg — GaN — образцы не меняют сопротивления.

Разработка технологии получения омических контактов с GaN внутри пор — лишь первая сту-

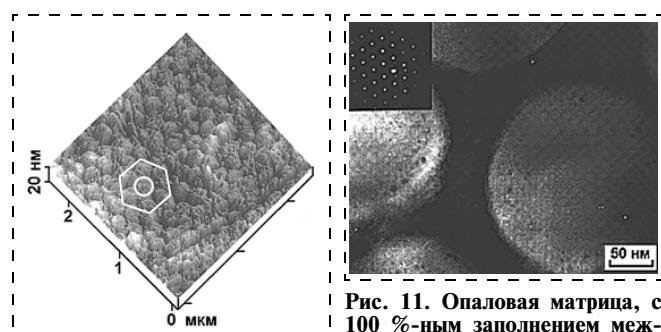


Рис. 10. Снимок нанокомпозита опал — GaN (метод тунNELьной микроскопии)

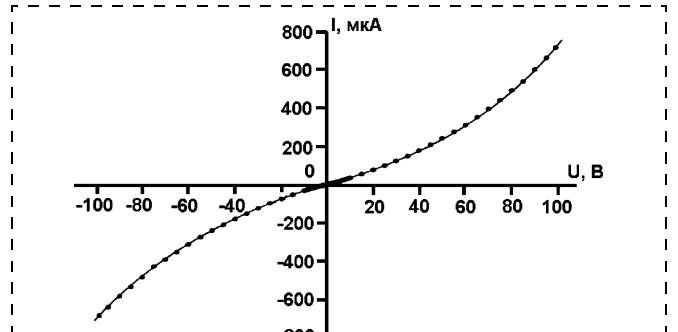


Рис. 13. Вольт-амперная характеристика нанокомпозита опал — Pt — GaN:Zn [10]

пень в создании светоэмиссионных полупроводниковых приборов на основе опаловой матрица — III-нитрид фотонных кристаллов [10].

При заполнении структурных пустот опаловидных матриц такими полупроводниковыми материалами, как GaAs и InAs [21], были получены кластерные сверхрешетки, описываемые как зеебековские среды, которые могут быть перспективны в качестве термоионных энергетических конвертеров (преобразователей) с очень высокой плотностью элементов (до  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Были проведены измерения электрического сопротивления, термической проводимости и рассчитаны зеебековские коэффициенты. Экспериментально полученный коэффициент Зеебека для кластерной решетки GaAs хорошо согласуется с вычисленным. Система обладает высокой термической энергией, низкой термической проводимостью и большим сопротивлением. Когда ширина перехода уменьшается, появляется туннельный ток и материал становится металлом (или полупроводником). Особенности их электрических характеристик показывают, что имеет место туннелирование между соседними кластерами в такой аморфной  $\text{SiO}_2$ -среде.

### 3.3. Кремний и углерод в опаловой матрице

Используя для заполнения опаловой матрицы (при дисперсии в размерах частиц кремнезема не более 3 %) оптически активные материалы с различными показателями преломления, можно эффективно управлять особенностями строения фотонных полос в целях получения трехмерных нанокомпозитов с необычными, в частности, квантовооптическими характеристиками [9, 11]. Практический интерес к такого рода системам связан с возможностями получения в них оптической эмиссии или же их использования для локализации и управления светом, т. е. с возможностями применения таких оптически активных сред, например, в лазерных гироскопах или в лазерных считающих устройствах для компакт-дисков, используемых в компьютерной, аудио- и видеотехнике [9, 12].

С использованием разработанной ранее thermo-CVD методики введения в поры опала кремния был получен образец со 100 %-ным заполнением подрешетки пустот кремнием [12]. Затем вещество матрицы ( $\text{SiO}_2$ ) было удалено с помощью травления образца в водном растворе плавиковой кислоты. На рис. 14 приведены схема опаловой решетки и подрешетки пустот. Таким образом, был получен композиционный материал, представляющий собой реплику подрешетки пустот опала (инвертированный опал) и полностью состоящий из аморфно-кристаллического кремния. Композиты опал — Si и инвертированный опал были исследованы методами рентгеноструктурного фазового анализа,

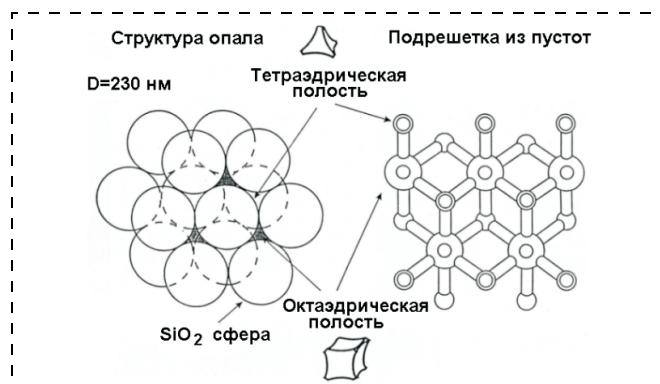


Рис. 14. Схема строения опаловой матрицы и подрешетки пустот в опаловой матрице

спектроскопии КР, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). На рис. 15 представлен СЭМ-снимок Si-инверсионного опала. Необходимо отметить, что фактор заполнения опаловой решетки зависит от толщины образца. На рис. 16 представлены спектры отражения чистого опала (a), композита опал — 40 % Si (б), инверсионного Si (в) и композита опал — 100 % Si (г). Спектры отражения инверсионного опала приведены также на рис. 17.

Приведенные параметры фотонной запрещенной зоны исходной опаловой матрицы, композита опал — Si и инверсионного опала дают возможность предполагать, что кремниевый инверсионный опал представляет собой совершенный фотонный кристалл, "оптический контраст" которого

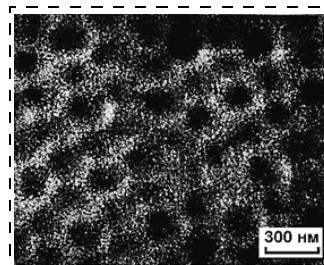


Рис. 15. Электронно-микроскопический снимок (на просвет) Si-инверсионного опала

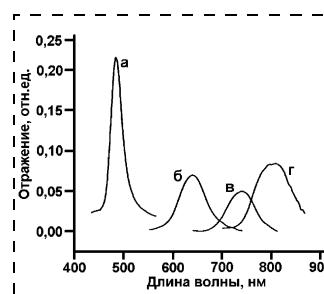


Рис. 16. Спектры оптического отражения:

а — чистого опала; б — композита опал — 40 % Si; в — инверсионного Si; г — композита опал — 100 % Si

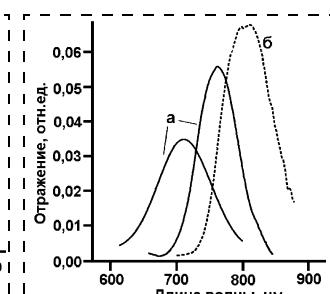


Рис. 17. Спектры оптического отражения:

достигает 3,5. Согласно теоретическим расчетам, такой объект должен обладать полной запрещенной зоной [13].

Пластины опаловой матрицы миллиметровой толщины содержали зерна наноалмаза размером 2—5 нм и другие фазы углерода, которые были введены [14] в межсферические пустоты плазменным методом. Последующее удаление  $\text{SiO}_2$ -наносфер из такой опаловой матрицы (травлением в HF) приводит к образованию материала, чья структура определяется строением исходной опаловой пластины. Слой толщиной ~40—60 мкм (образуется на внешней поверхности опаловой матрицы) является углерод-содержащим композитом со структурой инверсного опала, которая сформирована заполнением межсферических пустот опаловой матрицы различными материалами на основе углерода, в частности, фазой алмаза (определяемой по электронной дифракции и положению основной линии  $1332 \text{ см}^{-1}$  в спектре КР [15]). Интересный результат получен по синтезу нанотрубного углерода в межсферических пустотах опаловых матриц [16].

### 3.4. Оксиды в опаловой матрице

Наличие межсферических пустот в опаловой матрице позволяет варьировать оптический контраст путем полного или частичного заполнения пустот различными материалами (например, результаты введения жидкостей представлены в [17]). Однако для практического применения необходимо наличие твердого вещества внутри такой структуры. Хорошо известно, что некоторые оксиды, такие как  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{TiO}_2$ , используются для производства гомогенных диэлектрических аморфных пленок, обладающих необходимыми оптическими характеристиками. Для введения в объем опаловой матрицы реагенты в ряде случаев должны быть в жидком состоянии и для этого можно использовать золь-гель метод.

Кратко технология получения опаловых матриц с  $\text{TiO}_2$  выглядит следующим образом (см. С. М. Самойлович. Автореферат канд. дисс. М.: МГУ. 1999). Для получения  $\text{TiO}_2$  был использован  $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  в виде раствора в воде с добавлением этанола. Образец опаловой матрицы пропитывался этой жидкостью и затем подвергался нагреванию в течение 0,5—1 ч при 570—670 К. Процесс повторялся много раз, поскольку такая обработка не разрушает первоначальную структуру. Результаты данного исследования (пустоты в опаловой матрице заполнены оксидом Ti неравномерно по объему образца) приведены на рис. 18 [18]. В приповерхностной зоне (не глубже нескольких микрометров) формируется подрешетка с практически 100 %-ным заполнением пустот (рис. 18, a), чем глубже слой, тем меньшее количество  $\text{TiO}_2$  содержится в меж-

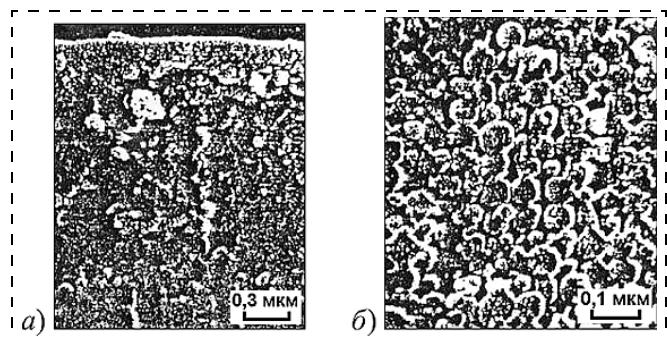


Рис. 18. Электронно-микроскопический снимок (метод реплик) опаловой матрицы, заполненной  $\text{TiO}_2$ :

а — приповерхностный участок образца (не глубже нескольких микрометров); б — средняя часть образца

глобулярном пространстве. Снимок средней части образца (рис. 18, б) очень похож на незаполненную опаловую матрицу. На рис. 19 для сравнения представлены спектры оптического пропускания чистой опаловой матрицы на воздухе (а) и погруженной в различные жидкости — этанол (б), циклогексан (в), толуол (г), а также опаловой матрицы, заполненной  $\text{TiO}_2$  с добавлением этанола для достижения 100 %-ного заполнения пустот. Увеличение коэффициента преломления заполнителя вызывает смещение положения ширины запрещенной зоны в сторону увеличения длины волны. Прогибы в спектрах пропускания подтверждают наличие в нанокомпозите опаловая матрица —  $\text{TiO}_2$  фотонной запрещенной зоны [18]. Варьируя составом заполнителей, можно контролировать модуляцию диэлектрической функции. С этой точки зрения золь-гель метод является перспективным для создания активных фотонных кристаллов на основе опаловых матриц.

В работе [19] была изучена температурная зависимость проводимости нанокомпозита опаловая матрица —  $\text{VO}_2$  близи фазового перехода металл — полупроводник. На рис. 20 показана петля гистерезиса проводимости композита, измеренная в

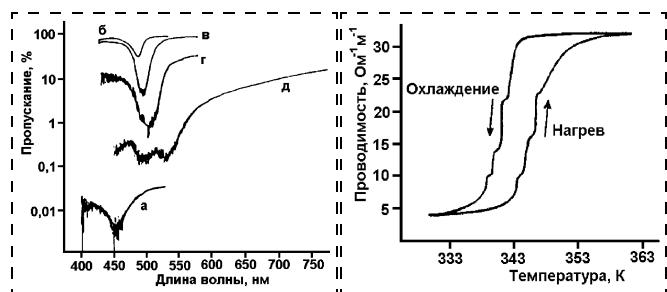


Рис. 19. Спектры оптического пропускания опаловой матрицы на воздухе (а), погруженной в различные жидкости (б, в, г) и заполненной  $\text{TiO}_2$  с добавлением этанола (д)

Рис. 20. Петля температурного гистерезиса проводимости нанокомпозита опал —  $\text{VO}_2$  [19] в этаноле (б), циклогексане (в), толуоле (г) и заполненной  $\text{TiO}_2$  с добавлением этанола (д)

температурном интервале 290—360 К. Следует обратить внимание на следующие характеристики экспериментально полученных кривых: во-первых, ветвь нагревания начинается при температуре 340 К, соответствующей чистому кристаллу  $\text{VO}_2$  (что доказывает стехиометричность  $\text{VO}_2$  в синтезированных образцах); во-вторых, петля гистерезиса имеет почти симметричную форму, т. е. ветви нагревания и охлаждения параллельны (что свидетельствует о низкой концентрации кислородных дефектов). Сами петли термического гистерезиса имеют ступенчатый профиль, что характеризует размерные эффекты в соответствии с природой перехода металл — полупроводник для данного композита. В целом, экспериментальные результаты измерения проводимости [19] хорошо согласуются с интерпретацией, основанной на электронной природе фазового перехода в  $\text{VO}_2$ , и можно предположить, что имеет место фазовый переход в материале, синтезированном в межсферических пустотах опаловых матриц. Переход, который продолжается в течение нескольких фемтосекунд, подтверждает возможность использования нанокомпозита опаловая матрица —  $\text{VO}_2$  как материала для ультрабыстрого устройства с фотонной запрещенной зоной.

Вызывают интерес также другие особенности композитов на основе опаловых матриц со свойствами материалов с фотонной запрещенной зоной. В незаполненных опаловых матрицах со значением оптического контраста менее 1,5 реализация полной фотонной запрещенной зоны представляется невозможной. Теоретическая оценка показывает, что совершенная фотонная запрещенная зона может быть реализована в инверсионных опалах при оптическом контрасте более 2,8. Инверсия, означающая избирательное удаление  $\text{SiO}_2$ -сфер из объема опалового композита, приводит к образованию кубической трехмерной решетки нанопустот, занимающих ~74 % общего объема, которая расположена в правильной диэлектрической матрице с высоким индексом отражения, занимающей ~26 % общего объема. Стоит упомянуть, что диэлектрическая константа полупроводниковой фазы  $\text{VO}_2$  достигает 9. Таким образом, оптический контраст инвертированного композита позволяет создать определенные фотонные кристаллы с полной запрещенной зоной [13].

### 3.5. Оптически активные материалы в опаловой матрице

В последние годы все большее внимание уделяется разработкам новой элементной базы оптоэлектроники, волоконной и интегральной оптики, причем прогресс в этой области во многом определяется возможностями создания новых оптиче-

ских материалов. Несомненно, что наиболее перспективными являются трехмерныеnanoструктуры, поскольку в таких материалах проявляются квантово-размерные эффекты, а формирование селективных спектральных зон для распространения излучения приводит к изменению характеристик взаимодействия излучения с веществом, включая изменение вероятностей излучательных переходов, спектра излучения и его пространственных и поляризационных характеристик [20, 21]. До настоящего времени основное внимание было сосредоточено на изучении собственно опаловых матриц как трехмерных фотонных кристаллов (материалов с фотонными запрещенными зонами) [22, 23], однако проведенные исследования, в частности, показали, что на базе опаловых структур могут быть разработаны новые типы лазеров и оптических усилителей [24]. Эти особенности хорошо отслеживаются на образцах опаловых матриц с различными наполнителями (рис. 21). В соответствии с периодической структурой "прогибы", появляющиеся на спектре пропускания, зависят от периода решетки и показателя преломления  $n$  на границе кластер/пустота (рис. 21). Появление запрещенной зоны определяется перераспределением плотности фотонных состояний и может быть классифицировано как феномен фотонной псевдозоны. С увеличением индекса отражения пустот относительно сфер спектральный пик запрещенной зоны смещается линейно в длинноволновую область (рис. 21). Положение спектральных полос также хорошо согласуется с теорией мультиплетного рассеяния волн, использующей квазикристаллическое приближение [3].

Фотонная псевдозапрещенная неполная зона проявляется, когда падающий свет поглощается в фотонном кристалле. На рис. 22 представлен пик угловой зависимости в спектре флюoresценции органических молекул в случае, когда спектр испускания частично перекрывает спектральную запрещенную зону. При определенных условиях наблюдается медленное уменьшение интенсивности флюores-

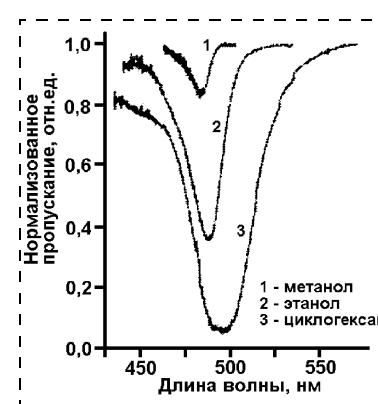


Рис. 21. Спектры оптического пропускания образцов опаловой матрицы с различным заполнением межсферических пустот: метанолом (1),  $n = 1,328$ ; этанолом (2),  $n = 1,361$  и циклогексаном (3),  $n = 1,426$

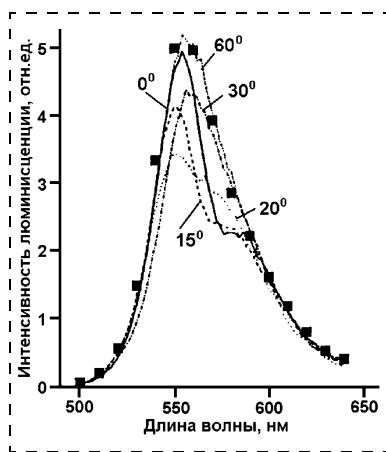


Рис. 22. Спектры люминесценции молекул красителя (родамин 6G), введенного опаловую матрицу. Представленные спектры соответствуют различным углам наблюдения ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ). Квадратиками обозначен спектр излучения того же самого красителя, введенного в образец с запрещенной фотонной зоной, локализованной вне области люминесценции

ценции (до 1,5 раз), что экспериментально свидетельствует об эффекте снижения фотонной плотности состояний при спонтанной эмиссии.

В работе [25] сообщается о предварительных результатах по исследованиям возможности создания источников и усилителей оптического излучения на основе опаловых матриц в наиболее интересной для средств оптической связи области 1,55 мкм. Проведено сравнительное исследование фотoluminesценции различных систем на основе теллуритных стекол, легированных ионами  $\text{Er}^{3+}$ . Подобные стекла рассматриваются в настоящее время как перспективные среды для волоконной и интегральной оптики [26]. В качестве подложек использовались плавленый кварц марки КВ-10 и матрицы искусственного опала, представляющие собой коллоидный кристалл, состоящий из наносфер оксида кремния. Матрицы опала получали из монодисперсного золя оксида кремния в виде наносфер диаметром около 250 нм методом седimentации с последующим гидротермальным отжигом. Типичный вид поверхности опаловой матрицы представлен на рис. 23. Формирование образцов стекла на подложке и в матрице и их диагностика проводились в идентичных условиях.

Системы на основе теллуритного стекла были сформированы ВЧ магнетронным реактивным распылением холоднопрессованных мишеней состава 70 вес. %  $\text{TeO}_2$ , 20 вес. %  $\text{WO}_3$ , 6 вес. %  $\text{La}_2\text{O}_3$

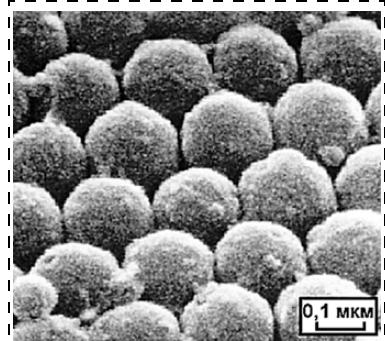


Рис. 23. Изображение, полученное на растром электронном микроскопе, фрагмента поверхности опаловой матрицы ( $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ ) — подложки для распыления Ег

и 4 вес. %  $\text{Er}_2\text{O}_3$  в атмосфере газовой смеси аргон—кислород (20 ат. %) [27, 28]. Давление газовой смеси составляло  $2 \cdot 10^{-1}$  Па, мощность ВЧ разряда  $\sim 6$  Вт/см $^2$  и частота 13,56 МГц. После осаждения полученные структуры отжигались на воздухе при температуре 620 К в течение 30 мин.

Спектры фотoluminesценции исследовались при комнатной температуре. Возбуждение осуществлялось с помощью полупроводникового лазера на длине волны  $\lambda = 980$  нм излучением мощностью  $\sim 1$  Вт. Сфокусированный лазерный пучок падал на образец под углом  $60^\circ$ ; при этом диаметр пятна составлял 400 мкм. Излучение люминесценции собиралось конденсором на щель монохроматора МДР-23. Регистрация осуществлялась неохлаждаемым германиевым приемником DPD 2000 (DILAS Co.), расположенным на выходе монохроматора. Для защиты от излучения накачки использовался кремниевый фильтр. Измерения проводились в режиме синхронного детектирования с частотой модуляции 30 Гц, сбор и обработка результатов осуществлялись с использованием персонального компьютера.

Полученные результаты представлены на рис. 24.

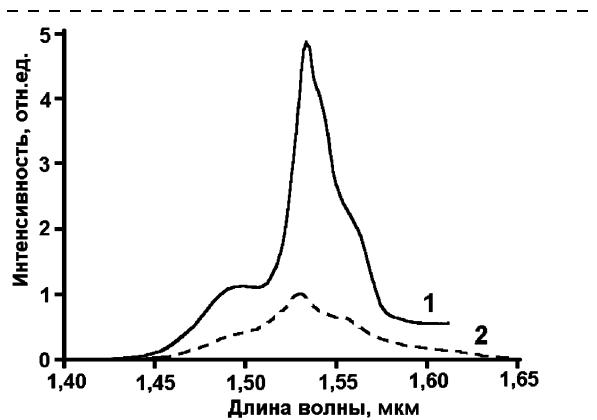


Рис. 24. Спектры фотoluminesценции теллуритного стекла, легированного ионами  $\text{Er}^{3+}$ : 1 — введенного в матрицу опала; 2 — введенного на подложку из плавленого кварца

Видно, что в образцах на основе опаловых матриц наблюдается существенное увеличение интегрального выхода фотoluminesценции. Возможными причинами увеличения интенсивности люминесценции в матрице опала по сравнению с образцами на кварцевой подложке могут быть значительно большая внутренняя поверхность нанокомпозита опал — теллуритное стекло и многократное рассеяние света в подобных образцах, а также модификация спонтанного испускания света веществом в условиях, когда размеры неоднородностей среды сравнимы или меньше длины волны оптического

излучения (такие, как андерсоновская локализация, эффект Парсела [21, 29, 30]). Указанные эффекты приводят к увеличению средней длины пробега фотона возбуждающего излучения в среде, к изменению времени жизни возбужденного состояния ионов эрбия, к пространственно-угловому перераспределению мощности испускаемого излучения. Подробному изучению возможных механизмов будут посвящены дальнейшие работы.

### 3.6. Соединения $A^{II}B^{VI}$ в опаловой матрице

Для заполнения опаловых матриц наночастицами CdS использовалась двухэтапная методика химических реакций [31]. На первом этапе образцы опаловой матрицы погружались в раствор  $CdSO_4$  концентрацией 0,1 М, содержащий ионы  $Cd^{2+}$ , на 10–15 мин с последующей их сушкой. На втором этапе образцы сульфизировались в растворе  $Na_2S$  при концентрации 1 М, содержащим ионы  $S^{2-}$ , в течение 3–4 мин при комнатной температуре. Образование CdS контролировалось снятием спектра КР, представленного на рис. 25. Сдвиг спектра КР при  $302\text{ cm}^{-1}$  и  $600\text{ cm}^{-1}$  близок к спектру КР кристаллов CdS. Небольшое красное смещение от  $305\text{ cm}^{-1}$  до  $302\text{ cm}^{-1}$  может быть объяснено особенностями нанокомпозита CdS — опаловая матрица. На рис. 26 показаны электронно-микроскопические снимки исходной опаловой матрицы (*а*) и заполненной наночастицами CdS (*б*). Спектры пропускания и отражения такого композита представлены на рис. 27.

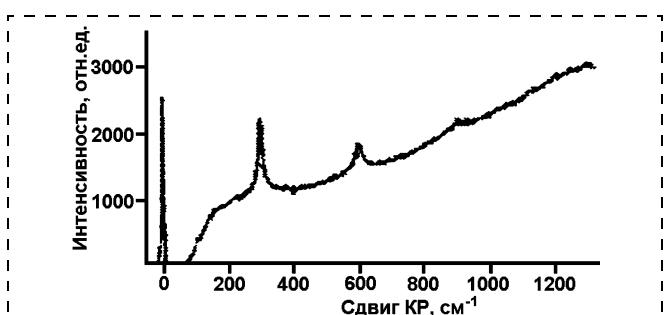


Рис. 25. Спектр КР (неполяризованный) образца опала, заполненного наночастицами CdS

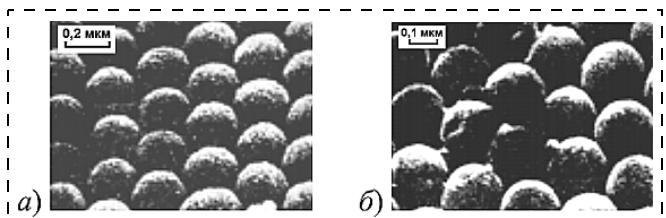


Рис. 26. Растворная электронная микроскопия; снимки сделаны под углом 40°:

*а* — опаловой матрицы; *б* — опаловой матрицы, заполненной CdS

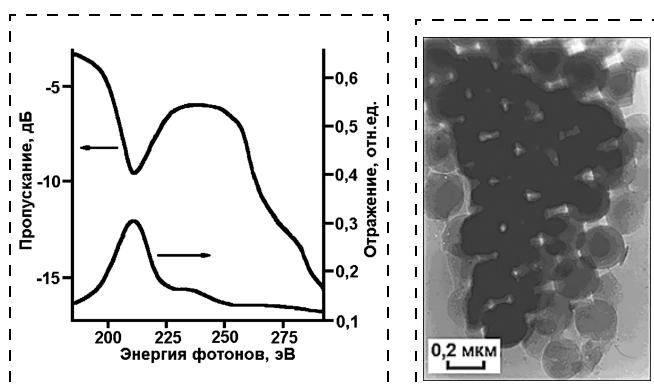


Рис. 27. Спектры оптического пропускания и отражения опаловых матриц, заполненных наночастицами CdS ( $T = 2\text{ K}$ )

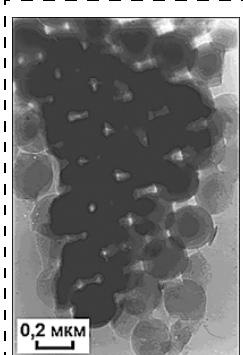


Рис. 28. Электронно-микроскопический снимок (на просвет) нанокомпозита опаловая матрица — ZnS

Аналогичным образом с применением метода газофазного синтеза были получены [32] опаловые матрицы, заполненные соединениями  $A^{II}B^{VI}$  ( $CdSe$ ,  $CdTe$  и др.).

Полупроводниковые соединения  $A^{II}B^{VI}$  и, в частности, сульфид цинка (ZnS) рассматриваются как перспективные материалы для разработки различного типа оптоэлектронных приборов для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра. В частности, большое внимание в настоящее время уделяется проблеме создания плоских дисплеев большой и сверхбольшой площади. Сульфид цинка широко используется в качестве активного элемента для разнообразных люминесцентных приборов, благодаря таким своим качествам, как широкая запрещенная зона (~3,7 эВ) и прекрасные оптические параметры (хорошее оптическое пропускание и малое рассеяние) в видимой и инфракрасной областях спектра. Использование в качестве легирующих примесей переходных и редкоземельных элементов, а также фторидов обеспечивает формирование на основе ZnS достаточно эффективных люминесцирующих сред.

Исследовалась люминесценция сульфида цинка, введенного в опаловые матрицы методом магнетронного напыления (рис. 28). Возбуждение люминесценции осуществлялось с использованием излучения азотного лазера ЛГИ-21 на длине волны  $\lambda = 337\text{ nm}$ . Средняя мощность излучения составляла ~3 мВт при длительности импульсов  $\tau = 15\text{ нс}$  и частоте повторения  $v = 25\text{ Гц}$ . Излучение фокусировалось на образец в пятно ~1 мм. Регистрация осуществлялась через световод с кварцевой сердцевиной, по которому излучение подавалось на монохроматор МДР-23. На выходе монохроматора регистрация велась фотоумножителем ФЭУ-100, при этом излучение лазерного разряда, а также рассеянное излучение отсекались спектральными

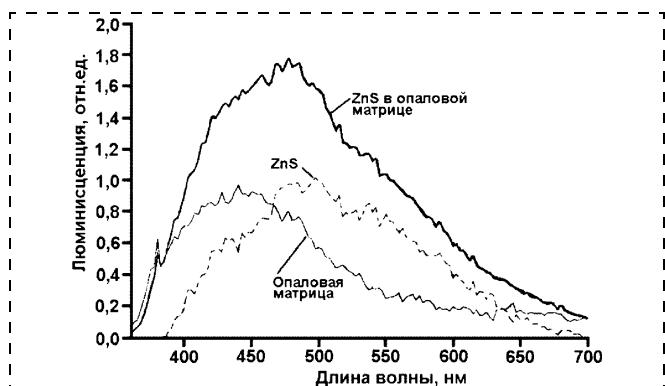


Рис. 29. Спектры фотолюминесценции нанокомпозита ZnS, введенного в опаловую матрицу

фильтрами. Поскольку в данной спектральной области наблюдается и собственно люминесценция  $\text{SiO}_2$  (в данном случае в форме опаловой матрицы), одновременно проводилась регистрация люминесценции от опорных (нелегированных ZnS) образцов опаловых матриц. Регистрируемый при этом сигнал вычитался из суммарного спектра люминесценции образцов опаловой матрицы, легированной ZnS. Полученные результаты представлены на рис. 29 (возбуждение азотным лазером,  $\lambda = 337 \text{ nm}$ ).

Таким образом, для ZnS, введенного в опаловую матрицу, наблюдается характерная голубая люминесценция, приписываемая излучательной рекомбинации между подзонами ZnS с центром на длине волны  $\lambda = 497 \text{ nm}$ . Дальнейшие исследования могут быть направлены на повышение эффективности люминесценции за счет оптимизации режимов легирования, а также на дополнительное легирование сульфида цинка различными веществами в целях получения фото- и электролюминесценции в различных спектральных интервалах, в том числе в планарныхnanoструктурах. Последнее необходимо для создания эффективных слоистых светодиодных систем.

#### Список литературы

1. Bogomolov V. N., Kurdyukov D. A. et al. Cluster lattices and thermoionic energy conversion // J. of Phys. of Low-Dimensional Struct., 1994. No. 11. p. 63–67.
2. Романов С. Г., Фокин А. В. и др. О возможности управления оптическими свойствами трехмерных "мягких" фотонных кристаллов на основе опалов // Физика твердого тела. 1996. Т. 38. Вып. 11. С. 2051–2055.
3. Богомолов В. Н., Парфеньева Л. С. и др. Влияние периодической кластерной сверхструктуры на теплопроводность аморфного кремнезема (опалов) // Физика твердого тела. 1995. Т. 37. Вып. 11. С. 3411–3418.
4. Tsunekawa S., Barnakov Yu. A. et al. Characterization of precious opals: AFM and SEM observation photonic band gap, and incorporation of CdS nanoparticles // Microporous materials. 1997. No. 8. P. 277–281.
5. Bogomolov V. N., Gaponenko S. V. et al. Photonic band gap phenomenon and optical properties of artificial opals // Phys. Rev. 1997. V. 5. No. 6. P. 7619–7625.
6. Kozhevnikov V. F., Diwekar M. et al. Fabrication and properties of gallium metallic photonic crystals // Physica B. 2003. V. 338. P. 159–164.
7. Chan M., Muldets N., Reppy J. // Physics Today. 1996. V. 28. P. 30.
8. Charnaya E. V., Tien C. et al. // J. Phys. Condens. Matter. 1998. V. 10. P. 7273.
9. Богомолов В. Н., Ктиторов С. А. и др. Нелинейная проводимость трехмерной решетки кластеров GaAs в опале // Журнал экспериментальной и теоретической физики (письма). 1995. Т. 61. Вып. 9. С. 753.
10. Davydov V. Yu., Golubev V. G. et al. Fabrication and structural studies of "opal-III nitrides" nanocomposites // Nanostructures: Phys. and Technol., Abstr. of 8<sup>th</sup> Intern. Symp., St. Peter., Russia, 2000.
11. Davydov Yu., Golubev V. G. et al. Fabrication and characterisation of group III nitrides — artificial opal nanocomposites // Proc. 25<sup>th</sup> Intern. Conf. on the Phys. of Semicond., Osaka, Japan, 2000.
12. Astratov V. N., Bogomolov V. N. et al. Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores: Quantum confinement and photonic band gap effects // Conf. Paper. 11 Nuovo Cimento, Italy. 1995.
13. Busch K., John S. Photonic band gap formation in certain self-organizing systems // Phys. Rev. E. 1998. V. 58. No. 3. P. 3896.
14. Zakhidov A. A., Baughman R. H. et al. Carbon Structures with Three-Dimensional Periodicity at Optical Wavelengths // Science. 1998. V. 282. P. 897–901.
15. Nemanich R. J., Glass J. T. et al. Raman scattering characterization of carbon bonding in diamond and diamondlike thin films // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. V. 6. P. 1783.
16. <http://www.nanotechweb.org/> Opals bring good fortune to nanotube researchers. 17 March 2003.
17. Bogomolov V. N., Gaponenko S. V. et al. Photonic band gap in the visible range in a three-dimensional solid state lattice // Appl. Phys. 1996. V. 63. P. 613.
18. Gaponenko S. V., Bogomolov V. N. et al. Spontaneous Emission of Dye Molecules, Semiconductor Nanocrystals, and Rare-Earth Ions in Opal-Based Photonic Crystals // J. lightwave Technol. 1999. V. 17. No. 11. P. 2128.
19. Golubev V. G., Davydov V. Yu. et al. Phase transition — governed opal — VO<sub>2</sub> photonic crystal // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. No. 14. P. 2127–2129.
20. Богомолов В. Н., Павлова Т. М. Трехмерные кластерные решетки // ФТП. 1995. Т. 29. С. 826–841.
21. Shubin V. A., Kim W. et al. Surface-Plasmon-Enhanced Radiation Effects in Confined Photonic Systems // J. Lightwave Technol. 1999. V. 17. P. 2183–2190.
22. Bogomolov V. N., Gaponenko S. V. et al. Photonic band gap phenomenon and optical properties of artificial opals // Phys. Rev. E. 1997. V. 55. P. 7619–7625.
23. Romanov S. G., Fokin A. V. et al. Opal-based composites as photonic crystals // IEE Proc. — Optoelectron. 2000. V. 147. P. 138–144.
24. Frolov S. V., Vardeny Z. V. et al. Laser-like emission in opal photonic crystals // Opt. Commun. 1999. V. 162. P. 241–246.
25. Гурынов А. В., Самойлович М. И. и др. Особенности фотодиодной люминесценции нанокомпозита опал — теллурическое стекло — Er<sup>3+</sup> // ЖПС. 2003. Т. 70. № 2. С. 285–287.
26. Wang J. S., Vogel E. M. et al. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices // Opt. Mater. 1994. V. 3. P. 187–203.
27. Gorshkov O. N., Grishin I. A. et al. // In: "Extended abstracts of the XIIIth International Symposium on non-Oxide Glasses and New Optical glasses", Pardubice. 2002. P. 545–548.
28. Gorshkov O. N., Grishin I. A. et al. // In: "Proceedings of International Symposium on Photo- and Electro luminescence of rare-earth elements in semiconductors and dielectrics", St. Petersburg. 2001. P. 17.
29. Petrov E. P., Bogomolov V. N. et al. Spontaneus emission of organic molecules embedded in a photonic crystal // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 77–80.
30. Гапоненко Н. В., Молчан И. С. и др. Спонтанная эмиссия органических молекул, введенных в опаловые матрицы // ЖПС. 2003. Т. 70. С. 57–61.
31. Astratov V. N., Bogomolov V. N. et al. // Conf. Paper. 11 Nuovo Cimento. 1995. V. 17. P. 1349.
32. Astratov V. N., Bogomolov V. N. et al. Optical properties of superlattice formed by II–VI semiconductor microcrystals in opal matrix // Abstracts of Invited Lectures and Contributed papers, St. Petersburg, Russia, Internat. Symposium, 1995.

УДК 621.385.833

**И. И. Бобринецкий,  
В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
Ю. А. Чаплыгин, чл.-корр. РАН,**  
Московский государственный институт  
электронной техники (технический университет),  
e-mail:vkn@miee.ru

## ЛОГИЧЕСКИЕ КЛЮЧИ НА ОСНОВЕ ПУЧКОВ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

*Исследованы электрические характеристики логических ключей на основе полупроводниковых однослойных углеродных нанотрубок. Показана возможность интегральной реализации логической схемы на основе нанотрубок проводимости p-типа.*

Тенденция современной электроники к увеличению быстродействия и уменьшению размеров элементов стремительно приближает кремниевую промышленность к нанометровому рубежу [1]. Однако технологические проблемы, возникающие при таком подходе, не позволяют говорить о кардинальном повышении производительности выпуска схем на основе кремния. Многие ученые рассматривают как альтернативу традиционной электронике разработку технологии молекулярной электроники [2]. Использование материала углеродных нанотрубок является одним из перспективных направлений в технологии. В данной работе проводились исследования возможности формирования логических элементов на основе пучков однослойных углеродных нанотрубок. Были измерены и проанализированы основные характеристики логических элементов, реализующих функцию статического ключа.

Для создания макетов транзисторов использовалась схема из четырех золотых электродов ширины 1,5 мкм и длиной около 60 мкм, расположенных параллельно друг другу на расстоянии 1,5 мкм на изолирующей поверхности  $\text{SiO}_2$  толщиной 200 нм [3]. Роль управляющего электрода выполняла предварительно легированная кремниевая подложка. Нанотрубки высаживались на электроды из раствора изопропилового спирта.

На рис. 1 представлено семейство вольт-амперных характеристик транзистора на основе пучка однослойных углеродных нанотрубок (ОСНТ). При приложении к затвору положительного смещения сопротивление пучка увеличивается, что свидетельствует о преобладании механизма дырокной проводимости [4]. Для реализации логического элемента, работающего с линейной нагрузкой,

к транзистору последовательно был подключен внешний нагрузочный резистор сопротивлением  $R_h = 410 \text{ МОм}$ . Сток транзистора подключен к  $E_{\text{ип}}$ , в то время, как свободный контакт резистора заземлялся (рис. 2).

В отсутствии управляющего напряжения на затворе транзистора ( $U_{\text{вх}} = 0 \text{ В}$ ) транзистор находится в открытом состоянии. При этом его проводимость в рабочей точке превышает (или равна) проводимости нагрузочного резистора и значительная часть приложенного напряжения от источника падает на большем сопротивлении, что соответствует высокому потенциалу на выходе элемента. При постепенном увеличении напряжения на затворе сопротивление канала пучка нанотрубок возрастает и может стать при определенном напряжении на затворе много большим сопротивления нагрузочного. Ток через транзистор  $I_0$  минимален, и на выходе присутствует остаточный минимальный потенциал. В экспериментах было получено несколько передаточных характеристик, для различных значений напряжения питания схемы. Наилучшим коэффициентом передачи обладает схема с питанием  $E_{\text{ип}} = 4 \text{ В}$ .

Рабочие параметры логического элемента

$U_{\text{вх}}^1, \text{ В}$	$U_{\text{вых}}^1, \text{ В}$	$U_{\text{вых}}^0, \text{ В}$	$K$	$I^1, \text{ нА}$	$I^0, \text{ нА}$
2	1,9	0,4	0,75	4,6	1,0
4	1,9	0,02	0,47	4,6	0,05

В таблице представлены рабочие параметры логического элемента в случае двух значений уровня логической единицы на входе  $U_{\text{вх}}^1 = 2 \text{ В}$  и  $U_{\text{вх}}^1 = 4 \text{ В}$  при неизменном значении уровня логического нуля  $U_{\text{вых}}^0 = 0 \text{ В}$ . При напряжении  $U_{\text{вх}}^1 = 4 \text{ В}$  происходит

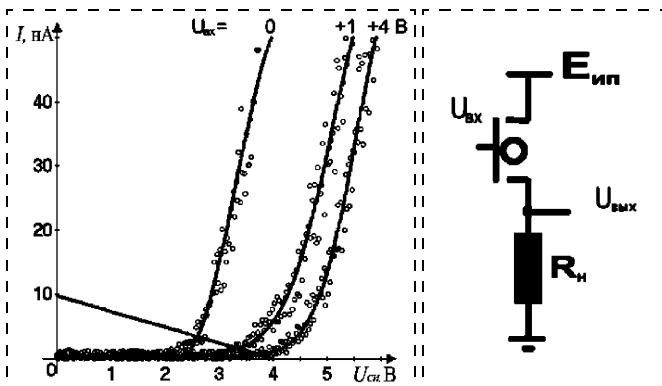


Рис. 1. Нагрузочная характеристика транзистора на ОСНТ и внешнего резистора  $R_h = 410 \text{ МОм}$

Рис. 2. Схема ключа с линейной нагрузкой на основе транзистора *p*-типа

почти полное выключение проводимости пучка нанотрубок и переход ключа на логический уровень нуля (рис. 3.), однако в открытом состоянии транзистора инвертор работает как делитель напряжения. В случае  $U_{\text{вх}}^1 = 2$  В ни в одном из логических уровней не происходит полного переключения, хотя коэффициент передачи  $K$  в этом случае выше и равен 0,75. Однако в обоих логических состояниях через элементы текут токи, что увеличивает их потребляемую мощность.

Представленный прототип логического элемента на основе пучка углеродных нанотрубок, имея коэффициент передачи, близкий к единице, не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к производству интегральных схем, так как в его состав входит внешний нагрузочный резистор. Идеальной является схема, в которой роль активных и пассивных элементов выполняли бы нанотрубки. В качестве нагрузки, реализованной на основе пучка нанотрубок, может выступать высокоомная нанотрубка металлического типа (трубка с дефектом), полупроводниковая нанотрубка проводимости *n*-типа [5–7], либо нанотрубка *p*-типа в роли нелинейной нагрузки.

Для демонстрации возможности создания логического элемента на пучках углеродных нанотрубок были исследованы переходные характеристики элемента, состоящего из последовательно соединенных пучков полупроводниковых нанотрубок с сильно и слабо выраженным свойствами *p*-типа на одном тестовом кристалле (рис. 4). Как видно из топографии, полученной в атомно-силовом микроскопе (АСМ), на электродах образовались сетки, состоящие из нескольких последовательно и параллельно соединенных пучков площадью примерно 6 мкм<sup>2</sup> [8]. Различие в электрических характе-

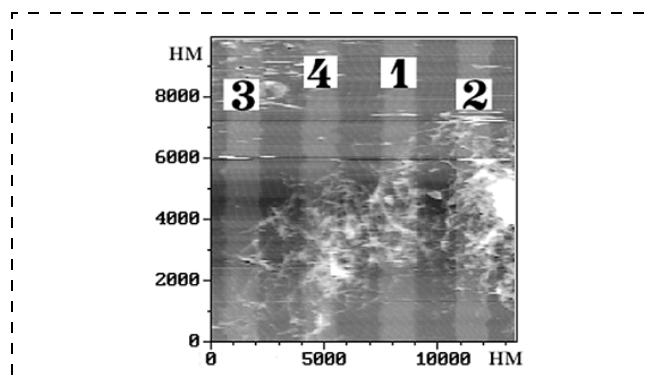


Рис. 4. АСМ изображение золотых электродов с пучками углеродных нанотрубок

ристиках данных сеток может объясняться присутствием в пучках нанотрубок с различной шириной запрещенной зоны. На рис. 5 представлена схема соединения ключа с нелинейной нагрузкой, где  $T_2$  соответствует транзистору с меньшим откликом на управляющий потенциал. Выходные характеристики транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  на основе сеток нанотрубок, расположенных между электродами 3–4 и 1–4 соответственно, представлены на рис. 6.

Управляющее напряжение, при котором происходит значительное переключение канала проводимости, равно 15 В при работе в режиме отрицательной логики. Однако вследствие большого различия в сопротивлении каналов проводимости транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ , рабочие напряжения не могут превышать 1 В. При потенциале затвора  $U_{\text{вх}} = 0$  В проводимость транзистора  $T_2$  нелинейна в области на участке от 0 до 1 В. Повышение напряжения приводит к увеличению дифференциальной проводимости канала.

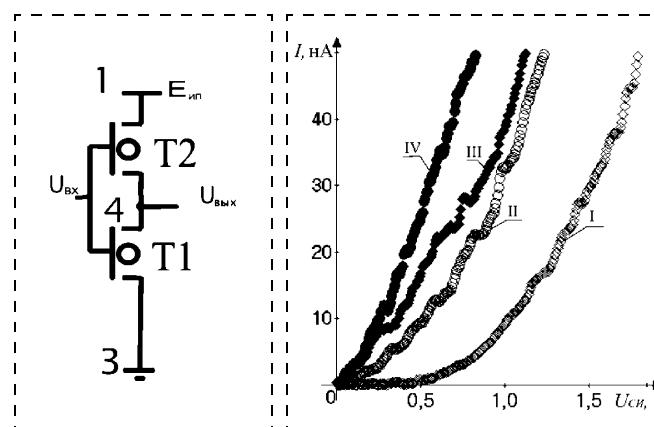


Рис. 5. Схема ключа с нелинейной нагрузкой на основе транзисторов  $p$ -типа (I — для  $U_{\text{вх}} = 0$  В и III — для  $U_{\text{вх}} = -15$  В) и  $T_2$  (II — для  $U_{\text{вх}} = 0$  В и IV — для  $U_{\text{вх}} = -15$  В).

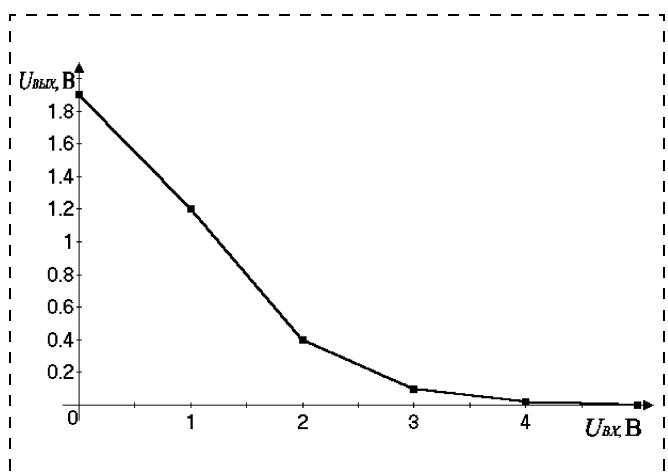


Рис. 3. Передаточная характеристика ключа на основе пучка ОСНТ с линейной нагрузкой

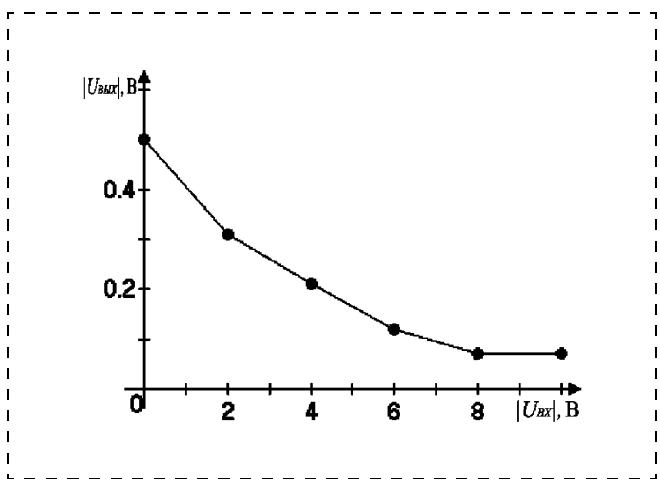


Рис. 7. Передаточная характеристика ключа на основе пучка ОСНТ с нелинейной нагрузкой

На рис. 7 приведена передаточная характеристика ключа при напряжении питания  $E_{\text{ип}} = -0,5$  В. При потенциале на затворе 0 В транзистор  $T1$  выключен и все напряжение питания падает на нем. На выходе имеем максимальный по уровню сигнал 0,5 В. При понижении напряжения проводимость транзистора  $T1$  увеличивается быстрее проводимости транзистора  $T2$  и при потенциале  $U_3 = -10$  В их проводимости практически сравниваются. На выходе наблюдается минимальное по модулю напряжение, равное 0,2 В.

Данный элемент по схеме подключения является аналогом ключа с нелинейной нагрузкой в кремниевой технологии. Однако схема реализации второго отпирающегося потенциала на нагрузочный транзистор в данном примере представлена в виде транзистора с отличающейся выходной характеристикой. Полученный таким образом логический элемент, хотя и демонстрирует возможность создания интегральной схемы на основе пучков углеродных нанотрубок, но обладает чрезвычайно низким коэффициентом усиления  $K = 0,05$ , что не позволяет его использовать в более сложных схемах без предварительного усиления.

Таким образом, был реализован логический элемент "НЕ" на основе пучка углеродных нанотрубок с линейной нагрузкой. Была продемонстрирована возможность создания работающего элемента ключа на основе сеток пучков нанотрубок. Отличительной особенностью данного элемента является реализация его на основе нанотрубок одного типа проводимости, по аналогии с ключом с нелинейной нагрузкой.

*Авторы выражают признательность А. Н. Булатову за помощь, оказанную при проведении экспериментов, и А. А. Строганову за обсуждение результатов.*

#### Список литературы

1. Chau R., Boyanov B., Doyle B. et al. Silicon nano-transistors for logic applications // Physica E, Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2003. V. 19, Iss. 1–2. P. 1–5.
2. Joachim C., Gimzewski J. K., Aviram A. Electronics using hybrid-molecular and mono-molecular devices // Nature. 2000. V. 408. N. 6812. P. 541–548.
3. Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Петрик В. И., Чаплыгин Ю. А. Вольтамперные характеристики двухэлектродных элементов с углеродными нанотрубками // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 2. С. 102–104.
4. Tans S. J., Verschueren A. R. M., Dekker C. Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube // Nature. 1998. V. 393. P. 49–51.
5. Bachtold A., Hadley P., Nakanishi T., Dekker C. Logic circuits with carbon nanotube transistors // Science. 2001. V. 249. P. 1317–1320.
6. Derycke V., Martel R., Appenzeller J., Avouris Ph. Carbon nanotube inter- and intramolecular logic gates // Nano Lett. 2001. V. 1. N. 9. P. 453–456.
7. Liu X., Lee Ch., Zhou Ch., Han J. Carbon nanotube field-effect inverters // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. N 20. P. 3329–3331.
8. Бобринецкий И. И., Строганов А. А. Атомная структура и электрические свойства пучков однослойных углеродных нанотрубок // Тезисы докладов V Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Санкт-Петербург. 2003. С. 89.
9. Минаев В. В., Неволин В. К., Петрик В. И. Нанотрубки из углеродной смеси высокой реакционной способности // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 41–42.
10. Бобринецкий И. И., Неволин В. К. Микромеханика углеродных нанотрубок на подложках // Микросистемная техника. 2002. № 4. С. 20–21.

УДК 621.382.049.077.001.576(06)

**Н. Н. Балан**, ООО "Ангстрем — центр Нанотех",  
г. Москва

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ MEMS-NEMS-СТРУКТУР ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ

*Описывается способ повышения чувствительности голограмических измерений параметров MEMS-NEMS-структур путем использования интерференции высших гармоник, дифрагированных нелинейной голограммой. Приводится схема экспериментальной установки. Обсуждается метод измерения модуля Юнга материала с помощью электростатически нагружаемых тестовых структур балочного типа.*

### Введение

Широкое использование полупроводников в качестве материала чувствительных элементов приборов позволяет создавать датчики и исполнительные механизмы (приводы), характеризующиеся целым рядом преимуществ: высокой точностью и быстродействием, возможностью работы в большом диапазоне температур, высокой технологичностью и миниатюрностью. Уже сравнительно давно (см., например, [1]) полупроводниковые датчики нашли широкое применение для измерения самых разнообразных физических величин. Большое распространение получила технология MEMS (MEMS — MicroElectroMechanical Systems), позволяющая создавать сложные микросистемы, включающие в себя как электронные, так и механические компоненты в едином технологическом процессе [2, 3]. В последнее время в литературе часто встречаются сообщения о разработках в области NEMS-технологий (NEMS — NanoElectroMechanical Systems) [4]. Под NEMS-устройствами понимаются микросистемы, произведенные по MEMS-технологии и содержащие в себе элементы нанометрового размера. К ним, в частности, относятся микромеханические датчики с использованием туннельного эффекта [5—8]. Упругие чувствительные элементы таких устройств изготавливаются, как правило, на основе поликремниевых пленок и могут иметь различные размеры и геометрию в зависимости от требований, предъявляемых к конкретному изделию.

Поскольку механические константы материалов, используемых в создаваемых по этой техноло-

гии устройствах, тесно связаны с проводящими при изготовлении технологическими процессами [9—12], возникает необходимость их экспериментального определения. В литературе описан ряд методик, позволяющих решать эти задачи [13—17]. Однако они обладают рядом недостатков, таких как низкая функциональность или сложность технической реализации.

Имеется также потребность в разработке методов контроля параметров опытных образцов MEMS- и NEMS-изделий, создании установок, позволяющих бесконтактно измерять микросмещения диффузно отражающих объектов с точностью до десятков нанометров. Использование как классической, так и голограмической интерферометрии для бесконтактного контроля чувствительных элементов кремниевых датчиков описано в работах [18—21]. Однако чувствительность измерения смещений этими методами ограничивается порядком длины волны  $\lambda$  используемого излучения (для гелий-неонового лазера  $\lambda = 0,63$  мкм), что явно недостаточно для применения их для MEMS-NEMS-структур.

В работе [22] описан способ повышения чувствительности голограмических измерений смещений диффузно отражающих объектов, основанный на использовании интерференции высших гармоник, дифрагированных нелинейной голограммой. Его применение позволяет существенно улучшить метод бесконтактного измерения параметров микромеханических структур, изложенный автором в [23].

Целью данной статьи является анализ возможности использования метода голограмической интерферометрии повышенной чувствительности, основанного на нелинейных эффектах, в задачах прецизионного измерения смещений MEMS-NEMS-структур. После измерения смещений специальных тестовых объектов под действием заданных нагрузок можно рассчитать значения упругих констант материала [22], необходимые для успешного моделирования микромеханических изделий на основе "подвижного кремния" [24]. Предлагается использовать названный метод при измерении упругих констант материалов, применяемых для изготовления чувствительного элемента туннельного датчика [8].

### Метод определения упругих констант MEMS-материалов с использованием электростатически нагружаемых тестовых структур

В задачах определения упругих констант материалов, используемых в микромеханических устройствах, нашли применение весьма разнообразные методики [13—17]. Однако суть их сводится к изготовлению специальных тестовых структур и последую-

щему их испытанию. Как правило, в справочной литературе наряду со значением какой-либо константы материала указывается способ ее измерения [25]. Это связано с тем, что измеренные разными методами параметры могут отличаться друг от друга в зависимости от размера тестовой структуры, способа, направления и амплитуды ее отклонения. Кроме того, каждый метод имеет свою предельную точность.

Поэтому необходимо, чтобы амплитуды возбуждения, а также размеры для тестовых структур и элементов разрабатываемых MEMS-устройств были, по меньшей мере, одного порядка величины. Так, например, чувствительный элемент туннельного датчика представляет собой металлизированную поликремниевую мемброну, под которой расположены отклоняющий электрод и электрод-“игла” (рис. 1) [24]. Расстояние между мембраной и отклоняющим электродом составляет несколько микрометров. Следовательно, в качестве тестовых структур для определения упругих констант материала сенсора целесообразно использовать изготовленные в том же технологическом процессе мембранны, консольные балки или балки, закрепленные с двух сторон. При использовании метода голограммической интерферометрии повышенной чувствительности возможно с точностью до  $\lambda/16$  зарегистрировать их непосредственный прогиб под действием известной нагрузки — электростатического притяжения, вызванного подачей постоянной разности потенциалов  $U$  между проводящим нижним слоем балки или мембранны и расположенным под ней отклоняющим электродом и, следовательно, определить упругие константы материала.

Уравнение прогиба консольной балки под действием постоянной нагрузки имеет вид [26]

$$\Delta z(X) = \frac{p_0}{24EI} X^2 (6l^2 - 4lX + X^2), \quad (1)$$

где  $l$  — длина балки;  $p_0$  — постоянная нагрузка;  $E$  — модуль Юнга;  $I$  — момент инерции балки;  $X$  — координата вдоль длины балки.

Если между слоем металлизации балки и отклоняющим электродом приложить разность потен-

циалов  $U$ , то начальная интенсивность нагружения балки определится по формуле

$$p_0 = \varepsilon_0 U^2 / (2d^2), \quad (2)$$

где  $d$  — начальное расстояние между обкладками;  $U$  — приложенная разность потенциалов;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость свободного пространства.

При малых напряжениях амплитуда отклонения приблизительно пропорциональна квадрату напряжения. Эксперимент и подробные расчеты показали, что как только конец балки переместится приблизительно на треть своего пути в направлении отклоняющего электрода, положение балки станет неустойчивым, и она самопроизвольно переместится на остальное расстояние в результате быстрого возрастания электростатических сил на ее конце. Этот эффект для золоченой балки транзистора с резонансным затвором проанализирован в работах [27, 28]. Можно показать, что для консольной балки пороговое напряжение самопроизвольного отклонения приблизительно равно

$$U_p = \sqrt{\frac{3Et^3d^3}{10\varepsilon_0 l^4}}, \quad (3)$$

где  $t$  — толщина балки. В точности такое же явление наблюдается и в случае электростатического нагружения мембран.

Этим объясняется необходимость применения прецизионных методик измерения механических смещений. С помощью метода голограммической интерферометрии повышенной чувствительности, основанного на интерференции высших гармоник, дифрагированных нелинейной голограммой, возможно весьма точное измерение прогибов тестовых MEMS-структур под действием электростатических напряжений, много меньших порогового.

Следует также отметить, модуль Юнга материала можно приближенно определить, измеряя пороговое напряжение [17]. В частности, при использовании в качестве тестовой структуры консольной балки для этого можно применить формулу (3), из которой модуль Юнга легко определяется.

## Инструментарий

Предлагаемая к применению методика состоит из трех стадий. Первая из них заключается в регистрации двукратно экспонированной голограммы тестовой структуры с помощью внеосевой голограммической схемы, причем угол падения предметного пучка на объект исследования различен для первой и второй экспозиций. Вторая стадия состоит в фотографировании восстановленного изображения на второй пластине. Это изображение содержит

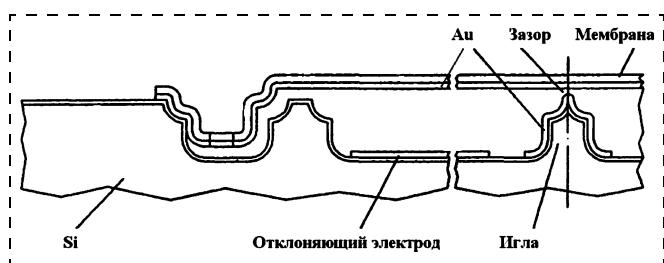


Рис. 1. Чувствительный элемент интегрального туннельного датчика

жит интерференционные полосы, возникающие как из-за деформации структуры, так и из-за перемены угла падения предметного пучка. После проведения процесса нелинейного проявления пластины она превращается в модулированную дифракционную решетку и ее можно рассматривать как нелинейную голограмму. На третьей стадии полученная таким образом решетка освещается двумя плоскими волнами и с помощью диафрагмы выбираются лишь сопряженные высшие гармоники, которые и интерфирируют. По полученной интерферограмме можно с повышенной точностью определить смещение тестовых структур.

Схема экспериментальной установки, предназначенной для определения микросмещений тестовых объектов, приведена на рис. 2. Свет от гелий-неонового лазера  $ЛГ$  делится на предметный и опорный пучки посредством делителя  $Д$ , зеркала  $31$  и расширительных систем  $P1$  и  $P2$ . С помощью зеркала  $32$  опорный пучок подается на фотопластинку  $ПГ1$ . Предметный пучок попадает на тестовый объект посредством полупрозрачного зеркала  $34$  и зеркала  $33$ , которое может поворачиваться для обеспечения перемены угла падения предметного пучка на тестовый объект между первой и второй экспозициями. Рассеянное тестовым объектом излучение, пройдя через микрообъектив  $МО$ , попадает на фотопластинку  $ПГ1$ . Возмущение амплитуды диффузно отраженного пучка в точке  $(x, y)$  плоскости объекта во время первой экспозиции описывается следующим образом:

$$U_1(x, y) = U_0(x, y) \exp[ik\phi(x, y)], \quad (4)$$

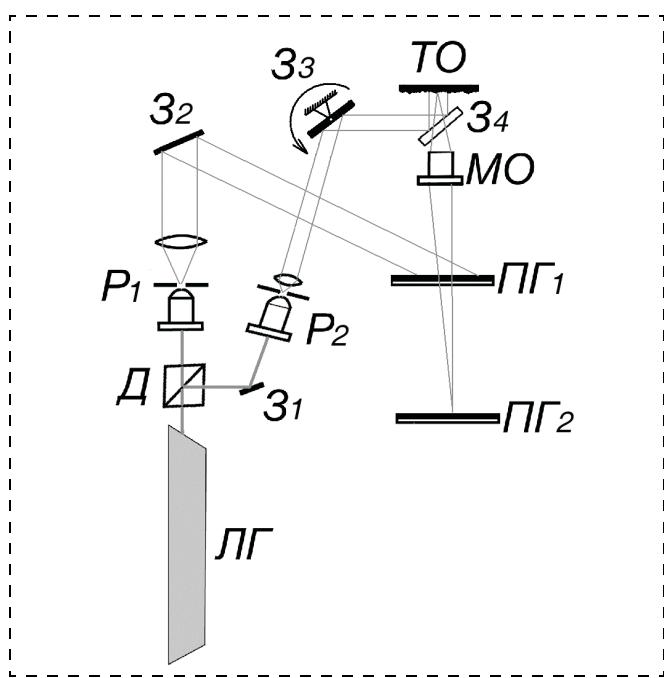


Рис. 2. Схема записи голограмм

где  $U_0(x, y)$  — абсолютная амплитуда;  $\phi(x, y)$  — профиль пучка, отраженного от объекта и содержащего микроскопические колебания высоты;  $k = 2\pi/\lambda$ .

Затем осуществляется деформация объекта и зеркало  $33$  поворачивается таким образом, что пучок падает под небольшим углом  $\alpha$  с направлением падения во время первой экспозиции. И возмущение амплитуды в плоскости объекта во время второй экспозиции можно записать следующим образом:

$$U_2(x, y) = U_0(x, y) \exp[ik(\phi(x, y) + \psi(x, y) + x \sin \alpha)], \quad (5)$$

где  $\psi(x, y)$  — сдвиг по фазе, обусловленный деформацией объекта. Падение предметного пучка на объект во время первой экспозиции предполагается нормальным. После экспонирования и проявления фотопластины  $ПГ1$  вновь устанавливается на прежнее место и освещается опорной волной. Амплитуды дифрагированных полученной голограммой волн пропорциональны амплитудам пучков, диффузно отраженных объектом во время первой и второй экспозиций и прошедших через микрообъектив  $МО$ .

На фотопластинке  $ПГ2$  формируется изображение полученной интерферограммы (в частности, если измеряется прогиб пластины или мембранны, интерференционные полосы будут локализованы в плоскости объекта и на пластине  $ПГ2$  сформируется изображение объекта, промодулированное интерференционными полосами).

Освещенность пластины  $ПГ2$  составит

$$I_{ПГ2} = a \left| \frac{1}{M} U_1(Mx, My) + \frac{1}{M} U_2(Mx, My) \right|^2. \quad (6)$$

Здесь  $a$  — постоянная величина;  $M$  — увеличение микрообъектива  $МО$ . После замены переменных  $\xi = Mx$ ;  $\eta = My$ ;  $b = 2a/M^2$  получим

$$I_{ПГ2} = b |U_0(\xi, \eta)|^2 \{1 + \cos k(\psi(\xi, \eta) + \xi \sin \alpha)\}. \quad (7)$$

Подобная картина интенсивности могла бы возникнуть при интерференции двух волн, одна из которых проходит через воображаемый фазовый объект со сдвигом по фазе  $\psi(\xi, \eta)$ , а другая представляет собой плоскую волну.

Если проявление фотопластины  $ПГ2$  выполнено нелинейным способом, то ее амплитудное пропускание после проявления можно описать выражением

$$T(\xi, \eta) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m \exp imk\{\psi(\xi, \eta) + \xi \sin \alpha\}. \quad (8)$$

Здесь  $C_m$  представляет собой абсолютное амплитудное пропускание дифрагированной волны  $m$ -го порядка.

Из последнего выражения следует, что пластина  $ПГ2$  может рассматриваться в качестве нелинейной

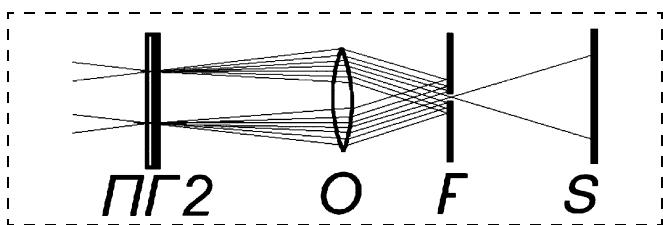


Рис. 3. Схема получения конечной интерферограммы

голограммы, несущая частота которой равна  $(\sin\alpha)/\lambda$ . Когда такая голограмма освещена плоской волной, происходит дифракция многих высших гармоник, каждая из которых имеет сдвиг по фазе  $m\psi(\xi, \eta)$ .

Пусть теперь голограмма, полученная нелинейным проявлением фотопластинки *ПГ2*, освещена двумя плоскими когерентными волнами, как показано на рис. 3. Тогда во фраунгоферовой плоскости объектива *O*, размещенного за голограммой *ПГ2*, возникают два набора спектров Фурье. При изменении направлений падающих на фотопластинку *ПГ2* волн  $\mu$ -й дифракционный порядок от одной волны может совпасть во фраунгоферовой плоскости с  $v$ -м дифракционным порядком от другой волны. С помощью фильтрующей системы (узкой диафрагмы), установленной во фраунгоферовой плоскости объектива *O*, осуществляется селекция только этих двух волн, после чего они интерферируют. Следовательно, распределение интенсивности *I* в выходной плоскости *S* имеет вид

$$I_{\text{вых}} = d + e \cos(k(\mu + v)\psi(x_{\text{вых}}, y_{\text{вых}})), \quad (9)$$

где *d*, *e* — константы, определяемые по абсолютным амплитудам  $\mu$ -го и  $v$ -го порядков дифракции и увеличению объектива *O*. Последнее уравнение

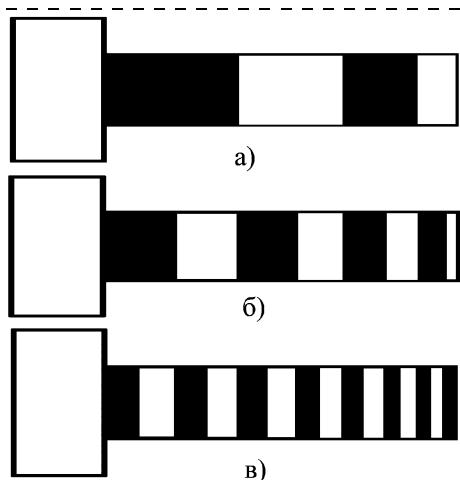


Рис. 4. Характерные интерферограммы, возникающие при прогибе консольной балки (прогиб одинаков для всех интерферограмм):

*a* — случай использования традиционной голографической интерферометрии; *b* — измерение по описанной методике,  $\mu = 2$ ,  $v = 2$ ; *c* — измерение по описанной методике,  $\mu = 4$ ,  $v = 4$

показывает, что сдвиг по фазе  $\psi(x, y)$ , обусловленный деформацией объекта, усилен и чувствительность повышена в  $(\mu + v)$  раз по сравнению с обычной голографической интерферометрией. На рис. 4 схематически изображены выходные интерферограммы, получаемые в случае измерения прогиба тестовой структуры — консольной балки — описанным способом при разных значениях  $\mu$  и  $v$  в сравнении с интерферограммой, соответствующей случаю использования традиционной голографической интерферометрии.

### Заключение

Кратко сформулируем основные результаты работы. Предложен способ определения упругих констант MEMS-материалов. Для его успешного осуществления необходимы методы прецизионного измерения смещений электростатически нагружаемых тестовых структур. Применение голографических методик, основанных на интерференции дифрагированных нелинейной голограммой гармоник высших порядков, позволяет повысить точность измерения смещений диффузно отражающих микрообъектов в  $(\mu + v)$  раз по сравнению с обычными голографическими методами ( $\mu$  и  $v$  — номера интерферирующих гармоник). При интерференции гармоник 4-го порядка возможно измерение смещений с точностью до  $\lambda/16$  ( $\lambda$  — длина волны используемого излучения).

Достоинствами предложенной методики являются сравнительная простота и многофункциональность. Она может быть также применена для бесконтактного контроля опытных образцов микромеханических изделий. Исследования показывают целесообразность применения описанных методов в задачах измерения и контроля параметров MEMS-NEMS-структур.

В настоящее время закончена отладка экспериментальной установки. Результаты экспериментов автор планирует изложить отдельно.

### Список литературы

1. Petersen K. E. Silicon as a mechanical material // Proc. IEEE. May 1982. 70(5). P. 420—457.
2. Jerman H., Terry S. Sensors and Actuators / Ed. by P. Rai-Choudhury // Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication. Vol. 2: Micromachining and Microfabrication, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1997. 379 p.
3. Fedder G. Integrated MEMS in Conventional CMOS // Proc. of the NSF/ASME Workshop on Tribology Issues and Opportunities in MEMS, Kluwer Academic Publishers, November, 1997.
4. Lal A. Application of Micromachining to nanotechnology / Ed. by H. S. Nalwa // Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology. Vol. 1: Synthesis and Processing, New York: Academic Press, 2000. 579 p.
5. Kenny T. W., Kaiser W. J., Waltman S. B., Reynolds J. K. Novel Infrared Detector Based on a Tunneling Displacement Transducer // Applied Physics Letters, 1991. Vol. 59(15). N 7.
6. Rockstad H. K., Kenny T. W., Kelly P. J., and Gabrielson T. B. A Micro-Fabricated Electron-Tunneling Accelerometer as a Direc-

tional Acoustic Sensor // Proceedings of Acoustic Particle Velocity Sensors: Design, Performance and Applications 9/95 Published in AIP Conf. Proc. 1996.

7. Liu C. H. and Kenny T. A High-Precision, Wide-Bandwidth Micromachined Tunneling Accelerometer // Journal of microelectromechanical systems. 2001. Vol. 10. N 3.

8. Алексенко А. Г., Дшхунян В. Л. Акустические микросистемы // Научная сессия МИФИ-2002: Сб. науч. трудов. М.: МИФИ, 2002. Т. 4.

9. Wolf S., Tauber R. N. Silicon Processing for the VLSI Era. Vol. 1. Sunset Beach: Lattice Press, 1986.

10. Sze S. M. VLSI Technology McGraw-Hill, New York, 1988.

11. Vossen J. L. Thin Film Processes Academic Press, New York, 1978.

12. Maisel L. I., Glang R. Handbook of Thin Film Technology McGraw-Hill, New York, 1970.

13. TaechungYiand, Chang-Jin Kim. Measurement of mechanical properties for MEMS materials // Meas. Sci. Technol. 1999. Vol. 10. P. 706–716.

14. Herman D., Gaitan M., and DeVoe. D. MEMS Test Structures for Mechanical Characterization of VLSI Thin Films // Proc. SEM Conference, Portland Oregon, June 4–6. 2001.

15. Weihs T. P., Hong S., Bravman J. C., Nix W. D. Mechanical deflection of cantilever microbeams: A new technique for testing the mechanical properties of thin films // Journal of Materials Research. Sep/Oct 1988. Vol 3. N 5. P. 931–942.

16. Lawton R. A., Abraham M., Lawrence E. MEMS Characterization using Scanning Laser Vibrometer // SPIE 1999 Symposium on Microelectronic Manufacturing Proceedings. 1999.

17. Gupta R. K. Electrostatic pull-in test structure design for in-situ mechanical property measurements of microelectromechanical systems (MEMS) // Ph. D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA, Jun 1997.

18. Суминов В. М., Панфилова Е. Е., Смирнова Н. В. Исследование полупроводниковых чувствительных элементов различных конструкций методами лазерной интерферометрии // Автоматизация и современные технологии. 1993. № 12. С. 21–23.

19. Суминов В. М., Панфилова Е. Е., Смирнова Н. В. Исследование чувствительных элементов полупроводниковых датчиков давления методами лазерной интерферометрии // Автоматизация и современные технологии. 1994. № 1. С. 10–12.

20. Суминов В. М., Панфилова Е. Е., Смирнова Н. В. Исследование форм собственных колебаний резонирующих мембран частотных датчиков давления методами голографической интерферометрии // Авиационная промышленность. 1994. № 3–4. С. 28–31.

21. Суминов В. М., Панфилова Е. Е., Смирнова Н. В., Петрушинин Е. Ю. Исследование форм собственных колебаний дна цилиндрических резонаторов частотных датчиков давления методами голографической интерферометрии // Авиационная промышленность. 1994. № 5–6. С. 72–74.

22. Toyooka S. Holographic interferometry with increased sensitivity for diffusely reflecting objects // Applied Optics. 1977. V. 16. N 4. P. 1054–1057.

23. Балан Н. Н. Голографическая микрометрия подвижных элементов MEMS-структур // Микросистемная техника. 2003. № 12. С. 28–31.

24. Балан Н. Н. Определение упругих свойств подвижных элементов MEMS-структур // Микросистемная техника. 2004. № 2. С. 14–19.

25. <http://www.memsnet.org/material/>

26. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. Т. 1. Элементарная теория и задачи. М.: Наука, 1965.

27. Nathanson H. C., Wickstrom R. A. A resonant-gate silicon surface transistor with high-Q bandpass properties // Applied Physics Letters. 1965. Vol. 7. P. 84.

28. Nathanson H. C., Newell W. E., Wickstrom R. A., Davis J. R. The resonant-gate transistor // IEEE Trans. Electron Devices. 1967. Vol. ED-14. P. 117.

УДК 583.975+537.533

**М. В. Гришин**, канд. физ.-мат. наук,  
**Ф. И. Далидчик**, д-р физ.-мат. наук,  
**С. А. Ковалевский**, д-р физ.-мат. наук,  
**Н. Н. Колченко**, канд. физ.-мат. наук,  
**А. А. Самойленко**,  
Институт химической физики  
им. Н. Н. Семенова РАН

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛОВУШЕК В ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ\*

Описан новый метод изучения с помощью сканирующей туннельной микроскопии электронных ловушек в тонких оксидных пленках, позволяющий восстанавливать параметры их пространственных и энергетических распределений. Возможности метода продемонстрированы на примере ловушек в тонких пленках  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Физические и химические свойства тонких диэлектрических пленок, таких как  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в решающей степени определяются структурными и энергетическими характеристиками содержащихся в них дефектов. Влияние дефектов на электрофизические характеристики пленок (например, на проводимость, стойкость к диэлектрическому пробою и др.) возрастает по мере уменьшения толщины пленок. Поэтому изучение дефектов оксидного слоя особенно важно для создания МДП (металл–диэлектрик–проводник)-структур на нанометровом уровне [1, 2]. Значительна роль дефектов для гетерогенного катализа [3, 4]. Их геометрическое и электронное строение может оказывать большое влияние на характер связей молекул с поверхностью, структуру адсорбированных комплексов и их реакционную способность.

Влияние дефектов на электронные и адсорбционные свойства оксидных систем на макроскопическом уровне изучалось с использованием электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), фотоэлектронной, инфракрасной спектроскопии и электрофизическими методами [3, 4]. В последние годы локальные свойства дефектов начали исследовать методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), атомно-силовой микроскопии и баллистической электронно-эмиссионной микроскопии [5, 6]. Первые результаты СТМ исследований выявили многочисленные трудности в изучении диэлектри-

\*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, гранты № 02-03-32998 и 02-03-33367.

ческих пленок. Это, прежде всего, нестабильности туннельных токов, текущих через наноконтакт, которые могут быть обусловлены процессами перезарядки электронных ловушек, перераспределением пространственного заряда и т. д.

Как следствие, атомное разрешение тонких несовершенных диэлектрических покрытий методами СТМ обычно не достигается. Однако при определенных условиях шумовые характеристики туннельного тока могут быть использованы для определения параметров электронных ловушек. Такой подход был реализован в работе [7], где в предположении активационного механизма электронного переноса были определены параметры (энергетические уровни) некоторых ловушек. Считалось, что наблюдаемые скачкообразные изменения туннельного тока связаны с единичными актами изменения зарядового состояния электронной ловушки, находящейся в диэлектрической пленке под острием СТМ. Характерные времена опустошения и заполнения ловушек определялись при нескольких значениях приложенного напряжения по пуассоновским распределениям числа скачков в единицу времени. Принималось, что активационные барьера для перезарядки ловушки линейно зависят от приложенного напряжения. Параметры ловушки определялись по нескольким точкам на зависимости характерных времен от напряжения. Предложенная в работе [7] методика нахождения параметров ловушек по шумовым характеристикам туннельных токов, измеренных при нескольких значениях напряжения, не позволяет восстанавливать с достаточно высокой точностью зависимости вероятностей элементарных актов заполнения и опустошения ловушек от напряжения. Отметим, что обратимые с временами порядка 1–2 мин переключения проводящих свойств кластеров  $\text{Al}_2\text{O}_3$  методом СТМ были описаны в работе [8].

В настоящей статье рассматривается новый метод, позволяющий по  $I-U$  зависимостям туннельного тока СТМ определять число и свойства ловушек, управляющих транспортом электронов через диэлектрические пленки. Метод дает возможность однозначно с высокой точностью восстанавливать значения вероятностей перезарядки единичных ловушек как функций напряжения на наноконтакте. При этом удается визуализировать наномасштабные области делокализации электронов, захваченных различными ловушками.

Нами использовался коммерческий туннельный микроскоп "Omicron". Эксперименты проводились при комнатной температуре в сверхвысоковакуумной установке ( $P \sim 10^{-10}$  Торр =  $1,32 \cdot 10^{-8}$  Па).

Использовался хорошо отполированный (шероховатость менее 5 нм) монокристалл алюминия с выведенной гранью (100). Поверхность была

окислена на воздухе при комнатной температуре, затем прокалена в вакууме ( $P = 5 \cdot 10^{-5}$  Торр =  $= 6,67 \cdot 10^{-3}$  Па при  $T \approx 700$  К в течение 30 мин). Как следует из работы [9], низкотемпературное окисление Al на воздухе формирует пленку аморфного оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 1,5–2 нм. Прокаливание поверхности в вакууме приводит к десорбции адсорбированных на поверхности молекул, обычно присутствующих на образце после контакта с атмосферой.

Полученное с помощью туннельного микроскопа изображение поверхности алюминия, покрытой пленкой оксида, приведено на рис. 1. Поверхность покрыта гранулами оксида размерами от 2 до 20 нм. Аналогичные изображения были получены окислением пленки алюминия в кислородной плазме [8] и в атмосфере кислорода [10].

Наша методика изучения электрофизических свойств электронных ловушек, управляющих туннельным током через тонкие диэлектрические пленки, основана на измерении последовательности вольт-амперных характеристик в выбранной точке поверхности. При измерении  $I-U$  кривых напряжение менялось со временем линейно, с варьируемыми скоростями развертки от 0,5 до 300 В/с. Вольт-амперные зависимости обычно были нестабильными. Причины нестабильностей могут быть связаны с процессами, протекающими на игле СТМ, с шумами электроники, с дрейфом, с процессами переноса тока в диэлектрической пленке и с актами перезарядки ловушек. В наших экспериментах игла чистилась импульсами тока при приложении к игле высокого напряжения (до 10 В; потенциал иглы отрицательный относительно образца) до получения устойчивого изображения поверхности. Нестабильности тока, связанные с процессами на игле, могли приводить к резким слу-

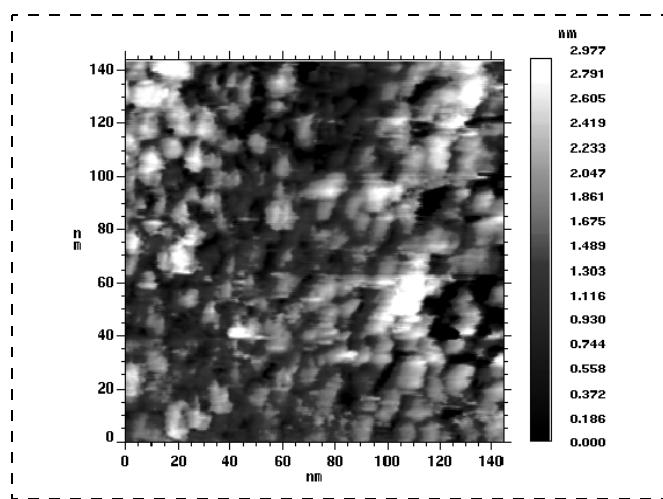


Рис. 1. Топографическое изображение поверхности алюминия, покрытой пленкой оксида:  $I = 2,2$  нА;  $U = -1,5$  В

чайным изменениям тока при  $I-U$  измерениях в точке, которые не воспроизводились при последующих сканированиях. Такие  $I-U$  кривые не учитывались. Шумы электроники в наших экспериментах не превышали 0,05 нА и не влияли на результаты измерений. Дрейф компенсировался до значений порядка 0,1 нм/мин. Это позволяло провести большую серию измерений спектров в любой выбранной точке поверхности.

Вольт-амперные характеристики, измеренные в различных точках оксида, заметно отличались по форме. Среди них можно было выделить несколько типов. Простейший тип нестабильных  $I-U$  кривых соответствует наноконтакту, туннельная проводимость которого меняется в моменты заполнения или опустошения одной электронной ловушки, находящейся в выбранном месте оксидной пленки. Спектры этого типа характеризуются достаточно хорошо выраженным "пороговыми" напряжениями, после прохождения которых возникают скачки туннельного тока между двумя ветвями  $I-U$  зависимостей. Для каждого состояния ловушки эти ветви остаются неизменными. На рис. 2, а для иллюстрации приведен пример серии  $I-U$  зависимостей, полученных в последовательности измерений в одной точке поверхности. Острое туннельного микроскопа находилось над ловушкой, которая опустошалась по мере увеличения напряжения на образце от +2 до +4 В. Скорость развертки по напряжению в этом случае составляла 100 В/с. Видно, что при увеличении напряжения на образце происходит скачкообразное увеличение туннельного тока. Моменты переходов на различных спектрах не совпадают, поскольку акты опустошения ловушек некоррелированы и носят случайный характер. Однако ветви вольт-амперных зависимостей до и после перехода полностью совпадают, причем при электронном переходе проводимость наноконтакта существенно возрастает. Отсюда следует, что в данном случае скачки туннельного тока происходят в момент опустошения электронной ловушки.

Чтобы набрать статистику переходов, нами были измерены 360 спектров для некоторой выбранной электронной ловушки. На рис. 2, б приведена гистограмма числа зарегистрированных электронных переходов за время  $\Delta t = 0,001$  мин в этой ловушке в зависимости от приложенного напряжения. Это позволило с высокой точностью определить значение вероятности опустошения как функции приложенного напряжения.

Заселенность распадающегося состояния экспоненциально зависит от времени и вероятности распада. В свою очередь, вероятность распада зависит от приложенного напряжения, т. е. для не-

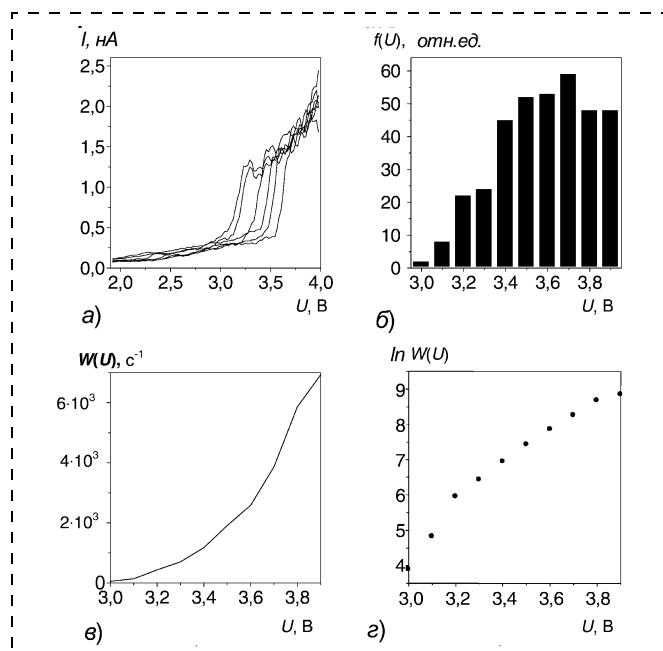


Рис. 2. Совокупность  $I-U$  зависимостей, измеренных в одной точке поверхности над электронной ловушкой (а); гистограмма числа зарегистрированных за время  $\Delta t = 0,001$  мин электронных переходов в этой ловушке от приложенного напряжения (б); зависимость вероятности опустошения ловушки от напряжения (с); зависимость  $\ln W(U)$  (д) (полученные значения смешены по оси ординат)

коррелированных переходов заселенность уровня к моменту времени  $t$  определяется выражением

$$N/N_0 = \exp\left(-\int_0^t W(U) dt\right). \quad (1)$$

Здесь  $W(U)$  — вероятность распада в единицу времени при фиксированном напряжении  $U$ , которая может быть получена из гистограммы частотного распределения  $f(U) \equiv \frac{\Delta N}{\Delta U}$ . Поскольку  $U$  или линейно зависит от  $t$ ,

$$W(U) = -\frac{d}{dU} \ln \frac{N(U)}{N_0}, \quad (2)$$

где  $N(U)$  — число переходов, приходящихся на интервал напряжений  $U(t) > U$ ;  $N_0$  — общее число спектров в распределении. Восстановленная зависимость  $W(U)$  для гистограммы, приведенной на рис. 2, б, представлена на рис. 2, в.

Если предположить, что заселение и опустошение происходит по активационному механизму, то следуя работе [7], функцию  $W(U)$  следует представить в виде

$$W(U) = W_0 \exp\left(-\frac{E_0 - \alpha e U}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $E_0$  — энергия активации перехода в отсутствии электрического поля; коэффициент  $\alpha$  определяет снижение активационного барьера при приложении напряжения  $U$ ;  $k$  — постоянная Больцмана;  $e$  — заряд электрона;  $T$  — температура. Для нулевого расстояния между острием и поверхностью оксида в пренебрежении поляризацией диэлектрической пленки коэффициент  $\alpha$  определяется отношением расстояния между поверхностью металла и ловушкой к толщине пленки. На рис. 2, г приведены зависимости  $\ln W(U)$  для рассматриваемого примера. Заметное отклонение полученной нами зависимости от линейной указывает на более сложный механизм опустошения электронных ловушек в оксиде алюминия. Распады, по-видимому, осуществляются по механизму термополевого опустошения [11].

Существование нескольких ловушек под острием СТМ, которые управляют проводимостью наноконтакта, приводит к появлению нескольких групп переходов между различными ветвями  $I-U$  зависимостей. Число этих ветвей определяется числом управляющих ловушек. Положение ветвей определяется параметрами ловушек. На рис. 3 приведены  $I-U$  зависимости, соответствующие существованию в наноконтакте по крайней мере двух электронных ловушек, опустошение которых приводит к появлению в спектрах двух групп переходов между тремя ветвями  $I-U$  зависимостей, помеченных на рисунке цифрами 1, 2, 3. Параметры ловушек могут быть определены по методике, описанной выше. Кривая 2 соответствует  $I-U$  зависимости, за время измерения которой ловушка трижды изменила свое зарядовое состояние; видна последовательность переходов, при которых ловушка опустошилась (2a), заполнилась (2б) и вновь опустошилась (2в).

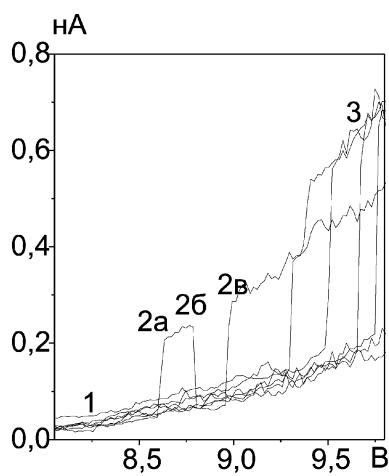


Рис. 3.  $I-U$  зависимости для двух электронных ловушек, находящихся в наноконтакте под острием СТМ

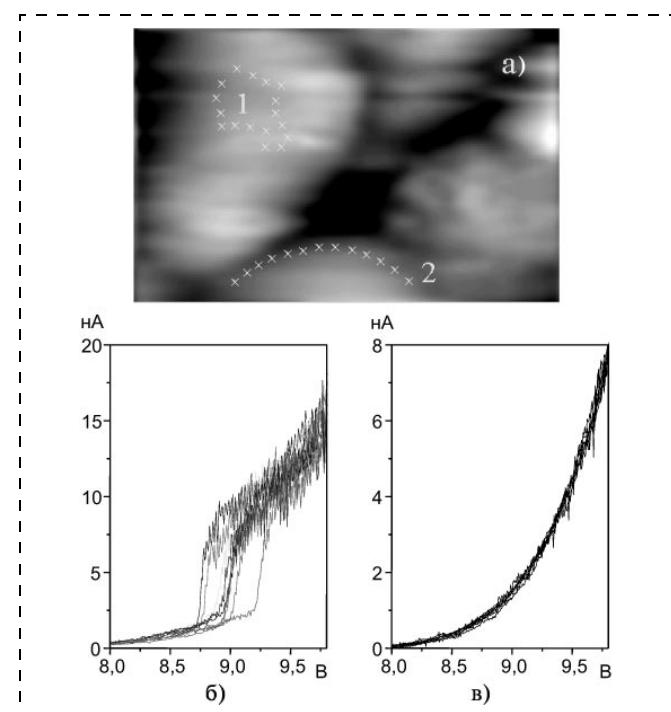


Рис. 4. Топографическое изображение алюминия, покрытого оксидом (а),  $I = 11$  нА,  $U = 10$  В, размер кадра  $18 \times 28$  нм; б — спектры, соответствующие области 1, отмеченной на топографическом изображении; в — спектры, соответствующие линии 2

Измерение спектров одновременно с получением топографических данных позволяет определить область делокализации заряда ловушек. Согласно результатам работы [6], влияние одной ловушки на туннельный ток может распространяться на расстояние порядка 3 нм. В большинстве случаев мы наблюдали однотипные  $I-U$  зависимости на расстояниях до 1,5 нм. Однако в некоторых случаях было возможно наблюдать ловушки, заряд которых был сильно делокализован. Пример такой ловушки приведен на рис. 4. В эксперименте одновременно проводились топографические измерения поверхности и измерения спектроскопических зависимостей. На топографическом изображении (рис. 4, а) видна резкая граница кластера, на которой происходило полное изменение характера  $I-U$  зависимостей — от стабильных (на границе кластера) к нестабильным (над кластером). Отмеченная область над кластером (около 8 нм в диаметре) характеризуется однотипными нестабильными  $I-U$  зависимостями, подобными тем, которые были описаны выше для одиночной электронной ловушки. Существенно, что в данном случае заряд ловушки оказывается делокализованным на расстояниях порядка размера всего кластера до 8 нм.

Полученные результаты демонстрируют возможности изучения методами СТМ и СТС свойств электронных ловушек в диэлектрических пленках с высоким пространственным разрешением. Пред-

ложенная методика обработки экспериментальных данных позволяет однозначно восстанавливать значения вероятностей опустошения электронных ловушек как функции от приложенного к контакту напряжения. Измерение последовательности спектроскопических зависимостей в одной точке поверхности дает возможность определить не только параметры ловушек, но (по числу ветвей  $I-U$  кривых) и число ловушек, управляющих туннельным током, текущим через наноконтакт СТМ. Измеренные наами для оксида алюминия значения  $W(U)$ , по-видимому, можно объяснить механизмом полевого опустошения с участием фононов [11].

#### Список литературы

1. Kolodzey J., Chowdhury E. A., Adam T. N. et al. Electrical conduction and dielectric breakdown in aluminum oxide insulators on silicon // Transactions on Electron Devices. 2000. V. 47. P. 121.
2. Watanabe H., Baba T., Ichikawa M. Scanning tunneling microscopy and spectroscope characterization of ion-beam-induced di-
- electric degradation in ultrathin  $\text{SiO}_2$  films and its thermal recovery process // Journal of Applied Physics. 1999. V. 85. P. 6704.
3. Киселев В. Ф., Крылов О. В. Адсорбционные процессы на поверхности полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1978.
4. Киселев В. Ф., Козлов С. Н., Зотеев А. В. Основы физики поверхности твердого тела. М.: Изд-во МГУ, 1999.
5. Rippard M. H., Perella A. C., Albert F. J. et al. Ultrathin aluminum oxide tunnel barriers // Physical Review Letters. 2002. V. 88. P. 46805.
6. Welland M. E., Koch R. H. Spatial location of electron trapping defects on silicon by scanning tunneling microscopy // Applied Physical Letters. 1986. V. 48. P. 724.
7. Koch R. H., Hamers R. J. Characterization of electron trapping defects on silicon by scanning tunneling microscopy // Surface Science. 1987. V. 181. P. 333.
8. Kurnosikov O., de Nooij F. C., LeClair P. et al. STM-induced reversible switching of local conductivity in thin  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films // Physical Review B. 2001. V. 64. P. 153407.
9. Fuggle J. C., Watson L. M., Fabian D. J. X-ray photoelectron studies of the reaction of clean metals (Mg, Al, Cr, Mn) with oxygen and water vapour // Surface Science. 1975. V. 49. P. 61.
10. Perella A. C., Rippard W. H., Matler R. G. et al. Scanning tunneling spectroscopy and ballistic electron emission microscopy studies of aluminum-oxide surfaces // Physical Review B. 2002. V. 65. P. 201403(R).
11. Георгобиани А. Н., Пипинис П. А. Туннельные явления в люминесценции полупроводников. М.: Мир, 1994.

## ЭЛЕМЕНТЫ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.38

**В. Д. Вернер**, д-р техн. наук, проф.,  
НПК ТЦ МИЭТ,  
**П. П. Малышев**, д-р техн. наук, проф.,  
МИРЭА,  
**А. Н. Сауров**, д-р техн. наук, проф.,  
НПК ТЦ МИЭТ,  
**Ю. А. Чаплыгин**, чл.-корр. РАН,  
МИЭТ

### СИНЕРГЕТИКА МИНИАТЮРИЗАЦИИ: МИКРОЭЛЕКТРОНИКА, МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

*Анализ развития процесса миниатюризации технических устройств показывает, что микросистемная техника становится важнейшим звеном процессов миниатюризации на системном уровне. Интегрирующая роль микросистемной техники особенно возрастает при дальнейшем развитии нанотехнологии*

Первый год XXI в. для микроэлектроники был трудным. Он совпал с периодом периодических спадов объемов продаж изделий электронной техники (ИЭТ). Причины спадов каждый раз могут быть разными, но их цикличность (3–4 года) стала законо-

мерной. Основой роста рынка ИЭТ перед спадом 2001–2002 гг. был бум в продаже систем персонального использования средств вычислительной техники и коммуникаций, т. е. персональных компьютеров и мобильных телефонов. Наиболее емким был (и

остается) рынок компьютерной техники. Спад коснулся прежде всего его, а это привело к падению продаж на рынке ИЭТ. Негативные последствия спада очевидны: сокращение производства и числа рабочих мест, закрытие предприятий. Но кризисная ситуация имеет и положительные аспекты. Она заставляет искать новые методы организации бизнеса, менее подверженные колебаниям рынка, совершенствовать традиционную продукцию и активно искать новую продукцию. Таким образом, диверсификация становится основой развития [1].

При этом в организационном плане эффективными оказались два крайних решения: специализация и дальнейшая интеграция. В микроэлектронике первая тенденция выражается в переходе интегрированных фирм на позиции кремниевой мастерской (*foundry*) или проектирующей фирмы (*fabless*). Обе эти формы оказались более жизнеспособными в услови-

ях циклического развития электронной промышленности [2, 3]. Вторая тенденция связана с расширением номенклатуры изделий в широком спектре разнообразных электронных компонентов и аппаратуры на их основе. Различные темпы решения проблем изменения деятельности привели к изменению рейтинга в списке ведущих полупроводниковых фирм мира.

Следует отметить еще одну особенность: полупроводниковое производство в основном направлено на создание комплектующих. Оно должно быть нацелено на отрасли-производители массовой продукции. Если в одних из них возникает кризисная ситуация нужно искать другие сферы массового применения. После спада продаж вычислительной техники возросла роль других отраслей-потребителей ИЭТ: автостроение, медицинское оборудование и домашнее хозяйство.

Например, тенденция роста доли электроники в стоимости автомобиля (30–40 %) явно служит полем для расширения продаж ИЭТ. В настоящее время 15 % кремниевых электронных приборов в мире потребляет автостроение (в Германии 25 %).

Увеличению продаж способствует участие фирмы в создании многофункциональных изделий. К их числу следует отнести так называемые "встроенные" системы — готовые блоки обработки и преобразования информации. Их ядром служит микропроцессор/микроконтроллер, дополненный системами приема (например датчики) и передачи информации (например, стандартные шины или радиоканал). Тенденция "всеобъемлющей компьютеризации" (*ambient intelligence and ubiquitous computing*) всех сторон деятельности человека (работа, дом, одежда, лечение и т. д.) способствует развитию сферы встроенных систем [4].

К встроенным системам непосредственно примыкает область

так называемых "носимых" систем. К их числу можно отнести ноутбук, мобильный телефон, "смарт-карты", "умную" одежду, вживленные в человеческий организм системы или протезы и т. д. Одно из основных требований к этим изделиям — малые вес и размеры. Первым решением является уменьшение хотя бы одного из размеров, чаще всего толщины ИЭТ. В значительной мере это послужило причиной интереса к нетрадиционным материалам электронной техники. Оказалось, что функции полупроводника, резистора или проводника могут выполнять полимерные (в общем случае — органические) материалы. Политроника позволяет получать ИЭТ в виде листа, изготовленного дешевыми способами химического синтеза с последующей обработкой высокопроизводительными методами штамповки или прокатки.

Дешевизна таких изделий позволяет использовать их для создания, например, электронных этикеток товаров. Однако эти новые материалы уступают традиционным полупроводникам по ряду характеристик, например, подвижности носителей. Поэтому одним из направлений исследований стала разработка получения сверхтонких (10 мкм) и гибких пластин традиционного кремния. В сочетании с развитием плоских источников питания на базе твердых электролитов и плоских накопителей на основе "суперконденсаторов" применение тонких кристаллов дает возможность повысить качество и функциональность носимых систем.

Общая тенденция миниатюризации решается не только за счет минимизации одного размера (толщины), но и более полного использования объема. Здесь следует остановиться на двух направлениях: системы на кристалле ( $S_0C$ ) и модульные конструкции (системы в корпусе SiP).

Системы на кристалле стали предметом активных исследований и разработок последнего десятилетия. Они должны были решить задачу дальнейшего повышения степени интеграции не только отдельной микросхемы (микропроцессор, память, преобразователь и т. д.), но и функционального блока, включая так называемые блоки с интеллектуальными свойствами (IP-блоки). Это потребовало не только изменений в технологии ИС, но и создания более сложных САПР.

Стоимость разработки кристалла даже традиционных ИС растет с уменьшением размеров (0,13 мкм — 20 млн долл., 90 нм — 50 млн долл.) [3]. Решающим звеном в развитии нового изделия остается его конечная цена для потребителя. Она оценивается сравнением с альтернативным решением, поэтому естественно велись поиски альтернативы  $S_0C$ . В качестве такой альтернативы выступили системы с объемной интеграцией (3D-системы) и многоクリстальные сборки. При этом стал использоваться более общий термин — "интегрированные системы". В работе [5] эта система определена как производимое групповым способом объединение сложных цифровых интегральных схем с аналоговыми схемами и преобразователями, например, датчиками. Таким образом, была найдена замена термина "система на кристалле", которого автор избегает, заменив его еще одним понятием "полностью монолитная интегрированная система".

Основная трудность создания этих систем состоит в том, что они должны стать равноправным участником агрессивного рынка интегральных микросхем массового производства. Здесь возникает несколько сложностей. Во-первых, не ясен потребитель этих массовых изделий. Во-вторых, не ясны принципы объединения составляющих интегрированных систем. Основная причина состоит в различной предыстории

развития технологий микропроцессоров высокого уровня и аналогов микросхем.

Автор работы [5] рассмотрел два возможных варианта объединения технологий: на базе добавления аналоговой части к цифровому (процессорному) ядру и альтернативный вариант присоединения цифровой части к аналоговой. В обоих случаях возникают проблемы из-за многообразия вариантов аналоговой составляющей, которые вступают в противоречие с экономической целесообразностью поиска решения. Результатом анализа явилось заключение, что эффективнее использовать комбинации известных технологий, чем стремиться реализовать идею интегрированных систем на базе разработки новых технологий. В связи с этими трудностями вводится термин "псевдомонолитной интеграции" систем, которые развиваются на базе "композитных интегрированных систем". По своей сути это гибридные интегрированные системы на подложке из кремния, которые достаточно давно были применены в Технологическом центре МИЭТ в форме технологии "кремний на кремнии" [6]. В проекте [5] были предложены новые решения на основе использования МЭМС-технологии самосовмещения. Идея иллюстрируется рис. 1 [5]. Благодаря специальной топологии направляющих обеспечивается самосовмещенное позиционирование компонентов композитной системы. С помощью изготовленных по технологии МЭМС упругих контактов обеспечивается межсоединение в интегрированной системе. При этом решаются проблемы технологической совместимости цифровых и аналоговых компонентов интегрированной системы, проблемы тестирования и замены компонентов (включая ремонтоспособность системы и проблемы отвода тепла).

Дополнительным эффектом упругих контактов является устране-

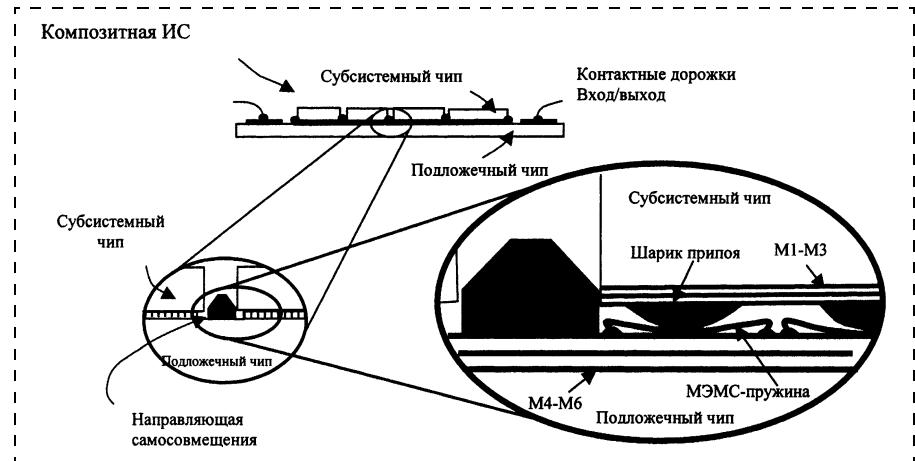


Рис. 1. Конструкция интегрированной системы (M1-M6 — уровни металлизации) [5]

ние влияния внутренних температурных напряжений. Таким образом, мы видим, что в вариант "композитная интегрированная система" МСТ-технология включена как важнейшее звено. Суммируя результаты работы [5], можно сказать, что в оценке перспектив интегрированных систем наиболее важное значение имеют пути их выхода на рынок. Именно рынок является критерием эффективности технического решения. Добавим, что метод самосовмещения при сборке активно исследуется в МСТ. Для этих целей используются различные "метки" для мест посадки. Это могут быть фрагменты ДНК или свойства поверхности твердого тела (например, гидрофильность и гидрофобность [7]).

Другой альтернативой S<sub>0</sub>C являются 3D-конструкции. В работе [1] указывалось, что развивается тенденция решения проблемы повышения степени интеграции за счет использования третьего размера. Считается, что такие конструкции могут быть более эффективным решением, чем S<sub>0</sub>C [3, 8], особенно при использовании тонких кремниевых пластин. 3D-интеграция в своей основе содержит необходимость вертикальных межсоединений кремниевых пластин (сквозных отверстий через всю толщину пластины). Решение этой проблемы было найдено в технологиях высо-

коаспектного "сухого" травления в высокоплотной плазме на базе технологии чередования процессов травления и осаждения защитной пленки. Примером может служить так называемый "Бош процесс", реализованный аппаратно в разработках технологического оборудования ряда фирм [9]. Высокоаспектное травление было впервые применено для создания МЭМС-структур на базе LIGA-процесса. Оно явилось основой появления нового научно-технического направления "микроструктуры с высоким аспектным отношением" (*high aspect ratio microstructures — HARM*). Этими методами создаются отверстия глубиной в несколько сот микрометров при ширине несколько десятков микрометров в диапазоне аспектных отношений от 10 до 100. В настоящее время решается задача перехода от обработки площади поверхности в несколько квадратных сантиметров к площади в несколько квадратных метров. Такие поверхности обладают хорошими трибологическими свойствами и высокой теплопроводностью, существенными, например, для энергетического и космического машиностроения. Таким образом, микротехнология стала частью макротехнологии.

Для нас важным является тот факт, что в развитии одного из новых направлений микроэлек-

троники — интегрированных систем, существенная роль принадлежит технологии МСТ. В обзорном сообщении отделения микросистем координатора перспективных военно-технических исследований США DARPA [10] отмечено, что общая задача многофункциональных военных систем базируется на революционном решении проблем на уровне кристалла, который должен объединить гетерогенную интеграцию трех основных информационных технологий: электроники, фотоники и МЭМС (рис. 2, см. четвертую страницу обложки). Обсуждение проблем объединения этих технологий на уровне масштаба кристалла показало, что их интеграция возможна на одном кристалле, но более типична интеграция многообразных элементов в гетерогенную систему в корпусе на принципе соизмеримости с системой на кристалле (*chip-scale*). Отметим следующие задачи, которые ставит Департамент вооружений (DOD):

- интеграция МЭМС с радиочастотной электроникой (РЧ МЭМС) и фотоникой;
- интеграция фотоники с цифровой и аналоговой электроникой;
- решение на уровне микроэлектроники задачи объединения радиочастотной и цифровой электроники на базе схем смешенного сигнала.

В решении этих проблем DARPA видит решение основной задачи информационного превосходства для обеспечения вооруженных сил возможностью видеть дальше, с высокой ясностью и возможностью получения критической информации в нужный момент времени. Специалисты DARPA считают, что 40-летний опыт микроэлектроники в принципе может решить проблему объединения гетерогенных элементов в одну интегральную систему на кристалле, но все же используют для ее характеристики кристалл, как масштабный фак-

тор (*chip-scale*). Содержательную часть интегрированной системы они видят в объединении:

- сенсорных систем с высокой чувствительностью в области радиочастотного и оптического сигналов;
- более развитого сигнального процессора, способного выделить нужный сигнал на фоне различных внутренних и внешних помех;
- высокоэффективных коммуникационных систем (особенно с позиции надежной полосы пропускания);
- интеллектуальных, интегрированных на уровне кристалла (*chip-scale*) микросистем, способных преобразовать в реальном времени сложные сигналы внешней информации в необходимую реакцию.

Развивая эти положения, можно сформулировать следующие актуальные проблемы:

- улучшение чувствительности сенсоров (РЧ, УФ, механических величин, биообъекты);
- расширение возможностей процессоров сигналов;
- развитие актиuatorов, совместимых по параметрам и размерам с сенсорной и цифровой частью микросистем;
- создание новых типов наземного и воздушного транспорта с использованием интегрированных систем.

В этом перечне в явной форме не указаны источники энергии, которые должны быть совместимы с решением указанных выше проблем. Общая ситуация в области компонентов интегрированных систем иллюстрируется рис. 2.

Суммируя сказанное выше, отметим, что в одном из новых перспективных направлений развития микроэлектроники — монолитных интегрированных системах, принципы конструирования и технологии микросистем (МС) имеют определяющее значение.

Переходя непосредственно к МС, отметим, что за исключени-

ем специального (например, военного) применения успех развития определенной МС, или для конкретики — МЭМС, зависит от его рыночного потенциала. Примеров анализа рынка МСТ достаточно много (более 20). Они различаются областью определения МСТ и соответственно значением базового отсчета. С этой точки зрения оценки различаются на порядок, наиболее оптимистичный прогноз NEXUS [11] — 200 млрд долл. в 2010 г., базируется на перечне продукции МСТ из около 30 наименований. Первоначально отметим, что для того чтобы разработка МЭМС попала в одну из строк перечня, необходима длительная работа по продвижению изделия от идеи до рыночного продукта (5–20 лет). Далее, например, из 50 тыс. различных типов датчиков, регистрирующих около 100 физико-химических параметров, только небольшое число может быть отнесено к изготавляемым в массовом производстве и, следовательно, отнесенными к рыночно значимой продукции. К их числу относятся полупроводниковые датчики, изготавляемые по групповой микрэлектронной технологии. В настоящее время рыночные МС относятся к встроенным микросистемам, т. е. к комплектующим изделиям. По этой причине их рыночный успех связан с отраслью, которая потребляет эти датчики. Уже говорилось о роли автостроительной отрасли, как потребителя полупроводниковой продукции. В мире 75 % полупроводниковых датчиков потребляют автостроение (в Германии 95 %). Причем 47 % рынка принадлежит США и приблизительно по 27 % Европе и Японии [17]. В 2002 г. по данным NEXUS в мире было произведено продукции МСТ на уровне 30 млрд долл., в то же время рынок автомобильных полупроводниковых датчиков оценивался в 1 млрд долл., т. е. составлял около 3 % общего рынка; 60–70 % этого

рынка составляют продажи головок записи/считывания (датчики) и инжекционных головок принтеров, идущих на комплектацию изделий рынка вычислительной техники. Этот сектор рынка МСТ полностью монополизирован. Если обратиться к другим изделиям МСТ, то можно видеть, что мировой рынок также в значительной степени поделен между ведущими развитыми странами. Например, общий объем продаж кремниевых гироскопов в 2002 г. был равен 390 млн долл., из этой суммы 45 % принадлежит США, 15 % — Европе и 40 % — странам Азии. Приблизительно такая же картина по распределению рынка кремниевых автодатчиков: 47 % — США, 25 % — Европа и 28 % — Азия. Следует отметить, что чем больше сектор рынка МСТ, тем больше вероятность участия крупных фирм, которые монополизируют данный сектор рынка.

Что остается для малых и средних фирм (производство — 5–50 млн долл./год), вступающих на рынок МСТ? По мнению аналитической фирмы WTC [12], которое мы разделяем, — это область новых МС, в их число входят РЧ МЭМС (обеспечение мобильных телефонов, систем позиционирования, слуховых аппаратов), аналитические МЭМС (био- и химический анализ) и медицинская техника. Рынок обеспечения здоровья превышает все остальные, включая энергетику и транспорт. Кроме того, он очень многообразен и поэтому менее подвержен монополизации. Например, в документе "Technology tracking" [13], подготовленном фирмой *QinetiQ* (практически отделения британского *Defence Evaluation Research Agency — DERA*), делается акцент на биосовместимость кремниевой технологии, приводится обширный перечень возможных приложений биоМЭМС. Оказалось, что они могут быть включены, по крайней мере, в половину перечня обес-

печения медицинских услуг с общим объемом свыше 1 триллиона долл. США (по другим оценкам [17] в 2 раза больше). Уже в 2002 г. объем продаж биохимических МС МЭМС составил 2,4 млрд долл., т. е. в 2,5 раза больше чем полупроводниковых датчиков для автомобилей. В текущем году ожидается объем продаж на уровне 7,4 млрд долл. Большие темпы роста (128 %/год) только у рынка телекоммуникационных микросистем, но он только начинает формироваться.

Потенциальные российские производители МСТ имеют три возможные направления развития:

1. Вытеснение с рынка западного конкурента (замещение импорта). Характерным признаком изделия массового производства является общемировой стандарт цен однотипных изделий. Поэтому при равных качественных характеристиках (что достаточно обычно для российских производителей), необходимо выйти на сопоставимую цену. Именно так Технологический центр вытеснил с российского рынка фирму *Bosh* по продаже датчиков давления для ОАО "Автоэлектроника", преодолев планку объема продаж на уровне 100 тыс. шт./год. Зная, что Россия производит около 1 % мирового выпуска автомобилей, можно оценить потенциальный рынок полупроводниковых датчиков в 10 млн долл.

2. Включение в новые направления мирового рынка МСТ, например, РЧ МЭМС или биоМЭМС.

3. Участие в национальном производстве изделий специального назначения, эффективность которых зависит от наличия в них компонентов МСТ.

Общее представление о месте МСТ (МЭМС) в военных информационных системах дает рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) [10]. Считают, что, например, на военном судне может быть от 10

до 100 тыс. различных микродатчиков.

Еще раз подчеркнем вторичность рынка МСТ. В большинстве случаев он составляет около 1 % объема (максимум 10 %) рынка изделий основных отраслей. В условиях России это означает малые возможности для участия крупных фирм в производстве МСТ. Основным направлением, вероятно, будет производство в небольших количествах разнообразных МС на малых предприятиях. Но их работа может быть эффективной только в рамках единой системной сети. Мы неоднократно обращали внимание [14] на необходимость создания такой сети в России. В США при всей их экономической мощи вновь и вновь возвращаются к формам организации МСТ. Например, в проекте "Распределенная система работы с МЭМС" (*Distributed Micro-Electro-Mechanical Systems Environment*) [15], поддержанном *DARPA* и *CNRI-Corporation Research Initiatives* и имеющим уровень национальной программы, предлагается объединить:

- пять лидирующих в области исследований МЭМС университетов — Калифорнийский университет Беркли (UCB), Стенфордский университет, Корнельский университет, Мичиганский университет Анн Арбор и Case Western Reserve University (трудно переводимое название);
- коммерческие организации, участвующие в производстве, такие как *Teledyne Electronics*, *ISSYS*, *Sony Corporation of America*, *Analog Devices*, *Lance Goddard Associates*, *Microwave Bonding*, *Advanced Optical MEMS Inc.*

Перечисленные фирмы позволяют организовать "виртуальное" производство МСТ/МЭМС на базе координирующего звена *MEMS Exchange* [16]. Попробуем спроектировать этот список на российскую ситуацию:

- пять лидирующих в области исследований МЭМС университетов можно отобрать по разным признакам, например, по близости к полупроводниковой технологии: МИЭТ + НПК ТЦ, ТГРТУ + НИИ МВС, С-Пб ГТУ + ГНЦ ЦНИИ РТК, СПб ГЭТУ + ЦМТД, МИРЭА + ФТИ РАН;
- коммерческие организации, которые могут участвовать в производстве — ОАО "НИИМЭ и Микрон", ОАО "Ангстрем", ОАО "Светлана".

Координатором мог бы быть ГНЦ ТЦ (роль *MEMS Exchange*).

Труднее определить вакантные роли DARPA и CNRI, в настоящее время их осуществляет Секция прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук.

Полная система позволила бы реализовать идею развития МСТ как связующего звена между макротехникой разного назначения и нарождающимся направлением — нанотехнологией (НТ).

Отметим неуклонный рост финансирования исследований и разработок в области нанотехнологии. На первоначальной фазе "Национальной наноинициативы" (NNI — 2002) США планировалась смета объемом около 0,5 млрд долл. За прошедшее время годовое финансирование достигло почти 1 млрд долл. С учетом Японии и Европы годовой "мировой" бюджет по наноисследованиям превышает 3 млрд долл. Отметим, что основные направления работ грубо можно разделить на три группы:

*1. Старые идеи под новым названием.* Примером могут служить работы в области композитных наноматериалов. Это направление достаточно давно и успешно развивалось как "ультра-дисперсные материалы". Для этих материалов известны научные и технологические основы, поэтому реальные достижения под новым названием — НТ получены прежде всего в этой об-

ласти. Другим, более новым, примером может быть создание нанорельефных структур в субмикрометровом диапазоне ИС не литографией, а с помощьюnanoштампов. Технология их изготовления заимствована из технологии МСТ.

*2. Новые идеи для известных решений.* В качестве первого примера укажем головки считывания на базе гигантского магнито-резистивного рельефа с помощью матриц кантилеверов [18]. Это своего рода перфорационная карта с высокой плотностью записи на основе НТ. На наш взгляд, менее удачными были попытки сконструировать наноразмерный аналог транзистора с использованием нанотрубок, так как они не отвечали основному принципу массового производства на базе групповых технологий.

*3. Новые идеи на новых принципах для решения "старых" проблем,* например, использование синтезированных органических молекул или их агломератов, способных выполнять роль электронных компонентов, датчиков и актуаторов [19].

Следует отметить, что в настоящее время интерес представляют не возможности дальнейшей миниатюризации с помощью нанотехнологии, а новые свойства и эффекты, которые НТ может внести в конструкции приборов микроэлектроники и МСТ [20]. *Ярким примером могут служить нанотрубки как получаемые путем отбора из специально полученной среды [25, 26], так сформированные в технологическом процессе на поверхности кристалла [27].*

В предложенном материале мы пытались показать, что МСТ является не только техническим мостом между макро- и микромиром, но и становым хребтом системы взаимодействия между различными сферами миниатюризованных изделий микроэлектроники, микросистемной техники и нанотехнологии. Вместе с тем направления исследова-

ний, разработок и производства МСТ имеют и собственные приоритеты, связанные, прежде всего, с ориентацией на рынок. С точки зрения саморазвития МСТ можно проанализировать труды какой-либо конференции по МСТ, например MEMS 2003 Kyoto [21], для оценки реальной ситуации в развитии МСТ. На конференции было представлено около 180 сообщений по 16 секциям. Наноэлектромеханические системы (NEMS) были представлены в 17 сообщениях, т. е. около 10 %. Значительную долю (около одной трети) составляли доклады по химическим МС. Приблизительно в 2 раза меньше докладов было посвящено механическим и физическим МС, датчикам и актуаторам. Это не удивляет, так как приблизительно так же распределены исследования в области полупроводниковых датчиков в России [22]. Особое внимание следует обратить на долю докладов в области проектирования, производственных технологий и измерений. Суммарно их число составляло около 30 % докладов и вместе с химическими МС они составляли более половины сообщений. Сравнивая полученный разрез тематики конференции с тенденциями развития МСТ в России [23], можно сделать заключение, что они не в полной мере соответствуют мировым тенденциям развития МЭМС, а скорее связаны с предысторией коллективов, включившихся в работы в области МСТ.

Тезисно суммируя результаты проведенного анализа роли МСТ в настоящее время, можно сформулировать следующие выводы.

## Выводы

- В течение ряда лет отслеживая процесс и тенденции развития МСТ, возникла возможность отделить конъюнктурные подвижки от базовых принципов развития этого нового научно-техническо-

го направления. К числу этих принципов мы отнесли приоритет технологического обобщения по сравнению с конструкционным (в частности, на основе модульности технологий и конструкций [24]). Интерес к проблемам технологии МСТ подтверждает тематика конференций по МСТ-МЭМС, (например, недавняя конференция в Японии [21]). Оптимальность конструкции зависит от выбора технологии. Например, поверхностная обработка кремния в какой-то мере считается следующим шагом по сравнению с объемной обработкой. Но при разработке гироскопов японские специалисты считают более эффективной объемную обработку кремния [17].

2. Анализируя направления техники, прогресс в которых связан с идеей миниатюризации: микроэлектронику (закон Мура), микросистемную технику, нанотехнологию, можно отметить, что МСТ не только равноправный член этой триады, но имеет основание считаться центральным звеном процесса совместного развития этих направлений.

3. Основной результат дальнейшего процесса миниатюризации заключается не в самом уменьшении геометрических размеров, а в повышении качественных характеристик на основе новых эффектов, косвенно связанных с уменьшением размеров. Известный брэнд "Интел внутри" был уже трансформирован в "МЭМС внутри" [1], и мы можем его "продвинуть" до "НТ внутри". Если выражаться более определенно, то внедрение принципов НТ в МСТ должно быть точно позиционировано. Куда и зачем мы пытаемся внедрить новую технологию миниатюризации. Следует отметить, что реперные точки американской программы NNI так и формулируют: за счет сверхмалых транзисторов увеличить быстродействие компьютеров в миллион раз, увеличить

плотность записи памяти в 1000 раз, за счет "молекулярной" составляющей уменьшить размеры МЭМС в 1000 раз и т. д.

4. Благодаря первоначальному лидерству США в развитии микросистемной техники на базе МЭМС термин "МЭМС" стал наиболее широко распространенным понятийным термином в области миниатюризации разного рода технических систем. На базе этого термина родилось большое число клонов: биоМЭМС, химические МЭМС, радиочастотные МЭМС (РЧ МЭМС), микрофлюидные МЭМС (МФ МЭМС) и т. д. Появление и развитие нанотехнологии привело к новому термину: МНЭМС (MNEMS). На самом деле термин "МСТ" более емок, чем МЭМС, и он прижился в России. Поэтому, может быть, в развитие этого направления следует ввести в российскую практику термин "микро- и наносистемная техника" (МНСТ), которая объединяет основных участников развития миниатюризованных систем: микроэлектронику, микросистемную технику и нанотехнологию.

#### Список литературы

1. Вернер В. Д., Ковалев А. А., Тарасов В. А. Выставка "Электроника – 2002" как зеркало мировой электроники // Изв. вузов. Электроника. 2003. № 2. С. 96–102.
2. Shelton J. A look at Fables. SEMI Watch. [www.fsa.org](http://www.fsa.org)
3. World Markets Series. Business Briefing. Global Semiconductor Manufacturing Technology 2003. (August 2003). [www.briefings.com](http://www.briefings.com)
  - Benkoski J. The Impact of Electronic design Automation on Global Semiconductor Industry. С. 78–80.
  - Banham A. New Radio Integration Technologies Drive System in Package Solution. С. 65–67.
  - Eisenbraun E. Three-dimensional Integration — The Convergence Packaging and On-chip Interconnect Technologies. С. 68–71.
  - Gutman R. Y., Lu Y.-Q., Cale T. Monolithic Water-level Stacked Integrated Circuits. С. 72–76.
4. Riemenescheider R., Strese H. Microsystems Approaching Ubiquitous Computing // MST news. 2002. N 2. С. 4–8.
5. Bartelink D. J. Integrated Systems. A Unified Approach to Chip, Test and Assembly Technologies for MCMs // Proc. IEEE Multichip Module Conf. Santa Cruz. 1995. С. 221–228.
6. Шелепин Н. И. Конструктивно-технологический базис микросенсорных систем // Тезисы конф. "Электроника и информатика – 97". МИЭТ. 1997. Ч. 1. С. 211–212.
7. Lienemann Y., Greiner A., Kornvink Y. G. Surface Tension Defects in Micro-Fluidic Self Alignment // Proc. SPIE. 2002. V. 4155. С. 55–63.
8. Lammers D. Bonding twist faces chips 3-D // EETimes 04.11.2002. С. 1.
9. Gahn C., Finkbeiner S., Furtsch M. The Bosch Silicon Micromachining Foundry Service M. Offenbergh. Euresensor XVI. 2002. С. 441–443.
10. Leheny F. It's a small, small world. An overview of Microsystems Technology office programs presented at DARPA. Tech 2002. [www.arpa.mil/mto](http://www.arpa.mil/mto)
11. <http://www.nexus-mems.com>. Market Analysis for Microsystems II. 2000–2005.
12. Bouchend Y., Wicht H. RF-MEMS—the next MEMS killer application // MST news. 2002. N 4. С. 39–40.
13. [www.technology-tracking.com](http://www.technology-tracking.com)
14. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Пурцхванидзе И. А. Организация формирования и реализация национальных и региональных программ по микросистемам и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2002. № 12. С. 9–12.
15. [http://www.arpa.mil/mto/mems/summaris/Proegets/The\\_13.html](http://www.arpa.mil/mto/mems/summaris/Proegets/The_13.html)
16. MEES Exchange. <http://www.mems-exchange.org>
17. Madou M. I. Fundamentals of Micro-fabrication // CRC Press. 2002.
18. Despont M., Vettiger P. Micro/Nanosystem technology for Probe-based Data Storage // MST news 2003. N 3. С. 10–12.
19. Cad-el-Nak M. The MEMS Handbook // CRC PRESS. 2002.
20. Schutze A. Nanotechnology and Future Sensors // Sensor-2003. Proceeding. С. 351–355.
21. IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems // MEMS-2003. Kyoto. Japan. 2003.
22. Вернер В. Д., Чаплыгин Ю. А., Сауров А. Н., Шелепин Н. А. Полупроводниковые датчики в России // Труды конференции "Датчик-2001". С.-Петербург, 2001. С. 5–15.
23. Мальцев П. П. Перспективы разработки микросистемной техники в России // Микросистемная техника. 2002. № 8. С. 7–11.
24. Вернер В. Д., Пурцхванидзе И. А. Технологическая модульность в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2003. № 9. С. 17–21.
25. Минаев В. В., Неволин В. К., Петрик В. И. Нанотрубки из углеродной смеси высокой реакционной способности // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 41–42.
26. Бобринецкий И. И., Неволин В. К. Микромеханика углеродных нанотрубок на подложках // Микросистемная техника. 2002. № 4. С. 20–21.
27. Принц В. Я., Селезнев В. А., Чеховский А. В. Самоформирующиеся полупроводниковые микро- и нанотрубки // Микросистемная техника. 2003. № 6. С. 29–34.

# МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 539.3: 621.897

**Е. В. Шалобаев**, канд. техн. наук,  
**Ю. С. Монахов**,  
Санкт-Петербургский государственный  
университет информационных технологий,  
механики и оптики (СПбГУ ИТМО),  
**В. Е. Старжинский**, д-р техн. наук,  
**С. А. Шилько**, канд. техн. наук,  
ГНП "Институт механики металлополимерных  
систем им. В. А. Белого НАН Беларусь  
(г. Гомель, Республика Беларусь)

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

### Технологии поверхности и объемной микромеханики

*Рассматриваются основные групповые технологические методы для изготовления элементов микроЭлектромеханических систем, представляющих собой объемные трехмерные структуры. Изложены этапы микрообработки.*

**Краткий обзор микротехнологических процессов обработки.** Методы и средства на основе микросистем становятся неотъемлемой частью высоких технологий практически во всех областях современной техники. В настоящее время рыночная стоимость различных МЭМС оценивается многомилюонными суммами и имеет огромный ежегодный прирост. Широкое применение этих систем инициировало развитие технологий изготовления элементов миниатюрных механических приводов [1].

Комплекс микрообработки включает как технологические процессы, базирующиеся на методах литографии, так и набор процессов, которые основаны на непосредственном удалении материала механической обработкой или энергетическими пучками. Эти процессы называются безлитографической микромеханической обработкой или микромеханической обработкой.

Одним из основных факторов, определивших необходимость видоизменения классических технологических приемов микроэлектронного производства, стала возможность, в отличие от изделий микроэлектроники, формировать трехмерные (3D) структуры.

В рамках технологии микросистем развиваются следующие "групповые" технологии [2, 3]:

1. Групповая технология поверхностной микромеханики на основе тотального нанесения и избирательного удаления слоев.

2. Групповые технологии объемной микромеханики, реализуемые в виде:

- технологий глубинного объемного травления;
- LIGA-технологии (технологии матричного микрокопирования);
- SIGA-технологии;
- волоконной технологии.

3. Технологии индивидуального формообразования методами локального стимулирования роста (полимеризации), корпускулярно-лучевого и электростатического микропрофилирования, а также алмазного фрезерования.

Технологии объемной микромеханики позволяют активно развивать в конструкторско-технологическом плане третье измерение и поэтому по способам обработки и техническому оснащению они существенно отличаются от традиционных операций планарного процесса, известного из технологии получения полупроводниковых компонентов на основе кремния в электронике. Ниже им уделяется основное внимание.

#### Технология поверхности микромеханики

В классической микроэлектронике, на основе которой развивается микромеханика, в настоящее время преобладает так называемая поверхностная микротехнология с жертвенным слоем. В ее основе лежат два основных процесса: нанесение жертвенного, а затем и рабочего слоев с последующим удалением слоя с целью формирования объемных полостей между рабочим слоем и подложкой. В качестве основного материала наиболее распространена структура *кремний на диокside кремния*, где в качестве жертвенного слоя выступает диоксид кремния. Последовательность технологических операций сводится к известным процедурам планарной технологии, включая:

- формирование слоя диоксида кремния на кремнии;
- нанесение на диоксид кремния слоя поликристаллического кремния;
- нанесение маскирующего слоя на поликристаллический кремний и проведение операций фотолитографической обработки для вскрытия окон в маске;

- травление поликристаллического кремния через маску в целях формирования окон для последующего избирательного удаления жертвенного слоя диоксида кремния;
- избирательное травление диоксида кремния;
- промывка образовавшихся объемных полостей.

В последнее время в качестве жертвенных слоев начинают использовать пористый кремний, а именно, композицию алмазоподобных материалов *карбид кремния — нитрид алюминия*, в которой карбид кремния является основным рабочим материалом, а нитрид алюминия выполняет функцию жертвенного слоя или элементов несущей конструкции, обладающих изолирующими и пьезоэлектрическими свойствами.

**Кремниевая поверхностная микрообработка.** Главной особенностью кремниевой поверхностной микрообработки является то, что она совместима с полупроводниковой технологией, для микрообработки используется КМОП-технология. Ниже даны характеристики процесса микрообработки.

#### Характеристики процесса.

Плазмохимическое осаждение из паровой фазы или химическое осаждение из паровой фазы при пониженном давлении поликристаллического кремния, фосфорокварцевого стекла.

Маскирование полимерами и тонкими пленками:

- нанесение фоторезиста;
- термически  $\text{SiO}_2$ ;
- химическим осаждением из паровой фазы при пониженном давлении  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Si}_3\text{N}_4$  фосфорокварцевого стекла.

Сухое и жидкое термическое окисление.

Геометрическая форма определяется маскированием и при травлении.

Травление (сухое и жидкое).

#### Преимущества.

1. Осмысленно получаемая горизонтальная геометрическая форма.
2. Изменяемый профиль.
3. Есть возможность получать свободные структуры.
4. Совместимость с КМОП.

#### Недостатки.

1. Уменьшенное отношение ширины канала к длине.

2. Сокращение количества материалов.

Подробно этапы кремниевой поверхностной микрообработки представлены на рис. 1.

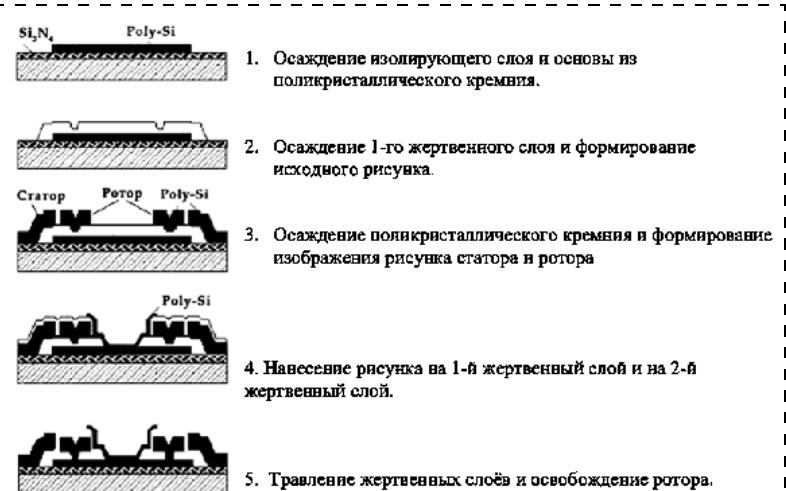


Рис. 1. Этапы кремниевой поверхностной микрообработки

## Технология объемной микромеханики

**Технология глубинного объемного травления.** В основе этой технологии лежит так называемое ориентационно-чувствительное травление кремния в жидкостных травителях, преимущественно в растворе щелочей. Данный процесс при маскировании поверхности кремниевой пластины позволяет осуществлять формирование в объеме пластины фактически трехмерных структур; при этом глубина протрава может составлять до 300—400 мкм.

Альтернативным вариантом глубинного травления подложек является технология, основанная на использовании в качестве подложек фотоситаллов. Под воздействием ультрафиолетового излучения возможно формирование в фотоситалле участков, отличающихся от неосвещенных растворимостью в жидкостных травителях. Экспонируя фотоситалл через шаблон, можно, как и на фоторезисте, задавать области с различными скоростями травления. Фотохимическая обработка позволяет получать детали любой формы и отверстия с пространственным разрешением на уровне десятка микрометров.

Элементы микромеханических систем обычно представляют собой объемы сложной конфигурации с разнообразными сквозными и глухими отверстиями или щелями. Размерная обработка пластин выполняется с помощью травления, избирательность которого обеспечивается вскрытием "окон" в защитной оксидной пленке. Этот процесс называется литографией. Литографические процессы формируют на поверхности подложки слои стойкого к последующим технологическим воздействиям материала, способного под действием облучения определенной волны изменять необратимо свои свойства и, прежде всего, стойкость к проявителю. Резистивный слой, локально облученный с помощью шаблона, обрабатывают в проявителе,

где в результате удаления локальных участков получаются резистивную маску.

В зависимости от длины волны применяемого излучения различают следующие виды литографии: фотолитографию (оптическую литографию), электронно-лучевую, рентгеновскую и ионно-лучевую.

Фотолитография является основным технологическим процессом в микроэлектронном производстве; обычно она применяется для получения линий шириной до 2–3 мкм. Для изготовления масок в настоящее время также используется электронно-лучевая литография. Вследствие эффекта обратного рассеяния отраженных электронов в микроструктурах с высокой плотностью минимальная ширина линии ограничивается значением порядка 0,5 мкм. Рентгеновская литография позволяет уменьшить линейные размеры до нескольких десятков нанометров; при этом, однако, требуется использовать сложную поглощающую маску или специальную тонкопленочную защитную структуру. Ионно-лучевая литография позволяет проводить локальное легирование примесей с очень высокой разрешающей способностью ( $\approx 0,01$  мкм).

**LIGA-технология.** Широкое распространение получил набор технологий, включающий комплекс так называемых LIGA-микротехнологических процессов (технология матричного копирования) [1, 3]. Аббревиатура LIGA (рис. 2) берет начало от терминов из немецкого языка, обозначающих основные компоненты технологических процессов — Lithography (литография), Galvanoformung (electroforming) (гальванопластика), Abformung (moulding) (литье).

Метод рентгеновской литографии иллюстрируется рис. 3. Мaska состоит из мембранны, прозрачной для рентгеновских лучей и поддерживающей

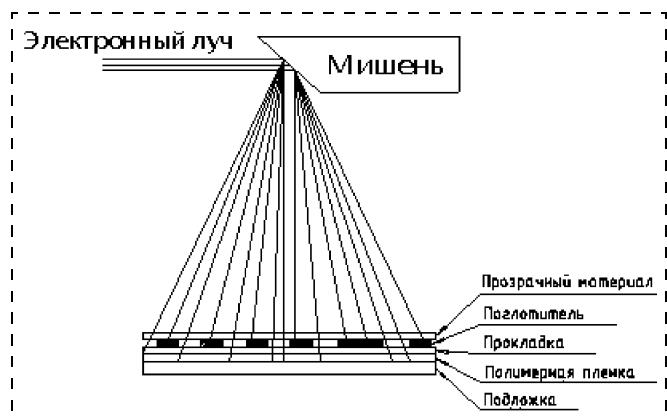


Рис. 3. Схематическое обозначение рентгеновской литографии

пленку, которая имеет заданный рисунок и сделана из материала, сильно поглощающего рентгеновские лучи. Эта маска располагается на подложке, покрытой радиационно-чувствительным резистом. На определенном расстоянии  $D$  от маски находится точечный источник рентгеновского излучения, которое возникает при взаимодействии сфокусированного электронного луча с мишенью. Рентгеновские лучи облучают маску, создавая соответствующие проекционные тени от поглотителя рентгеновских лучей на полимерной пленке. Поскольку линзы и зеркала для управления рентгеновскими лучами сделать невозможно, указанный метод является практически единственным способом экспонирования резиста.

Рентгеновское излучение имеет сверхмалый угол расходности пучка ( $0,006^\circ$ ), т. е. фактически формируется пучок параллельных лучей. Глубина проникновения излучения, источником которого являются высокоэнергетические электроны ( $E > 1$  ГэВ), движущиеся с релятивистскими скоростями, достигает единиц миллиметров. За счет локализации излучения в узком телесном угле яркость источников синхротронного излучения в  $10^6$  раз больше, чем у стандартных источников рентгеновского излучения, и плотность мощности достигает  $10^6$  Вт/см $^2$ , что определяет высокую эффективность экспонирования в условиях малых временных затрат.

После формирования в полимерном материале объемной структуры осуществляется операция электрохимического осаждения металла, например гальванического никеля, в образовавшуюся полость в полимере. Следующим этапом является удаление полимера с сохранением на поверхности субстрата объемного металла определенной топологии. Далее над металлической матрицей размещается штамповочная плита и через имеющееся в ней отверстие вводится пластик. Металлический штамп удаляется для дальнейшего использования при получении других пресс-форм. Следующий

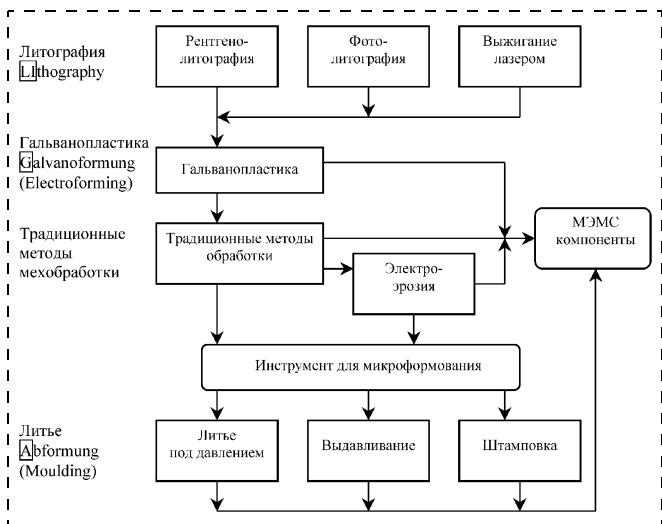


Рис. 2. Схема технологий микропроизводства МЭМС

этап характеризуется нанесением гальванического покрытия на ранее сформированную пластиковую форму, после чего пластик вытравливается, чтобы освободить объемную металлическую структуру.

Возможность многократного тиражирования за счет интегральных принципов обработки позволяет изготавливать объемные структуры высотой до 1 мм до 1000 шт. на одной пластине.

Широкое распространение в технологии МЭМС получают традиционные методы микромеханической обработки (ММО).

ММО — это набор технологических процессов для изготовления микроэлементов с использованием непосредственно процессов резания или удаления материала энергетическими пучками. Процессы ММО не предназначены для массового производства, однако приемлемы для производства опытных партий изделий. Одна из потенциальных областей применения этих технологий в массовом производстве — изготовление литографических масок и мастер-моделей для технологии литья под давлением, которые могут быть эффективно использованы при массовом тиражировании микроизделий.

ММО включают как силовые технологические процессы — процессы резания (фрезерования, сверления и др.), так и не силовые технологические процессы — электроэррозионную обработку, обработку сфокусированным ионным пучком, лазерную обработку и др. С помощью каждой из указанных технологий можно производить функциональные механические компоненты и поскольку значение шероховатости поверхности в определенной степени характеризует технологию, то сравнивая показатели шероховатости с таковыми при общепринятом литографическом процессе для микро конструкций, в частности, для глубокой рентгенолитографии, можно оценить степень совершенства процесса.

Сравним среднюю высоту микронеровностей (мкм) стенок изделия при различных микротехнологиях изготовления.

Рентгенолитография с традиционной маской . . . . .	0,03...0,05
Рентгенолитография с микрофрезерованной маской . . . . .	0,15
Непосредственное микрофрезерование . . . . .	0,1 (и менее)
Микросверление . . . . .	0,014 (и выше)
Обработка сфокусированным ионным пучком (поверхность расположена касательно к пучку) . . . . .	0,005 (в твердых металлах)
Обработка лазерным пучком (поверхность расположена касательно к пучку) . . . . .	0,1
Полимеризация лазерным пучком (поверхность расположена перпендикулярно пучку) . . . . .	0,5 (и менее)

LIGA-технология является перспективным, быстроразвивающимся процессом с высоким потенциалом для массового производства и включает несколько этапов, представленных на рис. 4 (см. третью сторону обложки):

- глубокую литографию, которая посредством облучения через маску, например, рентгеновским излучением, формирует изображение детали на резисте толщиной до нескольких миллиметров с последующим травлением;
- электродепозицию, когда проправленные на резисте структуры заполняются металлом (полученный металлический образец может быть использован как конечное изделие, а может служить в качестве штампа);
- штамповку или литье под давлением с широким выбором материала для конечного продукта.

LIGA-технология позволяет реализовать большую гамму материалов (что может быть крайне важно для работы с агрессивными средами, высокими температурами и, наконец, позволит подобрать материал с необходимыми в каждом конкретном случае параметрами — жесткостью, теплопроводностью, биосовместимостью и т. д.), получать структуры с высоким отношением высоты к ее перечным размерам, а также структуры из прозрачного материала с очень высоким качеством поверхности, что дает возможность легко интегрировать оптические элементы, которые широко применяются, например, для анализа веществ в микроаналитических системах.

В технологии LIGA-процесса для выжигания резиста используют также излучение лазера. С одной стороны, показатели точности при выжигании лазером ниже показателей точности рентгенолитографии. С другой стороны, технология выжигания лазером предлагает больше конструктивных возможностей, в частности, при создании объемных моделей. Наиболее целесообразно использовать LIGA-лазерный процесс для производства прототипов изделий. На следующей стадии технологического процесса методом гальванопластики воспроизводится точная негативная форма микроизделия. Оптимальные параметры процесса способствуют росту наращиваемой массы с нанометрической точностью без внутренних напряжений и водородных раковин (пустот). Если в конструкции требуется расположить металлические вставки, процесс останавливается до момента, когда будет достигнута необходимая высота слоя, или продолжается, пока не будет выращена однородная металлическая пластина. Типовые параметры процесса для твердых материалов — меди, никеля и сплава никель—кобальт вырабатывались в течение достаточно длительного периода времени. Технология галь-

ванопластики разработана также для мягких магнитных материалов — сплавов никель—железо с остаточной намагниченностью насыщения до  $1,4 \text{ В/м}^2$ . Наиболее твердый материал формующего инструмента для литья получают методом гальванопластики из сплавов вольфрам—кобальт или вольфрам—никель; твердость такого инструмента составляет до 600 единиц по Виккерсу. Применяются также компаунды, содержащие порошки микро- и нанометрового размера, полученные из алмаза, графито-нитрида-бора, двуокиси алюминия и др.

В отдельных случаях при изготовлении формующего инструмента требуется его механическая доработка. В таких случаях применяют комбинацию процессов шлифования, притирки и полирования, эффективно используемых в промышленности полупроводников.

Отделение подложки от слоя резист—металл достигается термомеханическими способами. Для удаления отработанного резиста применяется метод выборочного травления ("сухого" или "мокрого"); для отделения пластин, полученных в матрицах методом гальванопластики, используется также обработка проволочным электродом (Wire Electro Discharge Machining — Wire EDM).

**Сухое травление** — метод селективного удаления не маскированных участков поверхности. Этот метод является одним из самых известных и распространенных способов локального микропрофилирования. Характерной особенностью этого метода является одинаковое воздействие во всех кристаллографических направлениях. Скорость и качество травления зависят от большого числа факторов: типа травителя и его температуры; скорости отвода продуктов реакции и подвода реагентов к поверхности полупроводника; испарения травителя, приводящего к изменению его концентрации и т. п. Особенности процесса заключаются в том, что этот процесс можно комбинировать с технологией тонких пленок и с технологией КМОП. Также посредством физико-химического травления контролируется профиль травления.

#### Характеристики процесса.

Параметры плазмы: состав газа, напряжение смещения, температура подложки, плотность плазмы, давление процесса.

Маскирование полимерами и тонкими пленками:

- термически  $\text{SiO}_2$ ;
- химическим осаждением из паровой фазы при пониженном давлении  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;
- нанесение фоторезиста;
- металлизация ( $\text{Cr}$ ,  $\text{Al}$ ).

Газы травителя:

$\text{SF}_6$  —  $\text{CBrF}_3$  при  $t < 270 \text{ K}$ ;

$\text{SF}_6$  —  $\text{O}_2$  при  $t < 100 \text{ K}$ ;

$\text{CHF}_3$  —  $\text{O}_2$  при  $t < 100 \text{ K}$ ;  
 $\text{CHCl}_3$  при  $t < 270 \text{ K}$ .

#### Преимущества процесса.

1. Осмысленно получаемое горизонтальное изображение.

2. Изменяемый профиль.

3. Возможно получение рельефных изображений.

#### Недостатки:

- обработка пластин по отдельности;
- увеличение времени травления;
- нет собственного ограничителя травления и определения изображения.

**Жидкое химическое анизотропное травление.** Особенностью этого процесса является то, что в разных кристаллографических направлениях скорость удаления атомных слоев с поверхности травления, т. е. скорость травления, имеет различные значения. Это объясняется различной плотностью упаковки атомов в разных плоскостях, а также различным характером связи поверхностных атомов между собой и с атомами, расположенными в объеме кристаллографической структуры полупроводника.

#### Характеристики процесса.

Ориентация подложки:

111 (канавка V-образного сечения);

110 (канавка U-образного сечения, не стандартизована).

Маскирование тонкими пленками:

- термически  $\text{SiO}_2$ ;
- химическим осаждением из паровой фазы при пониженном давлении  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;
- металлизация ( $\text{Cr}$ ) для термомеханической обработки.

Процесс группового изготовления ограничен поверхностной реакцией.

**Преимущества:** простой процесс группового изготовления.

#### Недостатки:

- маскирование для глубинного травления;
- ограниченный набор получаемых изображений;

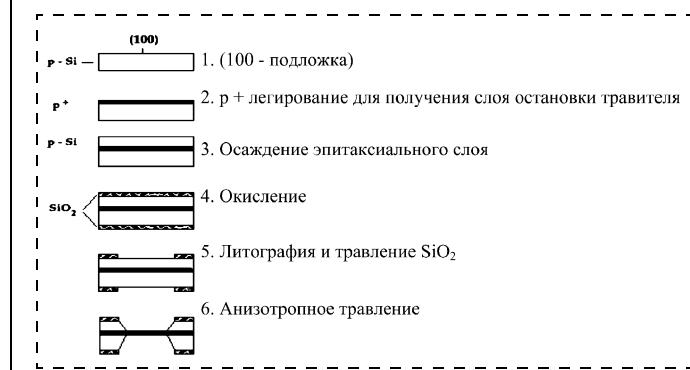


Рис. 5. Этапы жидкого химического анизотропного травления

- проблемы с внешними углами.

Подробно этапы жидкого химического анизотропного травления представлены на рис. 5.

**SIGA-технология.** Аббревиатура означает — ультрафиолетовая литография, гальваника и формовка. Из особенностей этого процесса, можно отметить, возможность управлять шириной профиля и совместимость этой технологии с технологией тонких пленок.

#### *Характеристики процесса:*

- ультрафиолетовая литография фоторезиста;
- осаждение слоев и плазменное травление;
- гальваника;
- дочерняя и большая дочерняя копия из полимеров или металла.

#### *Преимущества:*

- хорошее разрешение топографического изображения;
- низкий допуск;
- высокое отношение ширины канала к длине;
- возможность получения свободно перемещаемых структур;
- разнообразие материалов;
- уменьшение работы по производству;
- возможность получения рельефных изображений;
- совместимость с кремниевой технологией.

#### *Недостатки:*

- ограниченная точность по высоте (КМОП);
- есть ограничение для высоких структур;
- ограниченная скорость травления;
- обработка подложек только по отдельности.

Подробно этапы SIGA технологии представлены на рис. 6 (см. третью сторону обложки).

#### **Список литературы**

1. Ehrfeld W., Lehr H. Deep X-Ray Lithography for the Production of Three-dimensional Microstructures from Metals, Polymers and Ceramics // Radiat., Phys. and Chemistrv. 1995. 3(45). P. 349—365.
2. Лучинин В. В., Таиров Ю. М. Особенности материаловедческого и технологического базиса микросистем // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 7—11.
3. Шалобаев Е. В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 5—9.
4. Шилько С. А. Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем // Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач. / Под общ. ред. В. Е. Старжинского и М. М. Кане. Минск—Гомель—СПб.: Технопринт, 2003. С. 303—323.
5. Michel F., Ehrfeld W. Microfabrication Technologies for High Performance Microactuators // Tribology Issues and Opportunities in MEMS. Dordrecht (Boston) Edited by B. Bushan. Kluwer Academic Publishers. London. 1998. P. 53—72.
6. Gruber H. P., Wolf A. Komponenten für μSysteme durch die μEDM // Proc. of Microengineering, 24—26.09.97, Stuttgart. 1997.
7. Weber L., Ehrfeld W., Freimuth H. et al. Micro molding — a Powerful Tool for the Large Scale Production of Precise Microstructures // Proceedings of Micromachining and Microfabrication Process Technology 2, 14—15.10.96, Austin, Texas, 1996. P. 56—167.
8. Wolf A., Ehrfeld W., Lehr H. et al. Combining LIGA and Electro Discharge Machining for the Generation of Complex Microstructures in Hard Materials. // Proc. of 9-IPES/UME4 26—30.05.97. Braunschweig, Germany. 1997. Vol. 2. P. 657—660.
9. Friedrich C., Vasile M. Development of the Micromilling Process for High Aspect Ratio Microstructures // J. MEMS. 1996. 1(5). P. 33—38.
10. Tribology. Issues and Opportunities in MEMS. Proceedings of NSF/AFOSR/ASME. Work Shop on Tribology Issues and Opportunities in MEMS, Columbus, Ohio, 9—11.11.97 / Edited by B. Bhushan: Kluver Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 1998.

**ИНФОРМАЦИЯ**

**11–12 октября 2004 г. в городе Великий Новгород состоится  
Вторая международная научно-техническая конференция**

**"ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЭМС И ПРИБОРОВ  
НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ"**

**Материалы следует присыпать: на факс 007 095 4334777  
электронной почтой на адрес [ikar@newtech.ru](mailto:ikar@newtech.ru)  
справки по телефону 007 095 4334777**

# Конструирование и моделирование МСТ

УДК 510.67:621.3.049.77

Г. Н. Космодемьянская, канд. физ.-мат. наук,  
С. И. Сорокина,  
Калужский филиал Московского  
государственного технического университета  
им. Н. Э. Баумана

## УПРОЩЕННЫЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ МИКРОКАПСУЛ В ТРУБКАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА

*Рассмотрено движение микрокапсул в трубке малого диаметра, наполненной вязкой жидкостью. Расчеты скорости потока, расход для случая осесимметричного расположения микрокапсулы в трубке, гидродинамические силы и момент для эксцентричного расположения капсулы в трубке. Построены графики для качественной оценки влияния параметров капсулы и потока на расход и поле скоростей.*

### Введение

Одна из задач, стоящая перед специалистами, — это создание микросистем и микромеханизмов для технической и медицинской диагностики при их движении в трубках малых диаметров, наполненных вязкой жидкостью. В технике такие микросистемы могут использоваться для диагностики состояния внутренних поверхностей трубок, для обнаружения и идентификации трещин и разрушений. В медицине одним из перспективных направлений является разработка методов и средств для локальной диагностики стенок сосудов. Эти методы должны быть достаточно эффективны при различных видах патологии сосудов и позволять замену опасного хирургического вмешательства диагностикой и лечением обнаруженных патологий на ранней стадии. В России разработана технология изготовления волокон, на основе которых можно изготовить микромеханизмы с поперечным сечением от 500 мкм до нескольких сантиметров [1]. Одним из возможных направлений использования этих волокон является создание на их основе микромеханизмов, которые могли бы быть помещены в тело человека после нанесения покрытий для обеспечения биологической совместимости со средой в организме.

Экспериментальные данные, взятые из гемодинамики, показывают, что при использовании капиллярных вискозиметров с внутренним диаметром свыше 3 мм кровь, гемокрит которой меньше 55 %, можно рассматривать как ньютоновскую

жидкость. В этом случае используется теория вязкости для суспензий, которая объясняет повышение вязкости с увеличением концентрации взвешенных частиц.

Для красных кровяных телец при концентрации 40 % коэффициент динамической вязкости, рассчитанный с учетом поправок Эйнштейна [2],  $\mu' = 3\mu$ , где  $\mu$  — вязкость плазмы, превышающая в 1,5 раза вязкость воды.

Свойства крови как неニュтоновской жидкости начинают проявляться в сосудах радиусом меньше 1 мм, когда свободный пробег кровяных телец становится соизмеримым с поперечным сечением сосуда. При движении крови по артериям она может рассматриваться как однородная ньютоновская жидкость, но необходимо учитывать турбулентность потока. В связи с этим простейшую модель движения капсул микроботов в кровеносном сосуде в первом приближении можно рассматривать как движение цилиндра в цилиндрической трубе, через которую протекает вязкая жидкость (рис. 1). Для исключения особых условий на торцах цилиндра представляем их закругленными, подобный вид имеют реальные капсулы, которые используются как "электронные" таблетки. Слой жидкости между внешним и внутренним цилиндрами имеет малую толщину  $\delta$ , таким образом, данную задачу можно решать, используя методы теории смазки. Движение происходит в положительном направлении оси  $z$  с постоянной скоростью  $U$  относительно стенок цилиндра. На достаточно больших расстояниях от капсул скорость жидкости распределена по закону Пуазейля и имеет среднее по сечению значение  $U_0$ . Радиус капсул  $r_0$ , радиус цилиндра  $R_0$ . Течение считаем установившимся и ламинарным.

### Сососное расположение микрокапсулы в трубке

В качестве первого приближения можно использовать уравнение Рейнольдса. Если рассматривать случай осесимметричного расположения

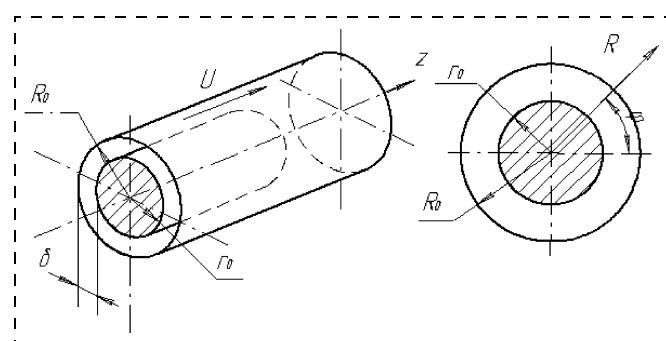


Рис. 1. Осесимметричное расположение микрокапсулы в трубке

капсулы микроробота в сосуде, то получаем простое уравнение, аналогичное уравнению движения вязкой жидкости в кольцевом зазоре. В цилиндрической системе координат  $R, z, \phi$  данное уравнение запишется в форме [3]

$$\frac{1}{R} \frac{d}{dR} \left( R \frac{dV}{dR} \right) = -\frac{\Delta p}{\mu l}, \quad (1)$$

где  $V$  — скорость потока вдоль оси трубы;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости;  $\Delta p$  — перепад давления на участке трубы длиной  $l$ .

В общем случае рассматриваемое течение может быть обусловлено как перепадом давлений, так и движением внутреннего цилиндра. Связем систему координат с движущимся цилиндром, тогда граничные условия для поля скоростей имеют вид

$$\begin{aligned} \text{при } R = r_0 & \quad V = 0; \\ \text{при } R = R_0 & \quad V = U_0 - U. \end{aligned} \quad (2)$$

Интегрирование уравнения (1) дает выражения для скорости вдоль оси  $z$  сосуда

$$V = \frac{\Delta p}{4\mu l} R^2 + C_1 \ln(R) + C_2.$$

Указанным граничным условиям (2) соответствует следующее решение:

$$\begin{aligned} V = \frac{\Delta p}{4\mu l} \left[ R_0^2 - R^2 - (R_0^2 - r_0^2) \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)}{\ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)} \right] + \\ + (U_0 - U) \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)}{\ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)}. \end{aligned}$$

Динамический коэффициент вязкости  $\mu$  с учетом поправки Эйнштейна равен 0,0045 Па · с, радиус рассматриваемого сосуда 2 мм, длина капсулы  $L = 6$  мм, радиус микрокапсулы меняется от 1,4 до 2 мм (предельный случай, когда радиус микрокапсулы равен радиусу трубы), скорость потока вязкой жидкости в трубке принимается порядка 100 мм/с. Отношение радиуса микрокапсулы к радиусу трубы задается параметром  $s = r_0/R_0$ . На рис. 2 представлено относительное поле скоростей  $\frac{V}{U - U_0}$  в зависимости от значения параметра  $s$  и радиальной координаты, изменяющейся от значения, соответствующего радиусу капсулы, до расстояния до стенки трубы. Как видно, поле скоростей в зазоре имеет параболическое распределение и с уменьшением толщины зазора (при заданном перепаде давлений на торцах капсулы) скорость падает.

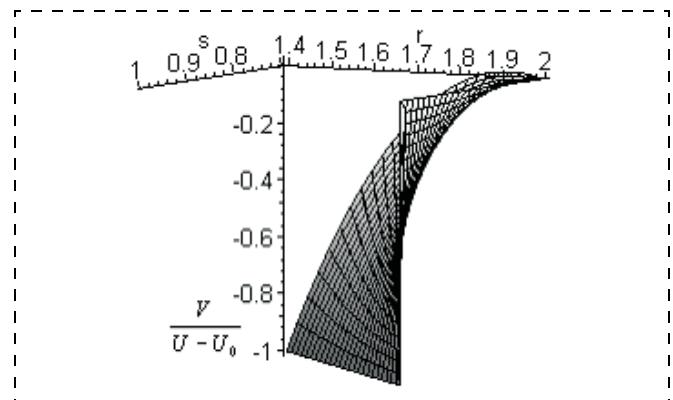


Рис. 2. Поля скоростей при осесимметричном расположении микрокапсулы в трубке

Расход через кольцевой зазор определится как

$$\begin{aligned} Q = 2\pi \int_{r_0}^{R_0} (VR) dR = \frac{\pi \Delta p}{2\mu L} \int_{r_0}^{R_0} \left[ R_0^2 - R^2 - \right. \\ \left. - (R_0^2 - r_0^2) \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)}{\ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)} \right] + \frac{2\pi(U_0 - U)}{\ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)} \int_{r_0}^{R_0} \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) dR = \\ = \frac{\pi \Delta p}{8\mu L} \left[ R_0^4 - r_0^4 - \frac{(R_0^2 - r_0^2)^2}{\ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)} \right] + \\ + \frac{\pi(U_0 - U)}{\ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right)} \left[ \frac{R_0^2 - r_0^2}{2} - r_0^2 \ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right) \right]. \quad (3) \end{aligned}$$

Как видно, расход зависит от разности скоростей капсулы и потока вязкой жидкости в трубке, кроме этого можно варьировать величиной  $s = r_0/R_0$ . Влияние этих параметров на расход показано на графике рис. 3. С увеличением  $s$  расход уменьшается, а при изменении направления движения кап-

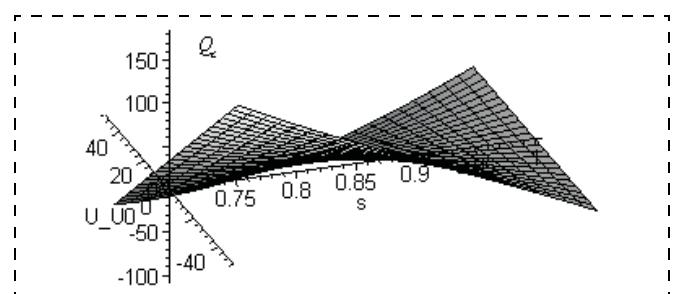


Рис. 3. Расход при осесимметричном расположении микрокапсулы в трубке

сулы в потоке, т. е. при изменении знака разности скоростей капсулы и потока, расход увеличивается. Следует отметить, что рассматривается система координат, связанная с микрокапсулой.

### Эксцентричное расположение микрокапсулы в трубке

Рассмотрим случай, когда оси капсулы и сосуда не совпадают, т. е. появляется эксцентриситет  $e$ , причем отношение эксцентриситета к разности радиусов  $R_0$  и  $r_0$  — величина первого порядка малости (рис. 4). При эксцентричном расположении капсулы в сосуде зазор  $\delta$  между ними зависит от угла  $\phi$ . Принимаем, что  $R_0 - r_0 = d$  — величина первого порядка малости,  $d/r_0$  — величина второго порядка малости. В первом приближении допустимо считать, что направление нормалей к внутренней поверхности и к внешней совпадают, а зазор можно определять как

$$\delta = d + e \cos(\phi). \quad (4)$$

Используя эти условия и считая движение жидкости в зазоре между двумя цилиндрическими поверхностями медленным, задачу в такой постановке можно решать, используя уравнения Рейнольдса, которые в цилиндрической системе координат имеют вид [4]

$$\frac{\partial p}{\partial R} = 0; \quad \frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial \phi} = \mu \frac{\partial^2 V_\phi}{\partial n^2}; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 V_z}{\partial R^2}. \quad (5)$$

Перейдем к переменной  $n$  по толщине слоя, тогда уравнения Рейнольдса могут быть переписаны в виде

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0; \quad \frac{1}{R_0} \frac{\partial p}{\partial \phi} = \mu \frac{\partial^2 V_\phi}{\partial n^2}; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 V_z}{\partial n^2}. \quad (6)$$

Уравнение неразрывности в цилиндрической системе координат запишется как

$$\frac{\partial V_n}{\partial n} + \frac{1}{R_0} \frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

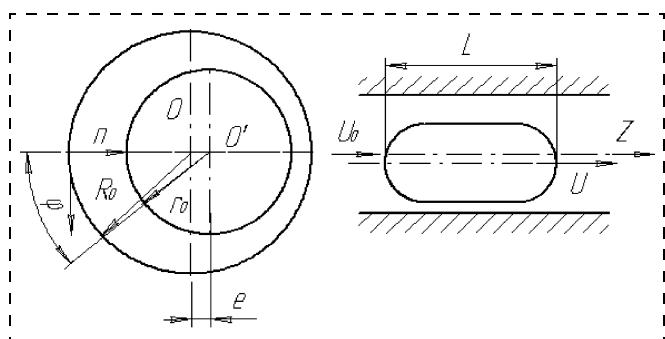


Рис. 4. Эксцентричное расположение микрокапсулы в трубке

граничные условия для поля скоростей имеют вид

$$\begin{aligned} \text{при } n = 0 & \quad V_n = 0; \quad V_\phi = 0; \quad V_z = U_0 - U; \\ \text{при } n = \delta & \quad V_n = 0; \quad V_\phi = 0; \quad V_z = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Интегрируя систему уравнений (6), получаем:

- для составляющей  $V_\phi$

$$\frac{\partial V_\phi}{\partial n} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \phi} n + C_1, \quad \text{повторное интегрирование}$$

дает  $V_\phi = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \phi} \frac{n^2}{2} + C_1 n + C_2$ , указанным граничным условиям (8) соответствует следующее решение:

$$V_\phi = \frac{1}{\mu R_0} \frac{\partial p}{\partial \phi} \frac{(n^2 - n\delta)}{2}, \quad (9)$$

- для составляющей  $V_z$

$$\frac{\partial V_z}{\partial n} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} n + C_3, \quad \text{повторное интегрирование}$$

дает  $V_z = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{n^2}{2} + C_3 n + C_4$ , указанным граничным условиям (8) соответствует следующее решение:

$$V_z = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{(n^2 - n\delta)}{2} + (U - U_0) \left( \frac{n}{\delta} - 1 \right). \quad (10)$$

При построении графиков поля скоростей при эксцентричном расположении капсулы в трубке принимаем параметры капсулы и потока, такие же, как и в случае соосного расположения капсулы в трубке, но дополнительно вводятся параметр  $b = n/\delta$  — отношение координаты  $n$  к толщине слоя  $\delta$  и величина  $f$  — отношение эксцентриситета к разности радиусов. Величина  $f$  меняется от нуля (предельный случай — капсула и трубка соосны) до единицы (предельный случай, эксцентриситет максимальный — равен разности радиусов трубы и капсулы), т. е. эксцентриситет рассматривается как какая-то часть от зазора. На рис. 5 показано изменение относительной скорости  $\frac{V_z}{U - U_0}$  в зависимости от угла  $\phi$  при фиксированном относительном эксцентриситете  $f$  для разных значений параметра  $s$ .

На рис. 6 показано изменение относительной скорости  $\frac{V_z}{U - U_0}$  в зависимости от угла  $\phi$  при фиксированном параметре  $s$ , для разных значений эксцентриситета. Как видно из графиков, распределение скорости по толщине зазора имеет параболическое профиль.

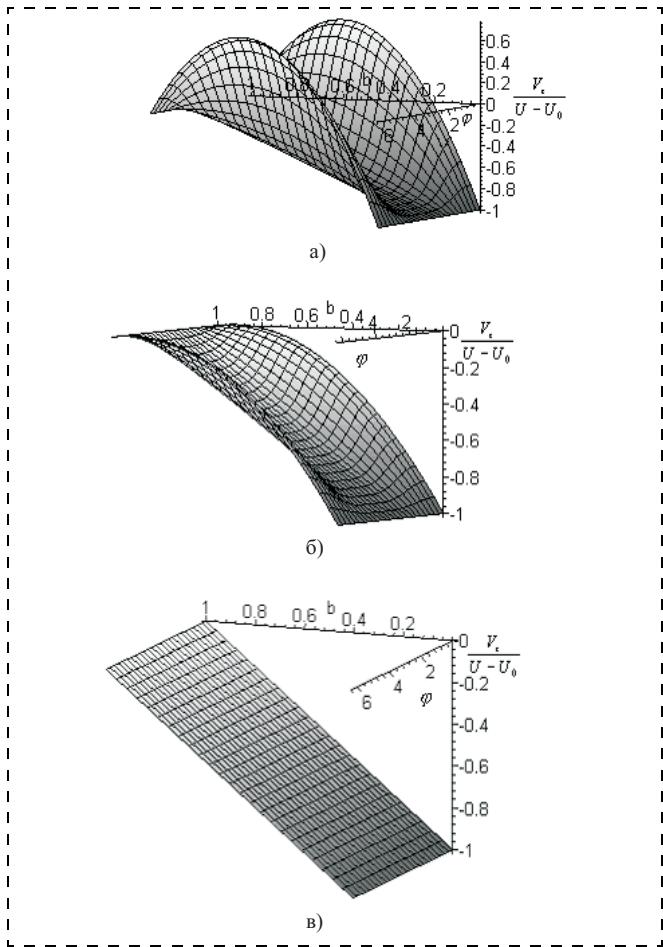


Рис. 5. Изменение поля скоростей при фиксированном значении эксцентриситета (параметр  $f$  не изменяется, варьируется параметр  $s$  — отношение радиуса микрокапсулы к радиусу трубы):  
 $a$  —  $s = 0,70$ ;  $b$  —  $s = 0,85$ ;  $c$  —  $s = 1,00$

болический закон и неравномерно в зависимости от угловой координаты  $\phi$ .

Поставив полученные выражения для составляющих скоростей (9) и (10) в уравнение неразрывности (7), получим

$$\frac{\partial V_n}{\partial n} + \frac{1}{R_0} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{1}{\mu R_0} \frac{\partial p}{\partial \phi} \frac{(n^2 - n\delta)}{2} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{(n^2 - n\delta)}{2} + (U - U_0) \left( \frac{n}{\delta} - 1 \right) \right) = 0.$$

Умножим обе части полученного уравнения на  $2\mu R_0 dn$  и проинтегрируем по толщине слоя, т. е. получаем интегралы с переменным верхним пределом:

$$2\mu R_0 \int_0^{\delta(\phi)} \frac{\partial V_n}{\partial n} dn = 0;$$

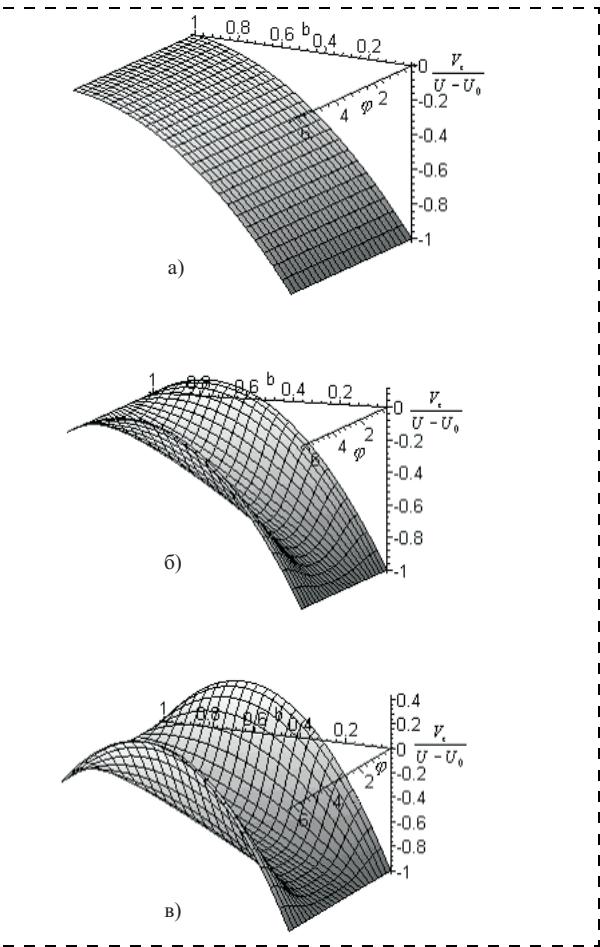


Рис. 6. Изменение поля скоростей при фиксированном значении радиуса микрокапсулы (параметр  $s = 0,75$  не изменяется, варьируется параметр  $f$  — отношение эксцентриситета к разности радиусов трубы и микрокапсулы):  
 $a$  —  $f = 0$ ;  $b$  —  $f = 0,50$ ;  $c$  —  $f = 1,00$

$$\frac{1}{R_0} \int_0^{\delta(\phi)} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\partial p}{\partial \phi} (n^2 - n\delta) \right) dn = \frac{1}{R_0} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[ \frac{\partial p}{\partial \phi} \times \right. \\ \times \left. \int_0^{\delta(\phi)} (n^2 - n\delta) dn \right] = -\frac{1}{6R_0} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} \delta^3 - \frac{1}{2R_0} \frac{\partial \delta}{\partial \phi} \frac{\partial p}{\partial \phi}; \\ \int_0^{\delta(\phi)} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} (n^2 - n\delta) + 2\mu R_0 (U - U_0) \left( \frac{n}{\delta} - 1 \right) \right) dn = \\ = -\frac{1}{6} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} R_0 \delta^3.$$

Таким образом, получаем дифференциальное уравнение для определения давления в слое

$$\frac{1}{\delta^3} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\partial p}{\partial \phi} \delta^3 \right) + R_0^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0. \quad (11)$$

Из физических условий распределения давления по оси  $z$ , в силу его линейности, можно положить  $\frac{\partial p}{\partial \phi} = 0$ , тогда

$$\begin{aligned} \text{при } z = 0 \quad p(z) = p_0; \\ \text{при } z = L \quad p(z) = p_l; \end{aligned} \quad (12)$$

$$R_0^2 \frac{\partial^2 p(z)}{\partial z^2} = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (13), после повторного интегрирования, запишется в виде  $p(z) = C_1 z + C_2$ , граничные условия для давления могут быть представлены (в первом приближении) условием (12), указанным граничным условиям соответствует решение

$$p(z) = \frac{p_l - p_0}{L} z + p_0. \quad (14)$$

Рассмотрим объемный секундный расход через осевое сечение сосуда с капсулой, он запишется как  $dQ = \iint_S V_z dS$ , где элемент площади кольцевого зазора при несоосном расположении капсулы  $dS = \frac{R_0 + r_0}{2} dnd\phi$ .

С учетом выражения (10) для составляющей скорости  $V_z$  при эксцентрическом расположении капсулы и при малых значениях как самого эксцентризитета, так и зазора между поверхностью капсулы и стенками сосуда, получим выражение для расхода:

$$\begin{aligned} Q = & \frac{R_0 + r_0}{2} \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^{\delta(\phi)} \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{(n^2 - n\delta)}{2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + (U - U_0) \left( \frac{n}{\delta} - 1 \right) \right] dn \right] d\phi = \frac{1}{12} \frac{(R_0 + r_0)}{\mu} d^3 \pi \times \\ & \times \left[ \frac{\Delta p}{L} \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{e^2}{d^2} \right) \right] - \frac{1}{2} (R_0 + r_0)(U - U_0) d\pi. \quad (15) \end{aligned}$$

На рис. 7 представлен график расхода жидкости через зазор для фиксированного значения разности скоростей капсулы и потока в трубке в зависимости от относительного эксцентризитета  $f$  и отношения радиусов  $s$ . Видно, что при увеличении параметра  $f$  расход резко возрастает, и при тех же параметрах потока и капсулы он превышает значение

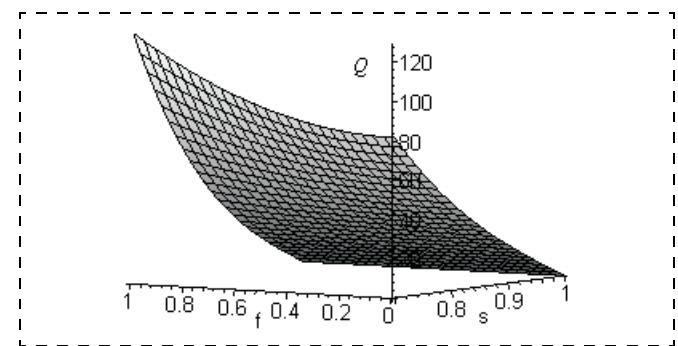


Рис. 7. Расход при эксцентрическом расположении микрокапсулы в трубке

ния расхода при осесимметрическом расположении капсулы в трубке в 2,5 раза.

#### Определение главного вектора и главного момента гидродинамических сил

Перейдем к новым осям координат, состоящим из нормали  $N$  в рассматриваемой точке поверхности капсулы (так как капсула имеет цилиндрическую поверхность, то внешняя нормаль направлена радиально) и из двух касательных. Главный вектор сил воздействия крови на капсулу микроробота представится в виде [5–7]

$$\mathbf{R} = \iint_S \mathbf{p}_N dS, \quad (16)$$

где  $\mathbf{p}_N = \mathbf{p}_R l + \mathbf{p}_\phi m + \mathbf{p}_z n$  — вектор напряжения на площадке с нормалью  $N$ ;  $l$ ,  $m$  и  $n$  — направляющие косинусы внешней нормали. В принятой системе координат представим каждый из векторов напряжений, входящих в выражение для вектора напряжения на площадке с нормалью  $N$ , тремя проекциями, причем следует учесть, что  $l = 1$ ,  $m = n = 0$ :

$$\begin{aligned} p_{RN} &= p_{RR}l + p_{R\phi}m + p_{Rz}n = p_{RR}; \\ p_{\phi N} &= p_{\phi R}l + p_{\phi\phi}m + p_{\phi z}n = p_{\phi R}; \\ p_{z N} &= p_{z R}l + p_{z\phi}m + p_{zz}n = p_{z R}. \end{aligned} \quad (17)$$

Так как в качестве граничного условия принято условие прилипания, то вдоль всей поверхности тела компоненты скорости частиц жидкости будут постоянными величинами. Следовательно, производные от скоростей частиц по направлениям касательных к поверхности тела будут обращаться в нуль и в условиях поставленной задачи

$$p_{RR} = -p; \quad p_{\phi R} = 0; \quad p_{z R} = \mu \left( \frac{\partial V_z}{\partial R} \right). \quad (18)$$

Таким образом, выражение для главного вектора сил воздействия на капсулу запишется как

$$\mathbf{R} = - \iint_S p dS + \mu \iint_S \frac{\partial V_z}{\partial N} dS, \quad (19)$$

где  $p$  — давление, которое не зависит от скорости деформации, как видно из (18), оно направлено по нормали к поверхности капсулы. Первое слагаемое представляет собой результирующее воздействие жидкости на капсулу, обусловленное давлением. Эти силы равны по модулю и противоположны по направлению, их результирующее воздействие равно нулю. Второе слагаемое — результирующее воздействие на капсулу сил вязкости. Вследствие неравенства распределения поля скоростей по толщине зазора эти силы будут разными по поверхности капсулы (больше — где зазор больше, и наоборот). Элементарная площадка на поверхности капсулы определяется выражением  $dS = r_0 d\phi dS$ . Следует отметить, что при переходе к другой системе координат выполняется равенство  $\frac{\partial V_z}{\partial n} = -\frac{\partial V_z}{\partial N}$ . Для большей толщины зазора имеем

$$R_1 = \mu r_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\partial V_z}{\partial N} d\phi dz = \frac{r_0 \Delta p}{2} (d\pi + 2e) + \\ + \frac{4r_0 \mu L(U_0 - U)}{\sqrt{d^2 - e^2}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{d-e}{d+e}} \right). \quad (20)$$

Для противоположной поверхности капсулы

$$R_2 = \mu r_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \frac{\partial V_z}{\partial N} d\phi dz = \frac{r_0 \Delta p}{2} (d\pi - 2e) - \\ - \frac{4r_0 \mu L(U_0 - U)}{\sqrt{d^2 - e^2}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{d-e}{d+e}} \right). \quad (21)$$

Для определения главного момента сил, действующих со стороны крови на капсулу, воспользуемся выражением

$$\mathbf{M} = \iint_S \mathbf{r} \times \mathbf{p}_N dS = - \iint_S \mathbf{r} \times \mathbf{p} dS + \\ + \mu \iint_S \mathbf{r} \times \frac{\partial V_z}{\partial N} dS, \quad (22)$$

где  $r$  — радиус-вектор центра масс капсулы.

Перейдем к декартовой системе координат (рис. 8). Составляющие силы, обусловленные дав-

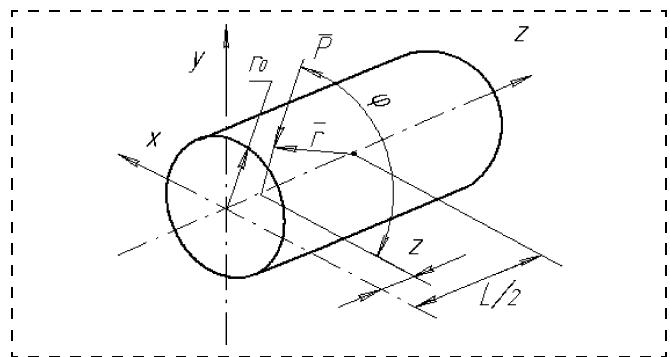


Рис. 8. Определение главного вектора и главного момента гидродинамических сил

лением и силами вязкости, выразятся соответственно как

$$\mathbf{p}(p \cos(\phi); -p \sin(\phi); 0) \frac{\partial V_z}{\partial N} \left( 0; 0; \frac{\partial V_z}{\partial N} \right) \times \\ \times \mathbf{r}(-r_0 \cos(\phi); r_0 \sin(\phi); z - \frac{L}{2}).$$

Вектор главного момента сил может быть записан следующим образом:

$$\mathbf{M} = - \iint_S \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ -r_0 \cos(\phi) & r_0 \sin(\phi) & z - \frac{L}{2} \\ p \cos(\phi) & -p \sin(\phi) & 0 \end{pmatrix} dS + \\ + \mu \iint_S \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ -r_0 \cos(\phi) & r_0 \sin(\phi) & z - \frac{L}{2} \\ 0 & 0 & \frac{\partial V_z}{\partial N} \end{pmatrix} dS. \quad (23)$$

Окончательно для проекций главного момента на оси координат получаем

$$M_x = 0; \quad M_y = r_0^2 \pi \left( \frac{e \Delta p}{2} + \frac{2 \mu L (U_0 - U)}{e} \right); \\ M_z = 0. \quad (24)$$

Как видно из (24), главный момент имеет одну составляющую  $M_y$ , обусловленную только наличием сил вязкого трения, т. е. капсулу будет вращать относительно  $Oy$ . Если выполняется равенство  $\frac{\Delta p}{L} = \frac{4\mu(U - U_0)}{e^2}$ , то момент от сил вязкого трения

равен нулю и капсula движется поступательно без вращения относительно оси, перпендикулярной оси сосуда.

Работа выполнялась в рамках Федеральной целевой научно-технической программы Минпромнауки "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002–2006 гг., блок "Ориентированные фундаментальные исследования", раздел "Фундаментальные исследования в области физических наук (Механика)", тема "Закономерности движения объектов в микромеханике".

#### Список литературы

1. Stepanov V., Shumakov V., Itkin G. Micro-robotics for intravenous and intravascular surgery // Proceedings of the IARP Inter-

national Workshop in Moscow on Micro Robots, Micro Machines and Microsystems. Moscow. 2003. P. 279–283.

2. Jones R. T. Blood flow, Annual review of Fluid Mechanics. 1969. V. 1. P. 223–243.

3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1978. 736 с.

4. Емельянов А. В., Емельянов И. А., Зенкина И. А., Шихватов А. М. Математическое моделирование и оптимизация газодинамических подшипников со спиральными канавками. Калуга: Издат. дом "Эйдос", 2003. 219 с.

5. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости, М.: Гос. изд-во технико-технической литературы, 1955. 511 с.

6. Фомин Л. Ф. Моделирование плавания микроботов // Микросистемная техника. 2003. № 5. С. 30–34.

7. Градецкий В. Г., Князков М. М., Кравчук Л. Н., Соловцов В. Н. Микросенсорное управление движением миниатюрных роботов внутри труб малых диаметров // Микросистемная техника. 2002. № 8. С. 11–19.



## СТРАНИЧКА РФФИ

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

### АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

#### Электронная структура, химическая связь и транспортные свойства ионных проводников

Номер проекта: 98-03-33188

Год представления отчета: 2001

Выполнены систематические исследования влияния точечных дефектов на электронную структуру, химическую связь и ионную проводимость классических ионных и вновь синтезированных проводников  $\text{MeF}_2$  ( $\text{Me} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Pb}$ ),  $\text{ZrO}_2\text{--CaO}$ ,  $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ , delta- $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{Sr}_4\text{Nb}_{17}\text{O}_{26}$  с помощью первоосновного линейного метода "muffin-tin" орбиталей в приближении сильной связи (ЛМТО-СС) и полуэмпирического расширенного метода Хюккеля.

Разработаны неэмпирические методики расчета энергии образования и взаимодействия дефектов. Изучены эффекты кластеризации примесей и дефектов во фторидах ЩЗЭ и диоксида циркония. Притяжение (кластеризация) дефектов позволяет объяснить переход в суперионное состояние при высоких температурах во фторидах ЩЗЭ и экстремальное изменение характеристик ионной проводимости твердых электролитов на основе диоксида циркония в зависимости от концентрации примесей. Правильно рассчитана электронная зонная структура трех фаз оксида висмута. Изучена химическая связь в фазах  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Дано объяснение нестабильности структуры суперионной фазы delta- $\text{Bi}_2\text{O}_3$  и стабилизации структуры под влиянием примесей.

Исследованы особенности электронной структуры, химической связи недавно синтезированного восстанов-

ленного оксониобата стронция: объяснено существование широкой области гомогенности, рассчитаны степени окисления атомов ниobia, спрогнозирована возможность транспорта ионов  $\text{Sr}_{2+}$  в перовскитном блоке вдоль кристаллографической оси. На основе расчетов электронной структуры и химической связи  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$  показано, что прочность структуре магнетоплюмбита придает подрешетка железа и кислорода. Ионная составляющая электропроводности осуществляется за счет подвижных ионов свинца, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. Исследованы возможные пути миграции ионов свинца в структуре магнетоплюмбита.

Разработаны алгоритмы и программы расчета электронной структуры и характеристик кристаллов с учетом нелокальности обмена и корреляции в приближении GW на базе ЛМТО подхода. Разработаны программы расчета матрицы поляризуемости, матрицы кулоновского потенциала, диэлектрической проницаемости и структурного фактора, мнимой части оператора собственной энергии. На примерах расчетов лития и никеля выполнено тестирование программ.

#### Светоиндуцированные структурные превращения поглощающих жидких кристаллов

Номер проекта: 98-03-32226

Год представления отчета: 2001

Предложен новый механизм коллективного светоиндуцированного поворота ориентационно упорядоченных молекул поглощающих нематических жидких кристаллов (НЖК). Он основан на учете нецентральности потенциала

взаимодействия молекул НЖК и анизотропии их корреляционной функции, приводящих к отличию от нуля суммарного ориентирующего момента межмолекулярных (ван-дер-ваальсовых) сил, действующих между ансамблями возбужденных и невозбужденных молекул.

Рассмотренный механизм объясняет возрастание на 1—2 порядка ориентационной оптической нелинейности в НЖК, легированных красителями, по сравнению с нелегированными НЖК. Он является весьма общим и должен проявляться и в других средах, характеризующихся анизотропной ориентацией молекул.

Экспериментально исследованы особенности взаимодействия светового излучения с НЖК, легированными широким спектром красителей. Установлено, что для конформационно активных диазо- и моноазокрасителей знак ориентационной нелинейности зависит не только от направления распространения световой волны, но и от ее поляризации, плотности мощности и внешнего электрического поля. Для конформационно стабильных антразиноновых красителей знак нелинейности постоянен.

Обнаружена оптическая бистабильность поля директора НЖК со знакопеременной нелинейностью. При одновременном воздействии на НЖК светового и низкочастотного электрических полей наблюдалась бистабильность поля директора по отношению к низкочастотному полю.

Обнаружен эффект светоиндуцированной памяти, связанный с изменением ориентирующих свойств поверхности, в гомеотропно ориентированных НЖК, легированных красителями, а также в чистых нематических матрицах ЖКМ-1282 и Е63. Установлено, что перориентация директора в НЖК с памятью может при определенных условиях эффективно развиваться и после прекращения светового воздействия.

Предложен новый метод экспериментального определения знака ориентационной нелинейности, основанный на наблюдении трансформации aberrационной картины при смещении НЖК перпендикулярно оси светового пучка. Этот метод значительно проще обычно используемого метода Z-сканирования и позволяет определить знак нелинейности при больших углах светоиндуцированного поворота директора.

## **Функциональныеnanoструктуры на основе монослоев мембрano-активных соединений**

Номер проекта: 98-03-32359

Год представления отчета: 2001

Выполнены полностью все задачи, поставленные в проекте на три года. Получены и исследованы стабильные монослои фоточувствительных поверхностно-активных производных краун-эфиров с закономерно изменяющейся структурой. Найдены условия образования прочных комплексов на основе новых краун-эфиров (кислородных и дитиазамещенных) с катионами щелочных, щелочноземельных и тяжелых металлов. Исследована зависимость влияния структуры АФК на природу комплексов краун-эфиров с определенными катионами (натрия, калия, ртути и серебра). Путем измерения изотерм давления и потенциала от молекулярной площади, атомно-силовой микроскопии, электронной спектро-

скопии и микроскопии брюстеровского рассеяния обнаружено существенное влияние структуры исходного краун-эфира и катиона металла на организацию молекул в монослоях. Обнаружены обратимые изменения в спектрах поглощения монослоев кислородных краун-эфиров на поверхности солевых субфаз при фотооблучении, являющиеся следствием протекания обратимой трансциклизации и зависящие от природы катиона металла и характера упаковки молекул в монослое. В случае дитиакраун-эфиров были обнаружены необратимые изменения в спектрах поглощения монослоев, что можно объяснить протеканием процесса образования циклобутанов. Получены и исследованы смешанные монослои различных краун-эфиров с синтезированными ранее поверхностно-активными мономерами (с полимеризующейся группой в различных частях амифильной молекулы), а также и полимерами на водной и солевых субфазах. Установлены зависимости параметров монослоев краун-эфиров от мольного соотношения краун-эфир/мономер (полимер) от природы и концентрации катиона в субфазе. Найдены оптимальные соотношения краун-эфир/мономер и краун-эфир/полимер, при которых смешанный монослой наиболее однороден и стабилен, а краун-эфир сохраняет способность к комплексообразованию с катионом. Подобраны условия переноса монослоев краун-эфиров и смешанных монослоев краун-эфир/мономер (полимер) на твердые подложки, а полученные образцы исследованы различными физико-химическими методами. Таким образом, получены и исследованы новые модельные ионоселективные и фоточувствительные мембранны, перспективные как наноматериалы с комплексом специальных свойств.

## **Нанокомпозиты на основе полимерных ленгмюровских пленок**

Номер проекта: 98-03-33427

Год представления отчета: 2001

Выращены и исследованы композитные наноструктуры на основе упорядоченных органических монослоев (матрица) и встроенных полупроводниковых наночастиц сульфидов двухвалентных металлов. Для получения слоистых органических систем с различной структурной организацией широко использовались возможности ленгмюровской технологии. Изучены два способа встраивания наночастиц в слоистую матрицу: выращивание из раствора под ленгмюровским монослоем с использованием принципов биоминерализации и гетерогенное взаимодействие многослойной пленки, содержащей катионы в межслоевом пространстве, с газообразным сероводородом. Исследование структуры отдельных компонентов и нанокомпозитов в целом проводилось с помощью нескольких взаимодополняющих методов: дифракции электронов высокой энергии в режимах напросвет и на отражение, рентгеновской и нейтронной рефлектометрии, атомно-силовой микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии. Получены новые сведения о влиянии растворителя и имидизирующего агента на формирование упорядоченных слоев термостойких полимеров. Впервые выявлен структурный фазовый переход в ленгмюровском монослое жирной кислоты, вызванный упругим взаимодействием на гра-

нице раздела в процессе эпитаксиального роста нанокристаллов под монослоем. Эти результаты дают более полное представление о взаимодействии структурных единиц на границе раздела при формировании упорядоченных гетеросистем нанометрового диапазона.

## **Тонкопленочные металлогидридные электроды: получение, структура, свойства**

Номер проекта: 98-03-32126

Год представления отчета: 2001

Методом магнетронного напыления в режимах постоянного и переменного тока получены тонкопленочные металлогидридные электроды на основе интерметаллических соединений AB<sub>2</sub> (YNi<sub>2</sub>), AB<sub>3</sub> (CeNi<sub>3</sub>), AB<sub>5</sub> (LaNi<sub>4.5</sub>Mn<sub>0.5</sub>), состав и структура которых охарактеризованы методами рентгенографического, электронно-микроскопического и рентгеноспектрального анализа. Впервые установлено, что применение порошкообразных исходных мишеней интерметаллических соединений позволяет получать кристаллические пленки при всех использованных режимах синтеза без дополнительного термического отжига. С применением комплекса электрохимических методов (гальвано- и потенциостатика, потенциодинамика) впервые определены зарядно-разрядная емкость и электрокаталитическая активность в реакции выделения водорода тонкопленочных металлогидридных электродов на основе интерметаллических соединений YNi<sub>2</sub>, CeNi<sub>3</sub>, LaNi<sub>4.5</sub>Mn<sub>0.5</sub>. На основании проведенного сопоставительного анализа полученных результатов выявлены некоторые общие закономерности влияния условий получения на структуру и электрохимические свойства тонкопленочных металлогидридных электродов на основе интерметаллических соединений составов AB<sub>2</sub>, AB<sub>3</sub> и AB<sub>5</sub>.

## **Электрохимический синтез и свойства полимерных пленок на основе фуллерена C<sub>60</sub>**

Номер проекта: 98-03-32293

Год представления отчета: 1999

Методами циклической вольтамперометрии и прерывистого электролиза при контролируемом потенциале показано, что в аprotонной среде (смеси MeCN или пропиленкарбоната с толуолом) электрохимически можно осуществить полимеризацию фуллера C<sub>60</sub> с получением электроактивных пленок полифуллера на различных электродах-подложках (платина, стеклоуглерод, угленить и др.). Реакция протекает при потенциалах генерирования дианиона C<sub>60</sub><sup>2-</sup> как в режиме циклирования потенциала электрода в области редокс-переходов C<sub>600</sub><sup>-/-2-</sup>, так и в условиях потенциостатирования электрода при потенциалах предельного тока редокс-перехода C<sub>60</sub><sup>-/-2-</sup>. При длительном циклировании потенциала процесс роста пленки носит осциллирующий характер, что проявляется в периодическом изменении интенсивности сигналов (рост-падение) на вольтамперограммах и свидетельствует о послойном росте пленки, фазовых превращениях в ней и о возникновении в пленке упорядоченных структур. Полученная электроосаждением

пленка обладает как ионной, так и электронной проводимостью. Электрохимический синтез C<sub>60</sub> полимерной пленки был сначала изучен в электролитах, содержащих соли тетрабутиламмония, так как эти системы являются наиболее информативными для изучения кинетики осаждения. Можно отметить некоторые важные достижения, в частности, возможность циклирования угленити в области высоких отрицательных потенциалов, так что редокс-состояния вплоть до C<sub>60</sub><sup>5-</sup> могут быть получены в пленке, при этом не происходит разложения электролита. Выяснены оптимальные условия получения однородных C<sub>60</sub> пленок на углеродных волокнах, таким образом важные требования для намеченного электрохимического синтеза сверхпроводника были созданы. Электрохимическое допиривание C<sub>60</sub> пленок катионами калия легко происходит, когда осаждение пленки проводится в растворе, содержащем перхлорат калия. Несмотря на низкую растворимость этой соли в смеси ацетонитрила и толуола по сравнению с растворимостью Bu<sub>4</sub>NPF<sub>6</sub>, пленки по данным электронной микроскопии получаются хорошего качества. Нами было найдено, что смесь диметилформамида (или диметилсульфоксида) с толуолом отвечает этому требованию. Применение краун-эфиров приводит также к увеличению растворимости солей калия. Используя это, мы разработали несколько эффективных систем для осаждения пленок с предполагаемыми стехиометрическими составами K<sub>3</sub>C<sub>60</sub>, K<sub>2</sub>C<sub>60</sub> или KC<sub>60</sub>. Электронные микродифракционные картины пленок формального состава KC<sub>60</sub>, осажденного на углеродные волокна, отчетливо показывают кристаллическую упорядоченность в структуре пленок. Высокая степень кристалличности является характерной для KC<sub>104</sub> систем, в то время как при использовании других солей кристалличность отсутствовала.

## **Формирование замкнутых фуллереноподобных структур при графитизации алмазов (углерод луковичной структуры, нанотрубки углерода)**

Номер проекта: 98-03-32385

Год представления отчета: 2001

Впервые детально исследованы механизм и кинетика графитизации алмазов различной природы и дисперсности в вакууме в низкотемпературном диапазоне (1400–1900 К). При этих температурах графитизация наноалмазов приводит к формированию углерода луковичной структуры (УЛС), а графитизация более крупных алмазов — к образованию на их поверхности замкнутых искривленных графитоподобных (ЗИГ) форм углерода (нанотрубки углерода, углеродные наноскладки, чашечки). В ходе выполнения проекта впервые:

1) установлено, что ЗИГ формы углерода образуют на поверхности алмаза плотноупакованные мозаичные структуры. Формирование таких структур является самоорганизующимся процессом;

2) выявлены основные закономерности протекания процесса низкотемпературной графитизации алмаза в вакууме, в частности, на основании исследований интерфейса алмаз-графит предложен "zipper" механизм графитизации (механизм расстегивающейся молнии),

представляющий собой преобразование трех алмазных плоскостей (111) в две графитовые базальные плоскости ("3-2" переход), при котором атомы среднего алмазного слоя поочередно распределяются между образующимися графитовыми слоями;

3) получены кинетические параметры низкотемпературной графитизации алмаза. Это позволило установить, что: а) существуют, по крайней мере, две температурные области, где графитизация алмаза происходит по двум различным механизмам; б) графитизация при низких температурах (1400—1900 К) происходит по синхронному механизму; в) температурной границей между этими двумя областями служит температура Дебая алмаза, при которой происходит возбуждение всех колебательных степеней свободы алмаза;

4) исследована графитизация алмаза в присутствии на их поверхности соединений переходных металлов VIII группы (Fe, Ni, Co) различной дисперсности. Обнаружено, что в присутствии частиц переходных металлов идет образование нанотрубок углерода, углерода луковичной структуры и других углеродныхnanoструктур;

5) получена информация о свойствах продуктов графитизации алмазов (исследованы их структурные, спектральные и электрофизические свойства);

6) предложен новый способ синтеза УЛС и углеродных наноматериалов, основывающийся на контролируемой графитизации дисперсных алмазов в условиях вакуума. Полученные кинетические параметры и основные выявленные закономерности графитизации алмаза позволяют: проводить синтез больших количеств УЛС путем отжига наноалмазов; осуществлять контролируемый синтез принципиально новых углерод/углеродных композитов с варьируемым соотношением графитоподобного и алмазного углерода; проводить целенаправ-

ленную модификацию поверхности различных алмазных материалов, путем создания на ней замкнутых искривленных графитоподобных форм углерода.

### **Парамагнитные зонды — прямой метод исследования морфологии проводящих полимеров**

Номер проекта: 98-03-33140

Год представления отчета: 2001

Изучали влияние молекулярного кислорода на спектры ЭПР порошков и пленок полианилина при 10—300 К. Молекулы кислорода диффундируют в аморфные и кристаллические области полианилина, присоединяясь к полимеру и уширяют его линии ЭПР вследствие магнитного взаимодействия между спинами кислорода и поляронов полианилина. При напуске кислорода к откачанным образцам зависимость уширения линии ЭПР от давления кислорода описывается суммой двух изотерм Лэнгмюра, соответствующих аморфной и кристаллической областям. При пониженных температурах было обнаружено, что амплитуда линии изменяется во времени после изменения давления кислорода или температуры по экспоненциальному закону  $\exp(-t/t_0)$ . Такой закон характерен для средней концентрации молекул, диффундирующих в сферические или цилиндрические области, причем  $t_0 \sim r^2/D$ , где  $r$  — радиус сферы или цилиндра,  $D$  — коэффициент диффузии. Анализ зависимости амплитуды и формы линии ЭПР от давления кислорода позволил определить доли кристаллических и аморфных областей. Для образцов с большей проводимостью значения  $t_0$  больше, вероятно, вследствие больших размеров областей.

\*  
\* \*

**Д. Ю. Смирнов, МИРЭА (dmitry@dgroup.ru),  
С. В. Мальцева, канд. техн. наук, МИЭМ**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСАМИ САЙТА ЖУРНАЛА "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"**

*Рассматривается система управления сайтом журнала "Микросистемная техника" (<http://www.microsystems.ru>) через Web-интерфейс, что позволяет использовать возможность распределенного администрирования проекта и управления информационным наполнением.*

Интернет-сайт уже давно перестал быть роскошью и наравне с печатной продукцией перешел в разряд необходимых атрибутов современного бизнеса. От обычного

буллета Web-ресурс отличается тем, что доступен любому пользователю сети Интернет в любой части планеты, непрерывно и сколь угодно долгое время.

На сегодняшний день многие крупные организации и небольшие фирмы поддерживают свои представительства в сети Интернет. Это могут быть корпоративные сайты, электронные магазины, интерактивные Интернет-ресурсы, информационные отраслевые порталы и другие Интернет-проекты.

Рассмотрим подробнее этапы проектирования Web-сайта.

*На первом этапе* собираются и анализируются информационные потребности пользователей сайта и цели создателя. Проводится анализ задач представления и потребления информации. Формируются целевые группы существующих и потенциальных потребителей информационного ресурса.

*На втором этапе* создается макет сайта, определяется структура его информации. Выполнение этого этапа

предполагает, в первую очередь, проведение более детального анализа задач потребителей информационного ресурса сайта. Собирается и анализируется информация о том, что представляют собой группы пользователей и чем они различаются; какие задачи потребления информации выполняются группой пользователей; какие задачи потребления информации они должны выполнять; какие задачи они выполняют часто; как они обычно выполняют каждую важную или часто выполняемую задачу; какова последовательность выполнения этих задач; какие показатели поведения пользователя отражают наиболее адекватно выполнение каждой задачи (точность, скорость и т. п.).

На этом этапе также проводятся моделирование логической структуры информации; определение атрибутов, характеризующих пользовательское восприятие и использование их при создании информационных элементов; определение спецификаций пользовательского интерфейса; экспертная оценка пользовательских характеристик сайта.

*На третьем этапе* проводится детальное конструирование и тестирование сайта; создаются спецификации интерфейса пользователя, проводится отработка художественного дизайна сайта в итерационном режиме. Этот этап предполагает тестирование пользовательских характеристик сайта и оценку функционирования сайта.

*Четвертый этап* предполагает создание законченной программной версии сайта. На этом этапе также осуществляется тестирование характеристик пользовательского взаимодействия с сайтом, вносятся, если необходимо, изменения в спецификации пользовательского интерфейса.

Любой Web-сайт состоит из набора страниц, а различия заключаются лишь в том, как они организованы. Существуют два вида организации Web-сайта — статический и динамический. В первом случае специалисты, отвечающие за создание и поддержку сайта, пишут в HTML-форме каждую в отдельности страницу, включая ее оформление и контент. Во втором случае в основе любой Web-страницы лежит шаблон, определяющий расположение в окне Web-браузера всех компонентов страницы, и конкретная информация вставляется с помощью стандартных средств, не требующих от участника процесса знания языка HTML и достаточно сложных для специалиста процедур публикации Web-страницы.

Если сайт состоит из множества страниц или он должен часто обновляться, то преимущество динамической организации становится очевидным. Разработчикам Web-сайта не надо переписывать всю страницу при изменении ее информационного наполнения или дизайна. Страницы не хранятся целиком, а формируются "на лету" при обращении к ним.

Таким образом, отделение дизайна от контента является главной отличительной особенностью современных динамических сайтов от статических. На этой основе возможны дальнейшие усовершенствования структуры сайта, такие как определение различных пользовательских функций и автоматизация бизнес-процессов, а самое главное, контроль за поступающим на сайт контентом.

Для создания динамического сайта возможны два пути. Первый — это написание собственных программ, отвечающих за создание нужных шаблонов и поддерживающих необходимые функции. При этом созданная система будет полностью отвечать потребностям, однако возможно потребует больших программистских усилий и времени. Второй путь — это использование уже существующих систем, которые и называются системами управления Web-контентом. Преимуществом этого пути является уменьшение затрат времени и сил. К его недостаткам можно отнести снижение гибкости, предоставление недостаточного или чрезмерного набора возможностей.

При разработке сайта журнала "Микросистемная техника" мы пошли по второму пути, выбрав систему управления контентом (Content Management System — CMS) DGCA. Что такое система управления контентом? Это программный комплекс, который скрывает от редактора сайта все технические тонкости процесса управления и обновления Интернет-сервера.

В функции контент-менеджера, в частности, входит:

- обновление содержания сайта, причем обновление может происходить путем редактирования формы в браузере. Контент-менеджер сам разместит новость, пропишет ее в каталогах и списках новостей сайта, проиндексирует для локальной поисковой машины и т. д.;
- управление сервисными службами (к примеру, рассылками);
- управление и настройка интерактивных разделов (форумы, гостевые книги).

В принципе, с помощью хорошо спроектированной системы управления структурой и содержимым сайта можно создать Интернет-сайт, практически не прибегая к программированию и HTML-кодированию. Системы контент-менеджмента являются довольно сложными программными комплексами с ядром, базой данных для хранения информации и модулями расширения. Каждый такой модуль увеличивает функциональные возможности системы управления содержимым.

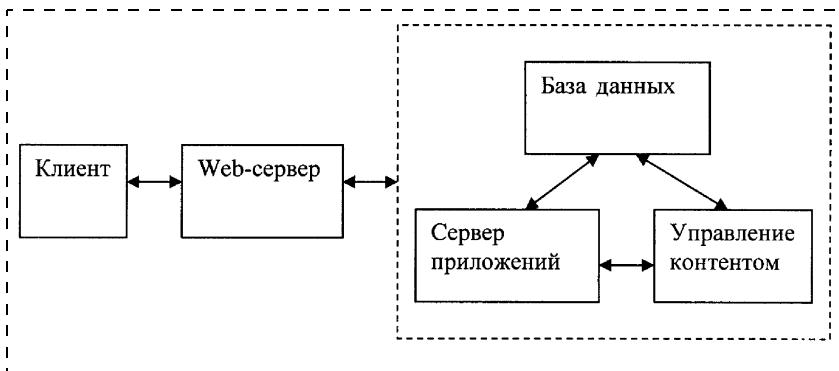
Системы управления контентом отделяют содержимое от его графического представления. Они позволяют авторам, даже не обладая техническими знаниями, легко ввести информацию, а кроме того, такие системы контролируют автоматизированные деловые процессы (workflow), предоставляют функции контроля версий/возврата в предыдущее состояние и динамического направления контента определенным группам пользователей.

В самом общем виде архитектуру систем управления Web-контентом можно представить, как показано на рисунке.

В основе данной технологии лежит трехзвенная архитектура клиент/сервер. Такая архитектура делит процесс обработки данных между клиентом, сервером приложений и хранилищем данных.

В отличие от традиционной двухзвенной архитектуры здесь присутствует сервер приложений как промежуточное звено между клиентом и хранилищем данных.

Системы управления контентом обеспечивают:



- контроль прав изнутри системы, это означает, что можно назначить пользователей, которым доступны те или иные опубликованные документы;
- интеграцию контента; возможность перенести готовый контент в новое решение;
- поддержку документов различного типа; хранение и сортировку любых документов, включая графику, аудио и видео, в центральном репозитарии;
- подробную качественную документацию и контекстно-интеллектуальную справку;
- рейтинговую систему оценки статей сайта;
- шаблонные изменения; общие изменения форматирования информации одной части сайта, отображаемые на весь сайт;
- настраиваемые деловые процессы; создание своих автоматизированных деловых процессов для конкретного контента (изображений, статей и др.);
- маркировку документов; возможность добавлять новые категории и маркеры к документам до и после их размещения в репозитарии;
- контроль версий; создание новых версий, просмотр и возврат к предыдущим версиям документов;
- инструмент визуальной администрации; возможность авторам, не прибегая к программированию, легко управлять контентом; обычно это реализуется с помощью HTML-форм.

Управление сайтом журнала "Микросистемная техника" осуществляется удаленно через Web-интерфейс, что позволяет использовать возможность распределенного администрирования проекта и управления информационным наполнением. За счет использования подсистемы разграничения прав доступа пользователей проекта администраторы ресурса имеют возможность создавать и управлять различными по сложности разделами сайта.

В рамках применения системы DGCA можно выделить использование следующих подсистем:

- удобного, доступного и интуитивно понятного для неквалифицированных пользователей инструментария, необходимого для обеспечения оперативного и

эффективного обновления информации на сайте (контент-менеджер системы);

- специального средства для конструирования сайта в целом и его структуры в частности (информационная структура, управление проектами);
- библиотек функциональностей — механизмов, реализующих алгоритмы по обработке информации на сайте;
- сервисных подсистем (например, подсистемы статистики);
- подсистемы, реализующей политику работы пользователей в защищенном режиме (права доступа);
- общей системной политики организации системы, управления ее ресурсами, редактирования данных.

Отдельно стоит уделить внимание необходимости в программном обеспечении (ПО), позволяющем проводить маркетинговые исследования существующего Internet-проекта компании. Для этого требуемое программное обеспечение должно давать ответы на вопросы: как пользователи Web-сайта просматривают его страницы, каково число пользователей, какие страницы наиболее популярны, сколько времени они проводят за чтением страниц сайта и множество других не менее важных вопросов. Важным преимуществом такого ПО является гибкость в настройке, так как невозможно заранее предугадать все возможные виды требуемой информации.

Из сказанного выше следует, что требуемое программное обеспечение должно вести учет посещений сайта и проводить статистическую обработку этой информации.

Как же можно использовать эти результаты? Что может дать, например, информация о пути пользователя?

Если пользователь прочитал первую страницу и не пошел дальше, значит, возможно, неправильно построена система навигации по сайту, и посетитель так и не разобрался, где ему найти нужную информацию, либо на сайт заходят "случайные прохожие". Помимо ошибок в навигации, причиной "неглубокого" посещения может стать невнятное описание содержимого ресурса.

Если сайт имеет несколько разделов, то определение маршрута посетителей дает шанс найти его малоинтересные "тропинки", которые необходимо преобразовать либо вообще закрыть, чтобы не тратить лишних усилий для их поддержки или рекламы. Сравнивая наиболее популярные страницы с менее популярными, можно определить ошибки, допущенные при создании последних: неверные фразы, неудобное расположение необходимой ссылки или, наконец, малый интерес к теме, раскрываемой в данной части сайта, сложность архитектуры сайта.

## CONTENTS

**Samoilovich M. I., Kleshcheva S. M., Belyanin A. F.,  
Jitkovsky V. D., Tsvetkov M. Yu. 3D-Nanocomposites  
Based on Ordered Packings of Silica Nanospheres . . . . . 2**

The fabrication technology for ordered packings from monodisperse silica nanospheres has been developed. This allowed new types of materials to be created: 3D superlattices, including the so-called photonic crystals or photonic band-gap materials.

Experiments to fill an interglobular space with semiconductors, superconductors, optically amplified, ferromagnetic and other materials have been carried out via specially devised techniques. Unique three-dimensional nanosystems thus created were found to exhibit quantum-size and other nanoscale effects such as, for example, nonlinear interaction between individual nanocluster electron subsystems.

**Bobrinetskii I. I., Nevolin V. K., Chaplygin Yu. A. Logic Gates  
With Single-Wall Carbon Nanotube Bundles . . . . . 12**

The electrical characteristics of the logic gates based on semiconductor single-wall carbon nanotubes was studied. It was shown the ability of integration logic circuits on the *p*-type conduction nanotubes base.

**Balan N. N. Increase of Holographic Measurements Precision in  
Mems-Nems by Use of Nonlinear Effects . . . . . 15**

It is described the increase of holographic measurements precision in MEMS-NEMS by means of using the interference of higher harmonic waves diffracted by a nonlinear hologram. The experimental setup is presented. The method of measurement of Young modulus using electrostatically-actuated beams is discussed.

**Grishin M. V., Dalidchik F. I., Kovalevskii S. A., Kolchenko N. N.,  
Samoilenko A. A. Investigation of Electron Traps in Thin Dielectric  
Films with the Method of Scanning Tunneling Spectroscopy . . . . . 19**

New method for investigation of electron traps in thin oxide films with STM is described. It gives the opportunity for recovering of pa-

rameters of spatial and energy distributions. The possibility of this method is demonstrated for traps in thin films of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

**Verner V. D., Maltsev P. P., Saurov A. N., Chaplygin Yu. A.  
Sinergetics of Miniaturization: Microelectronics, Mikro System  
Technique, Nano Electronics . . . . . 23**

Analysis of the miniaturization processes for technical facilities shows, that micro systems one becomes most important in the area of miniaturization on system level. Integrated role of microsystem technique particularly will be increases in further development of nano technology.

**Shalobaev E. V., Monakhov Yu. S., Starzhinsky V. E.,  
Shilko S. A. Manufacture Technologies of Cog-Wheels  
and Drives for Microelectromechanical Systems . . . . . 30**

In article the basic group technological methods for manufacturing elements of the microelectromechanical systems representing volumetric three-dimensional structures are considered. Stages of microprocessing are stated.

**Kosmodemyanskaya G. N., Sorokina S. I. The Simplified  
Models of the Motion of the Microcapsule in Tubes of Small  
Diameter . . . . . 36**

The motion of a microcapsule in a tube of small diameter with a viscous fluid is considered. Calculation of velocities of a stream and the rate of flux for a case of a rotationally symmetric arrangement of a microcapsule in a tube is yielded. Calculation of hydrodynamic forces and the moment for an eccentric arrangement of a capsule in a tube also is given and diagrams for quality standard of influence of parameters of a capsule and a stream on the rate of flux and a field of velocities are constructed.

### For foreign subscribers:

*Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 284-5008. Fax: +7(095) 281-3798*

*The journal bought since November 1999.*

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

**ISSN 1684-6419.**

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(095) 269-5510.  
E-mail: it@novtex.ru; http://www.microsystems.ru**

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала **(095) 269-5510**. E-mail: **it@novtex.ru**  
Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 018929 от 10.06.99.

Дизайнер *T.N. Погорелова*. Технический редактор *И.С. Павлова*. Корректор *A. В. Лабудь*

Сдано в набор 29.04.2004. Подписано в печать 11.06.2004. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 7,84. Уч.-изд. л. 7,14. Заказ 997. Цена договорная

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