

# КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.3.049.77

С. П. Тимошенко, канд. техн. наук, В. Г. Рубчиц, МИЭТ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕЦИЗИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

*Представлена комплексная система подготовки данных на основе математического моделирования технологии мокрого анизотропного химического травления пластин монокристаллического кремния, обеспечивающая изготовление сложных объемных фигур травления с высокой точностью.*

*Основной проблемой при изготовлении микромеханических трехмерных структур на основе монокристаллического кремния в большинстве случаев является необходимость разработки и применения нестандартных технологических процессов. В частности, это относится к процессам фотолитографии по развитой поверхности пластины кремния. В случае глубины рельефа на кремниевых пластинах более 5...10 мкм применение типового процесса планарной фотолитографии становится невозможным.*

*Для использования типового процесса планарной фотолитографии на всех этапах формирования не только мелких, но и глубоких рельефов, в том числе трехмерных структур, представлена технология "скрытых масок".*

### Введение

Процесс фотолитографии является одним из ключевых процессов изготовления микромеханических систем. Но в отличие от технологии планарных ИС, в процессе изготовления трехмерных структур возникает, как правило, необходимость формирования масок на поверхности кремниевых пластин с развитым рельефом.

К настоящему времени опубликовано множество работ, посвященных этой проблеме. В основном, для формирования масок на поверхности пластин с развитым рельефом разрабатываются процессы на базе либо оптической [1] проекционной фотолитографии, либо фотолитографии с использованием электронного пучка [2], а также другие методы и их модификации, которые не получили большого распространения в промышленной технологии микроэлектроники.

Однако для промышленного производства микромеханических систем представляет интерес использование, в тех случаях, когда это возможно, типовых процессов планарной (контактной) фотолитографии.

С этой целью для изготовления кремниевых трехмерных структур разработана технология "скрытых масок" (СМ), которая основана на использовании типовых процессов планарной фотолитографии на всех этапах формирования многопрофильной конструкции. Технологический анализ различных микромеханических систем показал, что технология СМ может иметь широкое применение.

Для реализации технологии СМ, а также для изготовления многопрофильных прецизионных трехмерных структур с высокой точностью воспроизведения их линейных размеров, необходимо детальное предварительное исследование процесса травления. С этой целью разработана математическая модель процесса травления, с помощью которой в полном объеме анализируются технологические факторы, влияющие на точность изготовления объемных фигур травления.

На основе математической модели процесса травления выполняется расчет линейных размеров топологического рисунка маски, а также данных по технологическим режимам травления, обеспечивающим травление многопрофильных структур по технологии СМ.

Большое значение имеет качество подготовки исходных данных для расчета с использованием математической модели. В связи с тем, что большая часть исходных данных по технологическим параметрам может быть получена лишь экспериментальным путем, была использована методика их определения с повышенной точностью, основанная не только на использовании высокоточного измерительного оборудования, но и на математической обработке полученных результатов.

В настоящей работе представлена практическая реализация математической модели с применением технологии СМ на примере изготовления вибрационной системы микромеханического гироскопа карданного типа, которая включает в себя несколько функциональных рельефов как небольшой глубины (до 5 мкм), так и глубоких, в том числе рельефов сквозного травления монокристаллической пластины для формирования торсионов — элементов подвески рамок вибрационной системы.

## Технология "скрытых масок"

Схема технологии "скрытых масок" для изготовления многопрофильных структур с использованием типовых процессов планарной фотолитографии приведена на рис. 1.

На схеме показан фрагмент кремниевой пластины, на котором предусматривается формирование рельефов различной глубины. Предварительно, при необходимости, на исходной пластине могут быть изготовлены стандартными способами мелкие рельефы глубиной 5...10 мкм.

Для определенности положим, что на левой части по схеме фрагмента кремниевой пластины формируется рельеф глубиной  $H_1$ , а на правой — рельеф глубиной  $H_2$ .

Первоначально проводится оксидирование кремниевой пластины (рис. 1, а). Толщина оксида соответствует расчетной согласно математической модели процесса травления. Затем на поверхности пластины методом планарной фотолитографии формируется рисунок из фоторезиста, соответствующий топологии рельефа глубиной  $H_1$ . Оксид на пластине в окнах маски подтраивается на расчетную глубину (рис. 1, б).

Далее на поверхности пластины методом планарной фотолитографии формируется топологи-

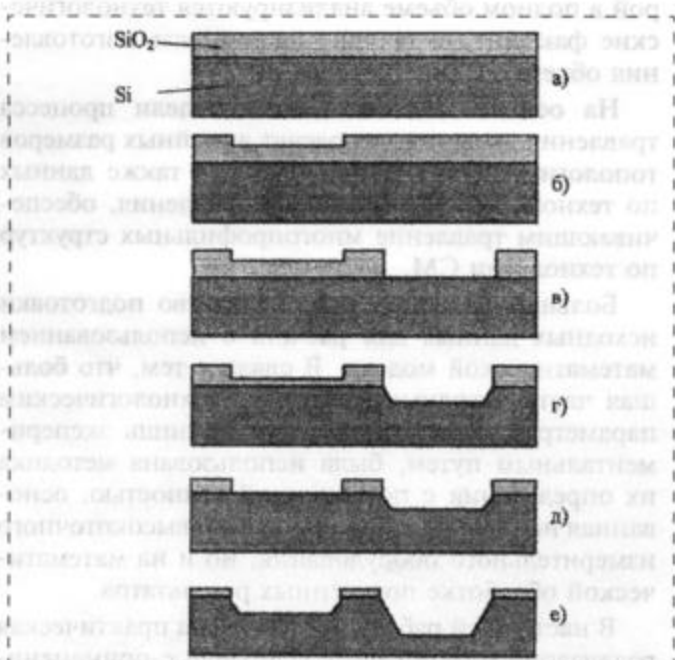


Рис. 1. Технологическая схема формирования многопрофильной структуры на основе технологии "скрытых масок":

а — оксидирование кремниевой пластины; б — фотолитография и подтраивание оксида в окнах маски на расчетную глубину; в — фотолитография и удаление оксида в окнах маски; г — анизотропное травление кремния в течение определенного интервала времени; д — травление оксида по всей поверхности пластины до момента его удаления в окнах первой фотолитографии; е — анизотропное травление кремния в течение определенного интервала времени

ский рисунок из фоторезиста, соответствующий рельефу  $H_2$ . Оксид на пластине в окнах маски полностью удаляется (рис. 1, в).

Процесс анизотропного травления кремниевой пластины выполняется поэтапно. На первом этапе проводится анизотропное травление открытых участков пластины, соответствующих рельефу  $H_2$ . В определенное расчетное время процесс травления прерывается (рис. 1, г).

Затем оксид по всей поверхности пластины подтраивается до момента его удаления в окнах топологического рисунка рельефа  $H_1$  (рис. 1, д).

На втором этапе возобновляется процесс анизотропного травления кремниевой пластины. Но с этого момента происходит не только дотравливание рельефа  $H_2$ , а и травление рельефа глубиной  $H_1$ . В расчетное время процесс завершается (рис. 1, е).

Подобным образом с использованием технологии СМ можно формировать три и более глубоких рельефов, как с одной стороны пластины, так и с обеих сторон, а также формировать объемные фигуры травления. Во всех этих случаях используется типовой процесс планарной фотолитографии.

## Схема подготовки технологических данных на основе математической модели

Следует отметить, что для изготовления сравнительно простых трехмерных структур может потребоваться лишь простой расчет технологических параметров. Однако для формирования структур со сложными фигурами травления, особенно в тех случаях, когда промежуточный контроль процесса травления практически невозможен, разработка математической модели процесса травления необходима.

Наиболее часто для изготовления микромеханических систем используются монокристаллические кремниевые пластины с (100)-ориентированным срезом поверхности, так как это единственная из основных плоскостей [3], в которой плоскости (100), (111) и (110) пересекаются с регулярной симметрией. В этом случае в расчетах процессов травления учитывается взаимное расположение этих плоскостей: плоскость (110) располагается перпендикулярно по отношению к поверхности пластины, плоскость (111) — под углом равным  $\arctg \sqrt{2} = 55^\circ 44'$  [4].

На рис. 2 приведена схема расчета параметров технологического процесса травления на основе математической модели.

Как правило, к точности линейных размеров на фигуры травления микромеханических систем устанавливаются достаточно жесткие требования, поэтому большое значение имеет достоверность и точность определения исходных данных по технологическим параметрам процесса травления

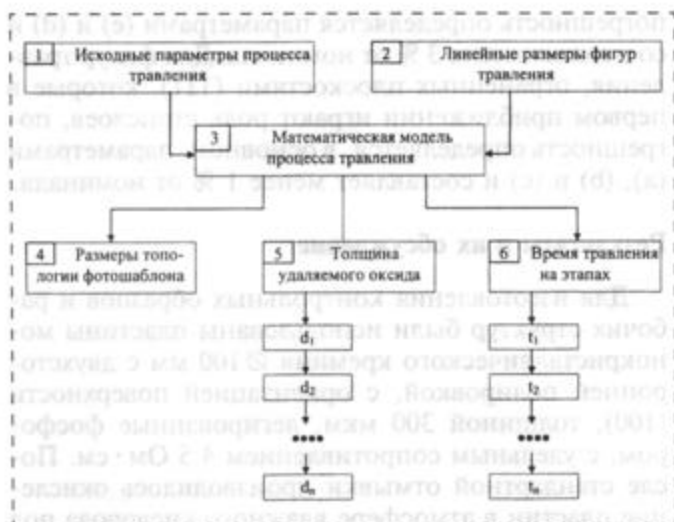


Рис. 2. Схема расчета параметров технологического процесса травления:

$d_1, d_2, \dots, d_n$  — толщина удаляемого оксида на этапах процесса травления;  $t_1, t_2, \dots, t_n$  — время окончания очередного этапа процесса травления

( $I$ , рис. 2). Для разных конструкций фигур травления микромеханических систем набор исходных данных может отличаться. Например, для формирования фигуры травления типа "крест" с использованием технологии СМ необходимы данные по скорости травления оксида  $V_{\text{SiO}_2}$  и данные по соотношению скоростей травления кристаллографических плоскостей (100), (110), (111):

$$C_{100} = V_{100}/C_{111}, \quad C_{110} = V_{110}/V_{111},$$

где  $V_{100}, V_{110}, V_{111}$  — скорости травления плоскостей кремниевой пластины соответственно (100), (110), (111).

Для определения этих параметров с повышенной точностью была разработана экспериментальная методика, которая на контрольных образцах полностью воспроизводит условия технологического процесса травления рабочих структур и практически исключает влияние случайных факторов на результаты эксперимента, но при этом обеспечивает возможность определения всех исходных данных с необходимой точностью и с минимальными трудозатратами.

В соответствии с этой методикой изготавливаются несколько одинаковых контрольных образцов произвольного размера, произвольного топологического рисунка маски и с полированными торцами (рис. 3, а). Для того, чтобы получить достоверные результаты по исходным параметрам процесса травления, образцы выполняют из кремниевой пластины с применением технологических процессов, которые предполагается использовать для изготовления рабочих структур.

Далее контрольные образцы одновременно погружают в раствор для травления, через определенные интервалы времени их по одному извлекают из раствора. Таким образом, формируется набор контрольных образцов, обработанных в одном растворе, но с разным временем травления (рис. 3, б).

На заключительном этапе подготовки исходных данных на всех образцах измеряется толщина оксида. На основе полученных замеров определяется толщина стравленного оксида для каждого образца. Результаты расчетов обрабатываются методом линейного регрессионного анализа [5] и затем вычисляется скорость травления оксида  $V_{\text{SiO}_2}$ .

Глубина травления плоскостей (100), (110), (111) вычисляется для каждого образца на основе результатов измерения соответствующих элементов профиля ( $f, e$  на рис. 3) и глубина травления плоскости (111) — по значению растрва переемычки по данным измерения ее ширины до травления по оксиду и после травления по кремнию ( $g_0, g$  на рис. 3). Полученные ряды значений глубины травления для каждой плоскости обрабатываются методом линейного регрессионного анализа и по рассчитанным значениям скорости травления соответствующей плоскости вычисляются параметры  $C_{100}$  и  $C_{110}$ .

Одновременно в процессе математической обработки результатов измерений определяют показатель точности опыта по каждому параметру, который используется в дальнейшем для оценки погрешности воспроизведения линейных размеров фигур травления.

Кроме технологических параметров процесса травления, в математическую модель вводятся данные по линейным размерам фигур травления в соответствии с конструкторской документацией на микромеханическое устройство (см. 2, рис. 2).

Математическая модель процесса травления (см. 3, рис. 2) основана на механизме мокрого ани-

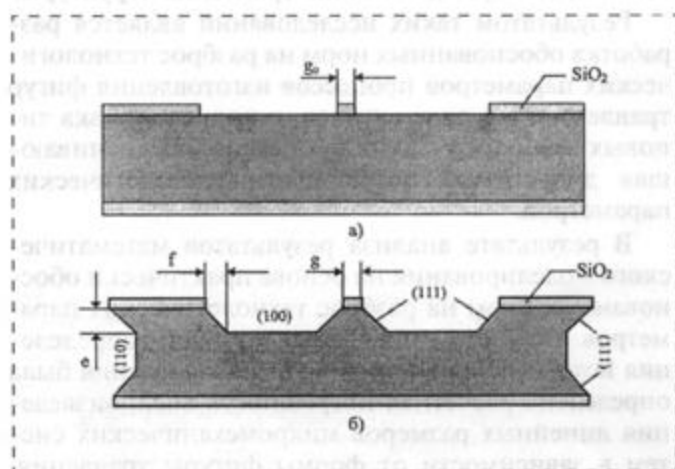


Рис. 3. Вид контрольных образцов в сечении: а — до травления; б — после травления

зотропного химического травления кремниевых пластин с ориентацией поверхности в плоскости (100), в соответствии с которым скорость травления кристаллографических плоскостей (100) и (110) значительно выше, чем скорость травления атомарно гладкой и плотноупакованной плоскости (111), что приводит к образованию V-образных канавок, ограниченных плоскостями (111). Травление в таких канавках практически прекращается [6]. Однако при длительном процессе травления для формирования объемных фигур подтравка плоскостей (111) становится существенной и поэтому для достижения заданной точности изготовления микромеханических систем эта величина учитывается в расчетах.

Результатом расчета процесса травления с использованием математической модели являются данные по линейным размерам топологического рисунка фотошаблона (см. 4, рис. 2), данные по толщине удаляемого оксида на каждом этапе формирования "скрытых масок" (см. 5, рис. 2), время окончания очередного этапа процесса травления (см. 6, рис. 2).

Важной особенностью математического моделирования процесса травления для создания высокоточных микромеханических систем является возможность исследования влияния разброса технологических параметров как отдельно, так и в их взаимосвязи, на точность изготовления фигур травления. К числу таких значимых параметров относятся:

a) значение растрыва краев оксидной маски в процессе проведения операций фотолитографии и травления оксида;

b) угол разориентации рисунка маски на поверхности пластины относительно направления (110);

c) угол разориентации поверхности пластины относительно плоскости (110);

d) скорость травления кремния в зависимости от технологического режима травления;

e) точность фиксации времени травления на каждом промежуточном этапе травления структуры.

Результатом таких исследований является разработка обоснованных норм на разброс технологических параметров процессов изготовления фигур травления, а в ряде случаев, и корректировка типовых технологических процессов, обеспечивающая допустимые погрешности технологических параметров.

В результате анализа результатов математического моделирования на основе практически обоснованных норм на разброс технологических параметров и с учетом показателя точности определения исходных параметров процесса травления была определена расчетная погрешность воспроизведения линейных размеров микромеханических систем в зависимости от формы фигуры травления. Для фигур травления, ограниченных плоскостями (100) и/или (110), с большой скоростью травления,

погрешность определяется параметрами (e) и (d) и составляет менее 3 % от номинала. Для фигур травления, ограниченных плоскостями (111), которые в первом приближении играют роль стопслоев, погрешность определяется, в основном, параметрами (a), (b) и (c) и составляет менее 1 % от номинала.

## Результаты и их обсуждение

Для изготовления контрольных образцов и рабочих структур были использованы пластины монокристаллического кремния  $\varnothing 100$  мм с двухсторонней полировкой, с ориентацией поверхности (100), толщиной 300 мкм, легированные фосфором, с удельным сопротивлением  $4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . После стандартной отмывки производилось окисление пластин в атмосфере влажного кислорода под давлением при температуре  $1000^\circ\text{C}$ .

Для травления контрольных образцов и рабочих пластин использовался, предварительно подобранный по критерию качества поверхности рельефа в сочетании с высокой скоростью травления, 33 %-ный раствор КОН при температуре  $97 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Определение параметров процесса травления производилось в соответствии с приведенной выше методикой на контрольных образцах. Толщина оксида на каждом образце до и после травления определялась в спектрофотометре SPECORD-M40 по стандартным методикам. Измерения линейных размеров элементов профиля на каждом образце производились на оптических микроскопах как непосредственно, так и на шлифах их поперечного сечения.

В конечном итоге, после статистической обработки полученных данных были определены исходные технологические параметры процесса травления.

В соответствии с конструкцией вибрационной системы микромеханического гироскопа предусматривалось:

- формирование рельефа глубиной 5 мкм с одной стороны пластины;
- формирование рельефа глубиной 50 мкм с обеих сторон пластины;
- формирование торсиона с поперечным сечением в виде "креста" с шириной балки 40 мкм и высотой 295 мкм путем сквозного травления пластины кремния одновременно с ее обеих сторон.

Травление рабочих пластин на глубину 5 мкм осуществлялось стандартным способом с использованием маски из оксида толщиной 0,6 мкм.

Технология формирования глубоких рельефов разработана на основе результатов математического моделирования процесса травления на основе технологии СМ по схеме, представленной на рис. 1. Формирование масок в слое оксида, в том числе и "скрытых", осуществлялось с использованием планарной фотолитографии последовательно с каждой стороны пластины. Травление пластин и до-

травливание оксида в окнах масок проводилось поэтапно и одновременно с обеих сторон пластины в соответствии с расчетными интервалами времени.

Единственная возможность визуального контроля процесса травления — это фиксация момента сквозного травления пластины. С этой целью в математической модели для контроля был предусмотрен расчет времени травления от начала травления до этого момента.

Результаты эксперимента представлены в виде фотографий, полученных на электронном сканирующем микроскопе (рис. 4, см. вторую сторону обложки).

На первой фотографии (рис. 4, а) представлен фрагмент вибрационной системы в общем плане, который состоит из внутреннего элемента 1, рельефа глубиной 50 мкм 2, торсионов 3 и сквозных щелей рамок 4. Фактическая глубина рельефа, измеренная с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4, составила 48,6 мкм. На изображенной структуре с целью консервации поверхности вибрационной системы до начала сборочных операций сохранены остатки маскирующего оксида: отчетливо виден "козырек" оксида по периметру фигур травления, особенно заметный в области рельефа (в виде бахромы).

На второй фотографии (рис. 4, б, см. вторую сторону обложки) представлен увеличенный вид предыдущего фрагмента на торсион.

На третьей фотографии (рис. 4, в, см. вторую сторону обложки) показан шлиф поперечного сечения торсиона. Согласно измерениям размеров "креста", произведенным в нижней по фотографии его части на микроскопе МИИ-4, толщина левой балки "креста" составила 40,5 мкм, правой — 38,6 мкм. Расчетная толщина балок "креста", согласно конструкции, составляла 40 мкм. Выборочный контроль других чипов вибрационной системы микромеханического гироскопа, размещенных на пластине (на пластине размещается 37 чипов), показал, что разброс толщины балок "креста" не превышает  $\pm 3$  мкм, что с учетом эквивалентной глубины травления кремния, равной  $\sim 360$  мкм, составил менее 1 % от номинала.

На основе изготовленных вибрационных систем была проведена сборка макетных образцов датчиков угловой скорости. На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) приведены фотографии полученных образцов на промежуточной (а) и окончательной (б) стадиях сборки.

## Заключение

Представлена технология СМ и комплексная система подготовки технологических данных на

основе математического моделирования технологического процесса анизотропного химического травления для разработки промышленной технологии изготовления многопрофильных микромеханических систем сложной конструкции с высокой точностью и использованием типовых процессов микроэлектроники.

В итоге проведенных работ получены следующие результаты:

1. Приведена технология "скрытых масок" для изготовления многопрофильных прецизионных микромеханических систем сложной конструкции с применением типового процесса планарной фотолитографии.

2. Представлена экспериментальная методика определения исходных технологических параметров с повышенной точностью.

3. Разработана математическая модель процесса анизотропного химического травления для расчета технологических параметров процесса анизотропного химического травления и оценки их допустимой погрешности.

4. Расчетная погрешность воспроизведения линейных размеров микромеханических систем в соответствии с данными математической модели и с учетом точности определения исходных данных составляет:

- для фигур травления, ограниченных плоскостями (100) и/или (110), менее 3 % от номинала;
- для фигур травления, ограниченных плоскостями (111), менее 1 % от номинала.

С целью практической реализации математического моделирования была изготовлена вибрационная система микромеханического гироскопа карданного типа на основе монокристаллического кремния. Результаты эксперимента показали практически полное соответствие изготовленных образцов и их математической модели.

## Список литературы

1. Masavoshi Esashi, Kazuyuki Minami, Shuichi Shoji. Optical Exposure Systems for Tree-Dimensional Fabrication of Microprobe // Proceeding of 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems. Nara. Japan. Jan. 1991. P. 39—44.
2. Stephen C. Jacobsen, David L. Wells, Clark C. Davis, John E. Wood. Fabrication of Micro-Structures Using Non-Planar Lithography (NPL) // Proceeding of 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems. Nara. Japan. Jan. 1991. P. 45—50.
3. Kaminsky G. J. Vac. Sci. Technol. B3. 1015. 1985.
4. U. S. Patent 3.765.969. 1973. Bell.
5. Копи Г., Копи Т. Справочник по математике: Для научных работников и инженеров. М.: Наука. 1978. 832 с.
6. Seidel H., Csepregi L. Heuerberger A and Baumganel H 1990 Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solution // J. Electrochem. Soc. 137. P. 3612—3625.

**В. А. Васильев**, канд. физ.-мат. наук,  
Пензенский государственный университет

## ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРОЙ

*Рассмотрен процесс создания информационного ресурса взаимодействия оптического излучения с полупроводниковой структурой. Представлена модель воссоздания спектров оптического пропускания и отражения полупроводниковых структур, основанная на матричном формализме. Показана возможность получения информации о характеристиках многослойных полупроводниковых структур из экспериментальных спектров оптического отражения путем их моделирования.*

Для представления информации об объектах той или иной природы используют различные информационные модели, включающие стандартные параметры (характеристики) конкретных объектов. В целом информационная модель должна обеспечивать создание и/или обнаружение информации, ее регистрацию и оценку. Перечисленные требования согласно [1, 2] являются этапами создания информационного ресурса. В работе [3] информационный ресурс определен как симбиоз знаний и информации. Информационная модель, построенная на основе знаний об объекте (свойств, параметров, характеристик и др.), знаний законов взаимодействия объекта с другими объектами, средами и полями, позволяет извлекать информацию об объекте, содержащуюся в зарегистрированном сигнале, и тем самым создавать информационный ресурс.

Большой научный и практический интерес представляют вопросы создания и изучения информационного ресурса взаимодействия оптического излучения с полупроводниковой структурой. Откликом такого взаимодействия являются оптические спектры (отражения, пропускания и др.), которые несут в себе достаточно большое количество информации. Знание законов изменения и методов анализа спектров позволяет не только обнаружить, зарегистрировать, но и оценить качественные и количественные характеристики исследуемого объекта. Соединение оптических спектральных методов создания/обнаружения с методами анализа информационных ресурсов открывает

новые возможности в изучении полупроводниковых структур [4].

Процесс создания информационного ресурса взаимодействия оптического излучения с полупроводниковой структурой состоит из следующих этапов.

1. Создание и/или обнаружение информации:

$$I(\lambda, \xi, \varphi_1) = F_1[J(\lambda, \xi)], \quad (1)$$

где  $J(\lambda, \xi)$  — информационное поле;  $\lambda$  — информационная обстановка;  $\xi$  — ресурсосоздающие параметры;  $F_1$  — преобразование поля, выделяющее созданную и/или обнаруженную информацию;  $\varphi_1$  — параметр преобразования выделения созданной и/или обнаруженной информации.

2. Регистрация информации:

$$I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2) = F_2[I(\lambda, \xi, \varphi_1)], \quad (2)$$

где  $F_2$  — преобразование регистрации;  $\varphi_2$  — параметр преобразования регистрации.

3. Извлечение и/или распознавание информации:

$$I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = F_3[I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2)], \quad (3)$$

где  $F_3$  — преобразование распознавания;  $\varphi_3$  — параметр преобразования распознавания.

Преобразование извлечения/распознавания представляет собой получение скрытых и дополнительных параметров, которые несет в себе зарегистрированный сигнал (например, зарегистрированный спектр отражения полупроводниковой структуры, спектр пропускания и т. п.).

4. Оценивание информации:

$$I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4) = F_4[I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)], \quad (4)$$

где  $F_4$  — преобразование оценки;  $\varphi_4$  — параметр преобразования оценки.

Преобразование оценки относится как к оцениванию непосредственно качества информации (характеристик обнаружения, точности измерения и т. д.), так и к оцениванию стоимости ее создания, обнаружения, регистрации и т. п. и представляет собой сложную структуру.

5. Определение закона деградации для данного вида информации (по аналогии с [5]):

$$\begin{aligned} I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) &= \\ &= F_5[I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)], \end{aligned} \quad (5)$$

где  $F_5$  — преобразование деградации;  $\varphi_5$  — параметр преобразования деградации.

Деградация (ухудшение) информации может происходить как за счет естественного снижения информационной эффективности системы с увеличением времени работы системы, так и под воздействием дестабилизирующих факторов.

6. Определение закона обновления информации (подобно [5]):

$$I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_6) = F_6[I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)]; \quad (6)$$

$$I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_6) = \tilde{F}_6[I(\lambda, \xi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5)], \quad (7)$$

где  $F_6, \tilde{F}_6$  — преобразования обновления;  $\varphi_6, \tilde{\varphi}_6$  — параметры преобразования обновления.

Закон обновления информации может быть выведен на основе применения показателя информационной эффективности  $P_{эфф}$ :

$$P_{эфф} = 1 - \varepsilon_\alpha(1 - f(\varepsilon_L))\varepsilon_L, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_\alpha$  — относительное изменение параметра от предельно допустимого;  $\varepsilon_L$  — относительное изменение текущей реализации фактора  $L_i$  ( $L_i \leq L$ ) от выбранного значения фактора  $L$  в интервале от  $a$  до  $b$  (конечное значение).

Нахождение конкретного вида  $F_i$  и  $\varphi_i$  является одной из задач теории информационных ресурсов (ИР) [1].

Для нахождения  $F_i$  и  $\varphi_i$  в случае взаимодействия оптического излучения с полупроводниковой структурой необходимо знание физических процессов, протекающих в полупроводниковых структурах, особенностей взаимодействия твердого тела с электромагнитным излучением, законов изменения и методов анализа спектров. С этой точки зрения несомненный интерес представляют разработка и исследование новых моделей и алгоритмов анализа данных оптических спектральных измерений полупроводниковых структур.

В диапазоне длин волн от 10 до 1000 см<sup>-1</sup> (длинноволновая часть оптического диапазона) из экспериментальных спектров оптического отражения путем их искусственного воссоздания (моделирования на ЭВМ) можно определять важные параметры и характеристики полупроводников: плазменную частоту  $\omega_p$ , частоту поперечных оптических фононов  $\omega_T$ , концентрацию свободных носителей заряда  $n$  и подвижность свободных носителей заряда  $\mu$ . Кроме того, по спектрам длинноволнового оптического отражения можно определять толщины тонких полупроводниковых и диэлектрических слоев [6].

При исследовании длинноволновых возбужденных кристалл можно рассматривать как непрерывную среду. Макроскопическая теория длинноволновых оптических колебаний решетки в ионных кристаллах была впервые развита Хуаном Кунем [7]. Она основана на том, что длинноволновые колебания в ионных кристаллах, содержащих по два иона в элементарной ячейке, связаны с относительным смещением подрешеток положительных и отрицательных ионов. Рассмотрение уравнения движения для случая продольных и поперечных

колебаний ионов позволяет получить простое соотношение между частотами продольных  $\omega_L$  и поперечных  $\omega_T$  колебаний:

$$\omega_L^2 = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_\infty} \omega_T^2, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_s$  — статическая диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_\infty$  — диэлектрическая проницаемость на бесконечной частоте.

Согласно модели диэлектрической проницаемости (учитывающей ангармонические эффекты), предложенной Хуаном Кунем, коэффициент преломления может быть определен по формуле

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega)} = \left( \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega_T^2}{\omega_T^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

где  $\gamma$  — параметр затухания.

В области частот  $\omega_T < \omega < \omega_L$  действительная часть диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(\omega)$  отрицательна, а комплексный показатель преломления  $n(\omega)$  является чисто мнимой величиной.

Если энергия фотона мала по сравнению с шириной запрещенной зоны, то существенным оказывается взаимодействие электромагнитного излучения со свободными носителями заряда. Оптическая электропроводность согласно Друде [8] определяется по формуле

$$\sigma = \frac{Ne^2}{m^*\omega^2\tau}, \quad (11)$$

где  $N$  — концентрация свободных носителей заряда;  $m^*$  — эффективная масса носителей заряда;  $\tau$  — время релаксации;  $e$  — заряд электрона.

Коэффициент преломления в этом случае

$$n = \left( 1 - \frac{\varepsilon_\infty\omega_p^2}{\omega(\omega + \frac{i}{\tau})} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

где  $\omega_p$  — плазменная частота;  $\tau = \frac{m^*}{\mu e}$ ;  $\mu$  — подвижность носителей заряда.

Электромагнитные волны могут распространяться в среде, только если действительная часть диэлектрической проницаемости положительна; в случае же, когда ее значение отрицательно, электромагнитная волна полностью отражается. Плазменная частота  $\omega_p$  отделяет область пропускания от области полного отражения и может быть определена в соответствии с (11) по формуле

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m^*\varepsilon_0\varepsilon_\infty}. \quad (13)$$

Выражение (13) можно использовать для большинства полупроводников, так как в полупроводни-

как  $n$ -типа проводимости время релаксации  $\tau$  можно считать не зависящим от энергии носителя, поскольку электроны в зоне проводимости обладают большой подвижностью и малой эффективной массой.

С учетом вкладов решеточных и плазменных колебаний коэффициент преломления может быть определен по формуле

$$n = \left( \epsilon_{\infty} - \frac{\epsilon_{\infty} \omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau)} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \omega_T^2}{\omega_T^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Если решеточных осцилляторов несколько, то выражение (14) приобретает вид

$$n(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)} = \left\{ \epsilon_{\infty} - \frac{\epsilon_{\infty} \omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_j)} + \sum_j \frac{s_j \omega_{Tj}^2}{\omega_{Tj}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

где  $\epsilon_{\infty}$  — высокочастотная диэлектрическая проницаемость;  $\omega_p$  — плазменная частота;  $\omega_{Tj}$  — частота  $j$ -го поперечного оптического фонона;  $\omega$  — текущая частота;  $s_j$  — сила  $j$ -го осциллятора;  $\tau$  — время релаксации;  $\gamma_j$  — параметр затухания.

В случае твердого раствора высокочастотная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\infty}$  может быть определена линейной интерполяцией соответствующих значений компонентов. Силы осцилляторов можно рассчитать по формуле

$$s_j = (\epsilon_{sj} - \epsilon_{\infty j}) x_j, \quad (16)$$

где  $\epsilon_{\infty j}$ ,  $\epsilon_{sj}$  — высокочастотная и низкочастотная диэлектрические проницаемости;  $x_j$  — мольная доля компонента.

Моделирование спектров оптического отражения полупроводников и полупроводниковых структур может быть основано на модели коэффициента преломления (диэлектрической проницаемости) (15).

В ряде случаев требуется определение коэффициентов отражения и пропускания неоднородных полупроводниковых структур. Для описания спектров оптического отражения полупроводниковых структур, представляющих собой эпитаксиальный слой на подложке, может использоваться однослойная модель. В этом приближении коэффициент отражения со стороны подложки определяется по формуле [9]

$$R = \frac{\left| (1-n) + (1+n) \left[ \frac{(n-n_s)/(n+n_s)}{(n+n_s)/(n+n_s)} \right] \exp(i4\pi\sigma h) \right|^2}{\left| (1+n) + (1-n) \left[ \frac{(n-n_s)/(n+n_s)}{(n+n_s)/(n+n_s)} \right] \exp(i4\pi\sigma h) \right|^2}, \quad (17)$$

где  $n$ ,  $n_s$  — коэффициенты преломления слоя и подложки;  $h$  — толщина слоя;  $\sigma$  — волновое число;  $i = \sqrt{-1}$ .

Наиболее удобным для моделирования спектров оптического отражения и пропускания полу-

проводниковых структур является матричный метод. Матричный метод в применении к диэлектрическим слоям описан в работе [10]. С его помощью представляется возможным учитывать неоднородность твердотельных структур, разбивая их на отдельные однородные слои и описывая каждый слой характеристической матрицей.

Если многослойная структура состоит из  $N$  слоев (рис. 1), то матрица  $M$  для области, заключенной между  $z = 0$  и  $z = h$ , равна произведению матриц  $M_j$  для этих слоев:

$$M = \prod_{j=1}^N M_j. \quad (18)$$

Коэффициенты отражения и пропускания по напряженности поля выражаются через матричные элементы матрицы  $m_{ik}$ :

$$\rho = \frac{(m_{11} + m_{12}n_s)n_a - (m_{21} + m_{22}n_s)}{(m_{11} + m_{12}n_s)n_a + (m_{21} + m_{22}n_s)}; \quad (19)$$

$$\tau = \frac{2n_a}{(m_{11} + m_{12}n_s)n_a + (m_{21} + m_{22}n_s)}. \quad (20)$$

Коэффициенты отражения и пропускания по интенсивности определяются по формулам

$$R = |\rho|^2; \quad T = |\tau|^2 \frac{n_s \cos \varphi_s}{n_a \cos \varphi_a}. \quad (21)$$

На практике часто используются слои, имеющие градиент коэффициента преломления, который может быть обусловлен особенностями эпитаксиального роста и процессов диффузии или создан намеренно для обеспечения требуемых характеристик структуры. Для описания таких структур может быть использовано гиперболическое распределение коэффициента преломления:

$$n(z) = \frac{n_1 n_2}{\left[ n_2 - (n_2 - n_1) \frac{z}{h} \right]}, \quad (22)$$

где  $n(z)$  — коэффициент преломления;  $n_1$  и  $n_2$  — значения коэффициента преломления на границах слоя;  $h$  — толщина слоя.

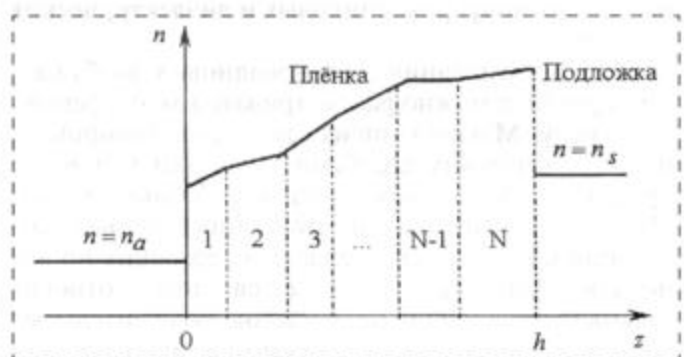


Рис. 1. Схема профиля показателя



Данное распределение удобно тем, что при малых  $\frac{(n_2 - n_1)}{n_1}$  оно практически линейно и позволяет при использовании матричного формализма записать характеристическую матрицу слоя в аналитическом виде:

$$M = \begin{bmatrix} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\cos \alpha + \frac{1}{2m} \sin \alpha\right) & i\beta \frac{(n_1 n_2)^{\frac{1}{2}}}{m(n_2 - n_1)} \sin \alpha \\ i\beta \frac{(n_1 n_2)^{\frac{3}{2}}}{m(n_2 - n_1)} \sin \alpha & \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\cos \alpha - \frac{1}{2m} \sin \alpha\right) \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где  $\alpha = m \ln \left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ ;  $m^2 = \left[\frac{\beta n_1 n_2}{(n_2 - n_1)}\right]^2 - \frac{1}{4}$ ;  $\beta = 2\pi \sigma h$ ;

$\sigma$  — волновое число;  $h$  — толщина слоя;  $i = \sqrt{-1}$ .

В частном случае однородного слоя ( $n_1 = n_2 = n$ ) характеристическая матрица имеет вид

$$M = \begin{bmatrix} \cos \beta n & (-i/n) \sin \beta n \\ -i n \sin \beta n & \cos \beta n \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Подстановкой (14) в (16) получается коэффициент отражения по интенсивности, выраженный через матричные элементы  $m_{ik}$  матрицы  $M$ :

$$R = \frac{(m_{11} + m_{12} n_s) - (m_{21} + m_{22} n_s)^2}{(m_{11} + m_{12} n_s) + (m_{21} + m_{22} n_s)}, \quad (25)$$

где  $n_s$  — коэффициент преломления подложки.

На практике часто используются многослойные структуры и слои, имеющие градиент состава, концентрации и подвижности свободных носителей заряда, которые могут быть обусловлены особенностями эпитаксиального роста и процессов диффузии или созданы намеренно для обеспечения требуемых характеристик структуры.

На рис. 2 показан спектр оптического отражения эпитаксиальной полупроводниковой структуры  $p\text{-InAs}_{0,63}\text{Sb}_{0,12}\text{P}_{0,25} : \text{Zn}/n\text{-InAs}$ . Особенностью спектров отражения таких структур является то, что они не поддаются описанию с помощью однослойной модели из-за глубокого проникновения цинка (Zn) в подложку в процессе диффузии. Для описания спектров оптического отражения применялась двухслойная модель расчета. Коэффициент преломления рассчитывался по формуле (15) при числе осцилляторов  $j = 3$ . Характеристические матрицы слоев и подложки определялись по формуле (19), характеристическая матрица структуры — по формуле (13), коэффициент отражения — по формуле (20). Значения параметров слоев, определенные в результате процедуры подгонки теоретических спектров под экспериментальные данные, приведены ниже.

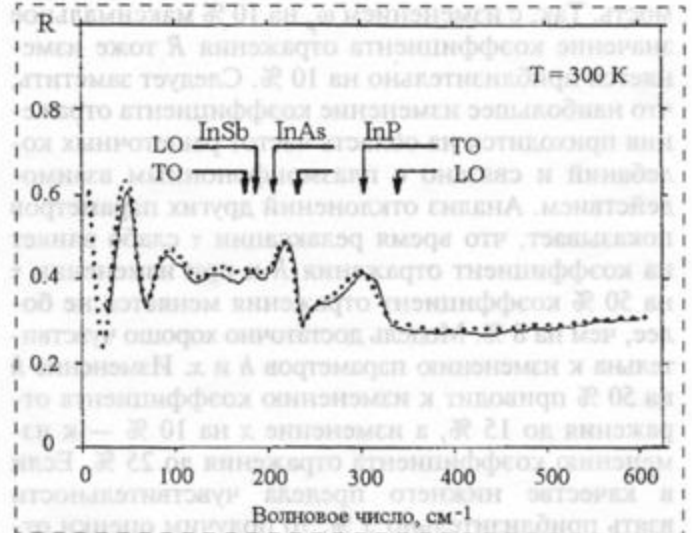


Рис. 2. Спектр оптического отражения эпитаксиальной полупроводниковой структуры  $p\text{-InAs}_{0,63}\text{Sb}_{0,12}\text{P}_{0,25} : \text{Zn}/n\text{-InAs}$  (линия — эксперимент; точки — расчет)

**Параметры слоев полупроводниковой структуры  $p\text{-InAs}_{0,63}\text{Sb}_{0,12}\text{P}_{0,25} : \text{Zn}/n\text{-InAs}$**

$\omega_{p1}, \text{ см}^{-1}$	220
$\omega_{p2}, \text{ см}^{-1}$	55
$\tau_1 \cdot 10^3, \text{ см}$	2,0
$\tau_2 \cdot 10^3, \text{ см}$	0,11
$\gamma_{11}, \text{ см}^{-1}$	16
$\gamma_{12}, \text{ см}^{-1}$	25
$\gamma_{13}, \text{ см}^{-1}$	27
$h_1, \text{ мкм}$	2,2
$h_2, \text{ мкм}$	18

Первая цифра в индексе указывает номер слоя, вторая цифра в индексе — номер осциллятора (для  $\gamma$ ). Заметим, что первый от поверхности слой представляет собой твердый раствор, а второй слой образован в подложке за счет диффузии примеси Zn. Установлено, что толщина первого слоя  $h_1 = 2,2$  мкм, а толщина второго слоя  $h_2 = 18$  мкм. Параметр  $h_2$  определяет период осцилляций в части спектра ниже  $200 \text{ см}^{-1}$ . Осцилляции являются следствием интерференции в слое между областью объемного заряда и эпитаксиальным слоем. По параметру  $h_2 = h_1 + h_2$  можно судить о положении  $p$ - $n$ -перехода в структуре.

Несколько лучшее сходство теоретических и экспериментальных результатов (в сравнении с рис. 2 — примерно на 5 %) достигается при использовании двухслойной модели с градиентными слоями, в которой применяется гиперболическое распределение (17) и характеристическая матрица (18).

Достоверность и точность параметров, получаемых из расчетной модели, оценивалась по чувствительности к параметрам слоя  $\omega_p, \tau, \chi$  и  $h$  на примере структуры  $p\text{-InAs}_{0,63}\text{Sb}_{0,12}\text{P}_{0,25}/n\text{-InAs}$ . К изменению плазменной частоты  $\omega_p$  расчетная модель имеет достаточно высокую чувствительность. При этом наблюдается практически линейная зависи-

мость. Так, с изменением  $\omega_p$  на 10 % максимальное значение коэффициента отражения  $R$  тоже изменяется приблизительно на 10 %. Следует заметить, что наибольшее изменение коэффициента отражения приходится на область частот решеточных колебаний и связано с плазмонфононным взаимодействием. Анализ отклонений других параметров показывает, что время релаксации  $\tau$  слабо влияет на коэффициент отражения  $R$  и при изменении  $\tau$  на 50 % коэффициент отражения меняется не более, чем на 8 %. Модель достаточно хорошо чувствительна к изменению параметров  $h$  и  $x$ . Изменение  $h$  на 50 % приводит к изменению коэффициента отражения до 15 %, а изменение  $x$  на 10 % — к изменению коэффициента отражения до 25 %. Если в качестве нижнего предела чувствительности взять приблизительно 3 %, то получим оценки относительных погрешностей определения параметров. Относительные погрешности определения параметров полупроводникового слоя составляют: для  $\omega_p$  — 3 %, для  $\tau$  — 50 %, для  $x$  — 5 %, для  $h$  — 15 % при выбранных базовых значениях  $\omega_p = 210 \text{ см}^{-1}$ ,  $\tau = 0,03 \text{ см}$ ,  $x = 0,25$ ,  $h = 2,4 \text{ мкм}$ .

Подгоночные параметры, полученные из расчетной модели и приведенные выше, в конечном итоге позволяют получать информацию о таких важных характеристиках полупроводника, как концентрация свободных носителей заряда  $n$  и подвижность  $\mu$  [11]. Значения  $n$  и  $\mu$ , получаемые из оптических спектров путем их моделирования, достаточно хо-

рошо коррелируют со значениями  $n$  и  $\mu$ , получаемыми по результатам измерений ЭДС Холла.

#### Список литературы

1. Бакут П. А., Шумилов Ю. П. Информационные технологии, информационные ресурсы, интеллектуальная собственность — понятия, взаимосвязь, проблемы // Информационные ресурсы России. 1997. № 5. С. 18—19.
2. Бакут П. А., Шумилов Ю. П. Информационные ресурсы — вопросы теории и практика // Информационные ресурсы России. 1999. № 3. С. 18—20.
3. Острейковский В. А. Информатика: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк. 2000. 511 с.
4. Васильев В. А. Оптические спектральные методы формирования информационных ресурсов твердотельных структур // XXVII Международная конференция "Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе". Труды конференции. Ялта, Гурзуф. 2000. С. 182—186.
5. Шумилов Ю. А. Методы создания и анализа информационных ресурсов оптических информационных систем. Докт. дис. М., 1998, 228 с.
6. Баранов А. Н., Васильев В. А., Копылов А. Н., Шерстнев В. В. Оптическое отражение и определение характеристик эпитаксиальных структур  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x\text{P}_y/\text{InAs}$  // ФТП. 1991. Том 25. Вып. 1. С. 99—101.
7. Борн М., Хуан Кунь. Динамическая теория кристаллических решеток. М., 1958. 488 с.
8. Анималу А. Квантовая теория кристаллических твердых тел. М.: Мир, 1981. 574 с.
9. Зингер Г. М., Ипатов И. П., Рыскин А. И. Оптические свойства четверных твердых растворов на основе соединений  $\text{A}^3\text{B}^5$  в области решеточных и плазменных колебаний // ФТП. 1984. Т. 18. Вып. 1. С. 24—42.
10. Якобсон Р. Физика тонких пленок / Под ред. Г. Хасса, М. Франкомба и Р. Гофмана. М.: Мир, 1967. Т. 8. С. 91—151.
11. Васильев В. А. Методика определения параметров полупроводников по спектрам длинноволнового оптического отражения // Материалы V Международной научно-методической конференции "Университетское образование" (МКУО-2001). Пенза, 2001. Ч. 1. С. 70—72.

УДК 62-50

**В. Н. Пилишкин**, канд. техн. наук,  
Московский государственный технический  
университет им. Н. Э. Баумана

## СИСТЕМЫ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

*Показано, как на основе структурно-алгоритмического механизма функционирования можно построить различные структуры систем с интеллектуальными свойствами. Приводятся математические модели этих структур. Рассмотрена возможность синтеза интеллектуального управления с помощью метода вариаций фазовых ограничений.*

### Введение

Развитию сложных технических систем на протяжении последних лет уделяется все возрастающее внимание. Это, очевидно, связано с их ролью

в различных прикладных и научных задачах [1, 2]. К этому классу систем могут быть отнесены объекты микросистемной техники, требующие привлечения новых эффективных методов исследования, которые позволяли бы учитывать особенность функционирования данных объектов и особенности формирования их структур. С увеличением требований, которые предъявляются к системам, и числа ограничений, накладываемых на их переменные и параметры, при росте размерности систем, с учетом неопределенности их функционирования, трудной формализуемости цели управления, а также необходимости обработки информации и формирования управления в реальном времени становится более актуальной разработка систем, обладающих теми или иными элементами интеллекта (систем с интеллектуальными свойствами — СИС). Исследованию этих систем посвящены, в частности, работы [3, 4]. Эффективное применение СИС непосредственно связано с решением таких важных проблем, как формирование математической модели СИС, достаточно точно отображающей ха-

мость. Так, с изменением  $\omega_p$  на 10 % максимальное значение коэффициента отражения  $R$  тоже изменяется приблизительно на 10 %. Следует заметить, что наибольшее изменение коэффициента отражения приходится на область частот решеточных колебаний и связано с плазмонфононным взаимодействием. Анализ отклонений других параметров показывает, что время релаксации  $\tau$  слабо влияет на коэффициент отражения  $R$  и при изменении  $\tau$  на 50 % коэффициент отражения меняется не более, чем на 8 %. Модель достаточно хорошо чувствительна к изменению параметров  $h$  и  $x$ . Изменение  $h$  на 50 % приводит к изменению коэффициента отражения до 15 %, а изменение  $x$  на 10 % — к изменению коэффициента отражения до 25 %. Если в качестве нижнего предела чувствительности взять приблизительно 3 %, то получим оценки относительных погрешностей определения параметров. Относительные погрешности определения параметров полупроводникового слоя составляют: для  $\omega_p$  — 3 %, для  $\tau$  — 50 %, для  $x$  — 5 %, для  $h$  — 15 % при выбранных базовых значениях  $\omega_p = 210 \text{ см}^{-1}$ ,  $\tau = 0,03 \text{ см}$ ,  $x = 0,25$ ,  $h = 2,4 \text{ мкм}$ .

Подгоночные параметры, полученные из расчетной модели и приведенные выше, в конечном итоге позволяют получать информацию о таких важных характеристиках полупроводника, как концентрация свободных носителей заряда  $n$  и подвижность  $\mu$  [11]. Значения  $n$  и  $\mu$ , получаемые из оптических спектров путем их моделирования, достаточно хо-

рошо коррелируют со значениями  $n$  и  $\mu$ , получаемыми по результатам измерений ЭДС Холла.

#### Список литературы

1. Бакут П. А., Шумилов Ю. П. Информационные технологии, информационные ресурсы, интеллектуальная собственность — понятия, взаимосвязь, проблемы // Информационные ресурсы России. 1997. № 5. С. 18—19.
2. Бакут П. А., Шумилов Ю. П. Информационные ресурсы — вопросы теории и практика // Информационные ресурсы России. 1999. № 3. С. 18—20.
3. Острейковский В. А. Информатика: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк. 2000. 511 с.
4. Васильев В. А. Оптические спектральные методы формирования информационных ресурсов твердотельных структур // XXVII Международная конференция "Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе". Труды конференции. Ялта, Гурзуф. 2000. С. 182—186.
5. Шумилов Ю. А. Методы создания и анализа информационных ресурсов оптических информационных систем. Докт. дис. М., 1998, 228 с.
6. Баранов А. Н., Васильев В. А., Копылов А. Н., Шерстнев В. В. Оптическое отражение и определение характеристик эпитаксиальных структур  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x\text{P}_y/\text{InAs}$  // ФТП. 1991. Том 25. Вып. 1. С. 99—101.
7. Борн М., Хуан Кунь. Динамическая теория кристаллических решеток. М., 1958. 488 с.
8. Анималду А. Квантовая теория кристаллических твердых тел. М.: Мир, 1981. 574 с.
9. Зингер Г. М., Ипатов И. П., Рыскин А. И. Оптические свойства четверных твердых растворов на основе соединений  $\text{A}^3\text{B}^5$  в области решеточных и плазменных колебаний // ФТП. 1984. Т. 18. Вып. 1. С. 24—42.
10. Якобсон Р. Физика тонких пленок / Под ред. Г. Хасса, М. Франкомба и Р. Гофмана. М.: Мир, 1967. Т. 8. С. 91—151.
11. Васильев В. А. Методика определения параметров полупроводников по спектрам длинноволнового оптического отражения // Материалы V Международной научно-методической конференции "Университетское образование" (МКУО-2001). Пенза, 2001. Ч. 1. С. 70—72.

УДК 62-50

**В. Н. Пилишкин**, канд. техн. наук,  
Московский государственный технический  
университет им. Н. Э. Баумана

## СИСТЕМЫ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

*Показано, как на основе структурно-алгоритмического механизма функционирования можно построить различные структуры систем с интеллектуальными свойствами. Приводятся математические модели этих структур. Рассмотрена возможность синтеза интеллектуального управления с помощью метода вариаций фазовых ограничений.*

### Введение

Развитию сложных технических систем на протяжении последних лет уделяется все возрастающее внимание. Это, очевидно, связано с их ролью

в различных прикладных и научных задачах [1, 2]. К этому классу систем могут быть отнесены объекты микросистемной техники, требующие привлечения новых эффективных методов исследования, которые позволяли бы учитывать особенность функционирования данных объектов и особенности формирования их структур. С увеличением требований, которые предъявляются к системам, и числа ограничений, накладываемых на их переменные и параметры, при росте размерности систем, с учетом неопределенности их функционирования, трудной формализуемости цели управления, а также необходимости обработки информации и формирования управления в реальном времени становится более актуальной разработка систем, обладающих теми или иными элементами интеллекта (систем с интеллектуальными свойствами — СИС). Исследованию этих систем посвящены, в частности, работы [3, 4]. Эффективное применение СИС непосредственно связано с решением таких важных проблем, как формирование математической модели СИС, достаточно точно отображающей ха-

рактически ее поведения, и построение в соответствии с ней требуемых алгоритмов управления. В данной статье рассматривается возможный подход к решению этих проблем.

**Постановка задачи**

Обозначим рассматриваемую систему через  $D$ . Будем говорить, что  $D$  обладает интеллектуальными свойствами, если у нее имеется собственное представление о характере своего функционирования. На основе этого представления и формируется требуемый закон управления.

С учетом [3, 4] структура системы  $D$ , обладая указанными свойствами, может быть представлена следующим образом (рис. 1).

На рис. 1 используются обозначения:  $D^d$  и  $D^i$  — динамическая и интеллектуальная части СИС;  $x, u, w$  — векторы состояния, управления и возмущения в пространстве состояний  $H$ ;  $q$  — вектор параметров модели  $D^d$ ;  $x^S, u^S, w^S, q^S$  — образы (отображения) векторов  $x, u, w, q$ , формируемые в интеллектуальной среде (ИС)  $S$ ;  $\varphi$  — сигнал образа цели  $C_S$  в среде  $S$ ;  $x_p^S$  — вектор состояния образа динамической модели системы  $D^d$ ;  $E_S$  — блок сравнения сигналов  $x^S, x_p^S$ ;  $\varepsilon^S$  — сигнал рассогласования в среде  $S$ ;  $g^S$  — вектор коррекции образа модели;  $D_S^d$  — образ динамической части СИС в среде  $S$ ;  $K_S$  — оператор коррекции образа модели;  $P_q, P_x$  — операторы отображения из пространства  $H$  в среду  $S$  векторов  $q$  и  $x$ ;  $A_S$  — формирователь вектора управления в среде  $S$ ;  $A$  — преобразователь вектора управления из среды  $S$  в пространстве  $H$ ;  $S$  — интеллектуальная среда, представляющая собой некоторое множество элементов  $s$ , на которых непосредственно осуществляется анализ характера выполнения цели  $C$  и на основе этого — выбор требуемого закона управления.

Требуется сформировать математическую модель СИС, адекватно отражающую ее поведение, и выбрать с учетом этого закон управления, обеспечивающий выполнение поставленной цели  $C$  (т. е. выполнение соотношения  $\varepsilon^S \rightarrow 0$ ).

**Модифицированные структуры систем**

Под целью  $C$ , поставленной перед СИС, в достаточно общем случае будем понимать обеспечение требуемого поведения данной системы в пространстве и во времени. Это можно представить следующим образом:

$$C \Leftrightarrow x(t) \in Q(t) \forall t \geq t_0, \quad (1)$$

где

$$Q(t) = \{x \in H; \psi(x, t) \leq 0\}; \quad (2)$$

$\psi(x, t)$  — непрерывно-дифференцируемая скалярная функция.

Будем также считать, что динамическая часть  $D^d$  описывается уравнением

$$\dot{x} = f^d(x, u, q, w, t); \quad x(t_0) = x_0, \quad t \geq t_0, \quad (3)$$

где  $f^d(\cdot)$  — некоторая заданная вектор-функция.

Поставленную задачу предлагается решать на основе преобразования схемы, представленной на рис. 1, к некоторым, эквивалентным ей по построению и характеру функционирования структурам, а затем путем формирования для каждой из них соответствующих моделей и законов управления.

Необходимо отметить, что построение эквивалентных структур СИС осуществляется с учетом определения всех элементов, показанных на рис. 1, и связано с неоднозначностью представления общей структуры СИС.

Наиболее простая эквивалентная структура приведена на рис. 2.

Другая возможная структура, непосредственно определяемая на основе общей структуры СИС, представлена на рис. 3, где под  $\bar{K}_S$ , понимается блок управления моделью  $D_S^d$ .

Вначале сформируем модель для упрощенной структуры СИС. Для описания  $D^d$  используется

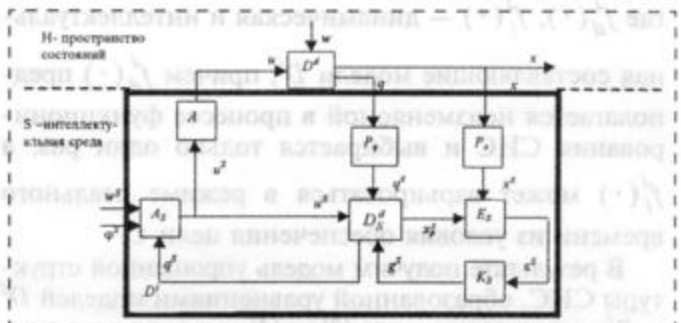


Рис. 1. Общая структура СИС

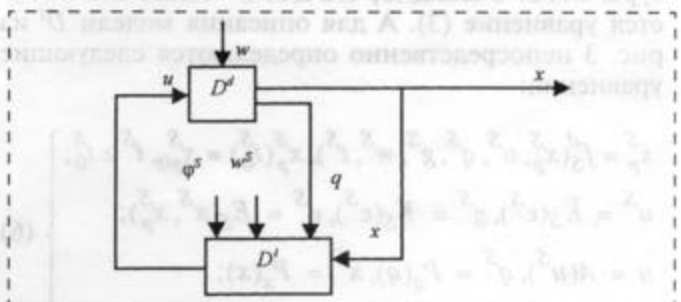


Рис. 2. Упрощенная структура СИС

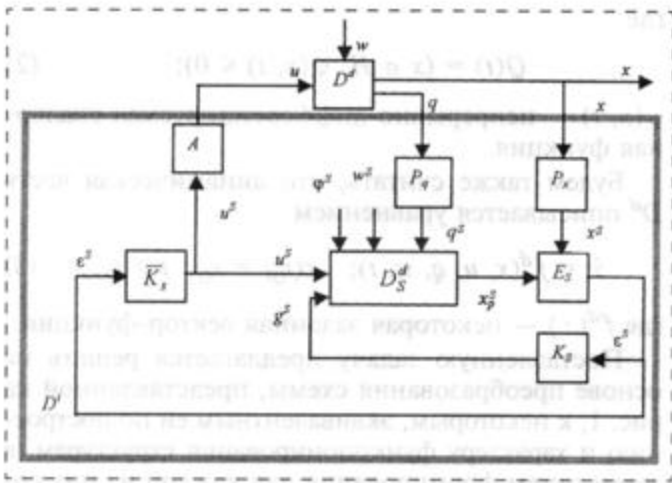


Рис. 3. Модификация обобщенной структуры СИС

уравнение (3), а для описания  $D^i$  предлагается использовать следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} u &= K(y); \\ \dot{y} &= f^i(y, x, u, q, w^S, t), y(t_0) = y_0, t \geq t_0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где вектор-функция  $f^i(\cdot)$  заранее не задана и выбирается из условия обеспечения цели  $C$ ;  $K(y)$  — синтезируемый закон управления;  $y$  — вектор состояния интеллектуальной части. При этом вектор-функция  $f^i(\cdot)$  имеет следующую структуру:

$$f^i(\cdot) = \Phi[f_d^i(\cdot), f_i^i(\cdot)], \quad (5)$$

где  $f_d^i(\cdot)$ ,  $f_i^i(\cdot)$  — динамическая и интеллектуальная составляющие модели  $D^i$ , причем  $f_d^i(\cdot)$  предполагается неизменяемой в процессе функционирования СИС и выбирается только один раз, а  $f_i^i(\cdot)$  может варьироваться в режиме реального времени из условия обеспечения цели  $C$ .

В результате получим модель упрощенной структуры СИС, образованной уравнениями моделей  $D^d$  и  $D^i$  — соответственно (3) и (4).

Сформируем модель модифицированной структуры СИС. Очевидно, что для  $D^d$  также используется уравнение (3). А для описания модели  $D^i$  из рис. 3 непосредственно определяются следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_p^S &= f_S^d(x_p^S, u^S, q^S, g^S, w^S, t^S), x_p^S(t_0^S) = x_{p0}^S, t^S \geq t_0^S; \\ u^S &= \bar{K}_S(\varepsilon^S), g^S = K_S(\varepsilon^S), \varepsilon^S = E_S(x^S, x_p^S); \\ u &= A(u^S), q^S = P_q(q), x^S = P_x(x); \\ t^S &= \mu(t), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\mu(\cdot)$  — некоторая скалярная функция, обеспечивающая ускоренный режим времени в интеллектуальной среде  $S$ ;  $\bar{K}_S$  — оператор формирования управления в ИС среды  $S$  (например, это некоторая вектор-функция);  $f_S^d(\cdot)$  — образ функции  $f^d(\cdot)$  в среде  $S$ .

Уравнения (3) и (6) описывают модель модифицированной структуры СИС.

Решение задачи синтеза предлагается осуществлять в соответствии с разрабатываемым автором методом вариации фазовых ограничений [5]. В соответствии с этим методом для обеспечения цели  $C$  вида (2) для системы (3) достаточно выполнения неравенства

$$\left. \begin{aligned} (\nabla_x \psi, f^d(x, u, q, w, t)) + \frac{\partial \psi}{\partial t} &\leq 0; \\ \forall x \in \Gamma Q(t), t &\geq t_0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\Gamma Q(t)$  — граница множества  $Q(t)$ ;  $\nabla_x \psi$  — градиент функции  $\psi(\cdot)$ ;  $(\nabla_x \psi, f^d(\cdot))$  — скалярное произведение векторов в евклидовом пространстве  $H$ .

Применяя неравенства (7) непосредственно к моделям упрощенной и модифицированной структур СИС, можно синтезировать требуемые законы управления и все элементы интеллектуальной части СИС для достаточно произвольных целей управления.

### Формирование законов управления

Воспользуемся неравенством (7), гарантирующим выполнение допустимого поведения системы, для синтеза требуемых законов управления и восстановления необходимых элементов структуры интеллектуальной части СИС.

Покажем, как задача построения СИС решается в случае ее представления с помощью упрощенной структуры (см. рис. 2). Для этого объединим уравнения (3), (4). Пусть

$$\begin{aligned} z &= [x^T y^T]^T \text{ — вектор состояния СИС;} \\ f(\cdot) &= [(f^d(\cdot))^T (f^i(\cdot))^T]^T \text{ — расширенная вектор-функция.} \end{aligned}$$

В результате объединения получим уравнение СИС

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= f(z, u, q, w, w^S, t); \\ z(t_0) &= z_0, t \geq t_0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где управление  $u$  предлагается искать в виде

$$u = K(z), \quad (9)$$

$K(\cdot)$  — некоторая синтезируемая вектор-функция.

Представим вектор  $y$  следующим образом:

$$y = [y_d^T, y_i^T]^T, \quad (10)$$

где  $y_d, y_i$  — динамическая и интеллектуальная составляющие вектора  $y$ .

На  $y_d$  наложены ограничения, а  $y_i$  может принимать произвольные значения, т. е.

$$y_d \in Q^d(t) \forall t \geq t_0, \quad (11)$$

где

$$Q^d(t) = \{y_d : \psi^d(y_d, t) \leq 0\}. \quad (12)$$

Здесь  $\psi^d(\cdot)$  — некоторая допустимая скалярная функция, которая в общем случае заранее не задана и определяется в процессе синтеза СИС.

Ограничения (1), (2) и (11), (12) объединим в одно, например, следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \bar{z} \in \bar{Q}(t) \forall t \geq t_0; \\ \bar{Q}(t) = \{z : \bar{\psi}(\bar{z}, t) \leq 0\}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где  $\bar{z} = [x^T y_d^T]^T$ ,  $\bar{\psi}(\cdot)$  — некоторая скалярная функция, формируемая так, что

$$\bar{Q}(t) \subseteq Q(t) \times Q^d(t) \forall t \geq t_0. \quad (14)$$

С учетом (8)—(14) на основе (7) получим следующие соотношения для синтеза СИС:

$$\left. \begin{aligned} (\nabla_S \bar{\psi}, f^d(x, u, q, w, t)) + \\ + (\nabla_{y_d} \bar{\psi}, f_d^j(x, y_d, y_i, u, q, w^S, t)) + \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial t} \leq 0, \\ \forall t \geq t_0, \\ \forall \bar{z} \in \Gamma \bar{Q}(t), \\ u = K(x, y_d, y_i). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

На основе (15) синтезируется закон управления  $K(x, y_d, y_i)$ , а также динамическая составляющая  $f_d^j(\cdot)$  интеллектуальной части  $D^j$ . Причем каждому объекту  $D^d$  в соответствии с поставленной целью (2) соответствует своя вполне определенная  $f_d^j(\cdot)$ . Кроме того, интеллектуальная составляющая  $y_i$  вектора  $y$  в неравенстве (15) может выбираться произвольно и иметь произвольный характер изменения, например, в соответствии с уравнением

$$\dot{y}_i = f_i^j(x, y_d, u, q, w^S, t), \quad t \geq t_0, \quad (16)$$

но из учета обеспечения неравенства (15).

Синтезируемое управление можно представить, в частности, в виде

$$u = K(x, y_d, y_i) = K^d(x, y_d) + K^i(y_i), \quad (17)$$

где  $u^d = K^d(x, y_d)$  — управляющее воздействие, соответствующее динамическим свойствам системы;  $u^i = K^i(y_i)$  — управляющее воздействие, формируемое в соответствии с интеллектуальными свойствами системы.

При этом, если  $K^d(x, y_d)$  — вполне определенная вектор-функция, которую требуется найти, то  $K^i(y_i)$  может принимать любые допустимые значения и иметь произвольный характер изменения, т. е. управляющее воздействие  $u^d$  представляет собой в обычном смысле физически реализуемое воздействие и формируется по принципу обратной связи от векторов состояния реальных динамических частей, а управляющее воздействие  $u^i$  является виртуальным (воображаемым) воздействием со стороны интеллектуальной части на динамическую часть системы и формируется произвольным образом в интеллектуальной среде, исходя из обеспечения неравенства (15). В этом собственно и состоит особенность интеллектуального управления объектом.

Расчет СИС на основе структуры, представленной на рис. 3, во многом аналогичен приведенному.

### Формализация цели управления

Полученные выше соотношения могут эффективно использоваться при разработке алгоритмов управления СИС самого различного направления. Для этого необходимо формулируемую перед СИС цель  $S$  представить в виде, аналогичном соотношениям (1), (2). В соответствии с развиваемой автором концепцией функционально-множественной принадлежности (ФМП) [5] подобное представление возможно в достаточно общем случае.

Концепцию ФМП можно сформулировать следующим образом. Если некоторый динамический объект рассматривается в пространстве состояний, то произвольно поставленную перед ним цель управления можно представить в виде тех или иных функциональных соотношений, которым должен удовлетворять вектор состояния объекта.

В данной статье показывается, что, например, если цель управления — обеспечение объектом некоторых терминальных условий либо обеспечение желаемого поведения объекта во времени и в пространстве (реализация программного поведения), то ее всегда можно привести к виду (1), (2). При этом вся проблема сводится к формализованному описанию множества  $Q(t)$ . В этом случае при формировании множества  $Q(t)$  в зависимости от назначения СИС дополнительно могут учитываться различные ограничения на качество (эффективность) ее работы. Это осуществляется на основе

некоторой допустимой пространственно-временной деформации множества  $Q(t)$ .

\*\*\*

Предложенный в данной статье подход позволяет строить модели многочисленных СИС и формировать эффективные законы управления при самых различных целях. При этом в силу неоднородности представления общей структуры СИС возможны те или иные ее модификации. Дальнейшие исследования в этом направлении связаны с построением динамической модели формирования закона управления в интеллектуальной среде  $S$  для общей структуры СИС, исходя из данной цели, и построением для этого случая модели всей СИС.

## МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 666.655

**А. Н. Рыбьянец**, канд. техн. наук,  
**В. П. Сахненко**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
НИИ физики Ростовского государственного университета

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ЗА РУБЕЖОМ

*Выполнен анализ современного состояния и перспектив R&D в области пьезокерамических материалов и устройств. Представлены данные о новых материалах, методах получения и применениях пьезокерамических материалов. Рассмотрены основные тенденции мирового рынка пьезокерамики.*

#### Введение

В статье представлена информация, полученная в результате анализа обзора патентной литературы [1], опубликованных опросов ведущих специалистов в области разработки и производства пьезокерамики [2], а также отчетов по европейским проектам [3, 4], обзорных статей [5, 6] и материалов семинаров и симпозиумов [7–10], посвященных пьезоэлектрической керамике.

Рынок пьезокерамики в настоящее время характеризуется широким использованием традици-

#### Список литературы

1. **Lauriere J.-L.** Intelligence Artificielle, C. F. Picard-Paris, Troisieme Edition, Eurolles. Paris, 1987.
2. **Янг Дж. Ф.** Робототехника. Л.: Машиностроение, 1979. 300 с.
3. **Pilishkin V. N.** Control Algorithms of Complex Systems of the Base of Situation's Reflexions in Intelligent Environment // International Conference on Artificial and Computational Intelligence for Decision, Control and Automation in Engineering and Industrial Applications "ACIDCA'2000", Monastir, Tunisia, 2000.
4. **Pilishkin V. N.** General Dynamic Model of the System with Intelligent Properties in Control Tasks // 15<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Intelligent Control ISIC 2000, University of Patras Rio, Greece, 2000.
5. **Pilishkin V. N., Pupkov K. A.** Robust Control System Design using Phase-Constraints Variation Approach // Proceedings of the European Control Conference, Karlsruhe, Germany, 1999.

онных составов на основе цирконата титаната свинца (PZT) с незначительной, но важной долей составов на основе цирконата титаната свинца-лантана, метаниобата свинца, титаната бария, магнониобата и титаната свинца.

Основными областями применения пьезокерамики остаются радиотехническая и телекоммуникационная промышленность, неразрушающий контроль (НРК) и диагностика, гидроакустика, технологический ультразвук, автомобильная промышленность, медицинская и бытовая техника.

В рамках каждой из упомянутых отраслей промышленности существует постоянный стимул к разработке новых более эффективных, надежных и экологически безопасных материалов. Необходимость в новых материалах обусловлена все возрастающими требованиями к надежности систем и устройств, а также появлением новых областей применения.

Рынок пьезоэлектрической керамики контролируется в основном компаниями США и Японии при небольшом, но важном присутствии европейских компаний и растущем присутствии компаний Кореи, Сингапура и Китая.

Разнообразие применений затрудняет количественную оценку рынка пьезокерамики, тем не менее можно отметить, что рынок пьезокерамических компонентов в США в 1994 г. по самым скромным оценкам составлял 128 млн долл. при 10 %-ном годовом росте. Японский рынок пьезокерамических компонентов существенно превышает 500 млн долл. в год.

некоторой допустимой пространственно-временной деформации множества  $Q(t)$ .

\*\*\*

Предложенный в данной статье подход позволяет строить модели многочисленных СИС и формировать эффективные законы управления при самых различных целях. При этом в силу неоднородности представления общей структуры СИС возможны те или иные ее модификации. Дальнейшие исследования в этом направлении связаны с построением динамической модели формирования закона управления в интеллектуальной среде  $S$  для общей структуры СИС, исходя из данной цели, и построением для этого случая модели всей СИС.

## МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 666.655

**А. Н. Рыбьянец**, канд. техн. наук,  
**В. П. Сахненко**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
НИИ физики Ростовского государственного университета

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ЗА РУБЕЖОМ

*Выполнен анализ современного состояния и перспектив R&D в области пьезокерамических материалов и устройств. Представлены данные о новых материалах, методах получения и применениях пьезокерамических материалов. Рассмотрены основные тенденции мирового рынка пьезокерамики.*

#### Введение

В статье представлена информация, полученная в результате анализа обзора патентной литературы [1], опубликованных опросов ведущих специалистов в области разработки и производства пьезокерамики [2], а также отчетов по европейским проектам [3, 4], обзорных статей [5, 6] и материалов семинаров и симпозиумов [7–10], посвященных пьезоэлектрической керамике.

Рынок пьезокерамики в настоящее время характеризуется широким использованием традици-

#### Список литературы

1. **Lauriere J.-L.** Intelligence Artificielle, C. F. Picard-Paris, Troisieme Edition, Eurolles. Paris, 1987.
2. **Янг Дж. Ф.** Робототехника. Л.: Машиностроение, 1979. 300 с.
3. **Pilishkin V. N.** Control Algorithms of Complex Systems of the Base of Situation's Reflexions in Intelligent Environment // International Conference on Artificial and Computational Intelligence for Decision, Control and Automation in Engineering and Industrial Applications "ACIDCA'2000", Monastir, Tunisia, 2000.
4. **Pilishkin V. N.** General Dynamic Model of the System with Intelligent Properties in Control Tasks // 15<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Intelligent Control ISIC 2000, University of Patras Rio, Greece, 2000.
5. **Pilishkin V. N., Pupkov K. A.** Robust Control System Design using Phase-Constraints Variation Approach // Proceedings of the European Control Conference, Karlsruhe, Germany, 1999.

онных составов на основе цирконата титаната свинца (PZT) с незначительной, но важной долей составов на основе цирконата титаната свинца-лантана, метаниобата свинца, титаната бария, магнониобата и титаната свинца.

Основными областями применения пьезокерамики остаются радиотехническая и телекоммуникационная промышленность, неразрушающий контроль (НРК) и диагностика, гидроакустика, технологический ультразвук, автомобильная промышленность, медицинская и бытовая техника.

В рамках каждой из упомянутых отраслей промышленности существует постоянный стимул к разработке новых более эффективных, надежных и экологически безопасных материалов. Необходимость в новых материалах обусловлена все возрастающими требованиями к надежности систем и устройств, а также появлением новых областей применения.

Рынок пьезоэлектрической керамики контролируется в основном компаниями США и Японии при небольшом, но важном присутствии европейских компаний и растущем присутствии компаний Кореи, Сингапура и Китая.

Разнообразие применений затрудняет количественную оценку рынка пьезокерамики, тем не менее можно отметить, что рынок пьезокерамических компонентов в США в 1994 г. по самым скромным оценкам составлял 128 млн долл. при 10 %-ном годовом росте. Японский рынок пьезокерамических компонентов существенно превышает 500 млн долл. в год.



Рынок систем и устройств, основанных на пьезоэлектрической керамике, значительно больше, что и обуславливает важность этих материалов. Современный мировой рынок медицинских диагностических систем составляет более 4,5 млрд долл. в год, причем доля ультразвуковых преобразователей достигает 10—15 %. Европейский рынок преобразователей для НРК составляет приблизительно 130 млн долл. в год (более 50 % этого рынка занимают широкополосные преобразователи на основе метаниобата свинца). Мировой рынок гидроакустических устройств составляет в настоящее время 650 млн долл. в год, причем потенциальный рынок гидроакустических преобразователей составляет 90 млн долл. в год.

За последнее десятилетие на рынке пьезокерамики произошли существенные изменения, явившиеся результатом длительных научно-исследовательских (R&D) и технологических усилий и связанные с промышленным освоением и коммерциализацией 1—3 композитных материалов, пьезокерамик и пьезокристаллов на основе релаксорных сегнетоэлектриков, а также со все более широким использованием керамик на основе метаниобата свинца и растущим интересом к бессвинцовым пьезокерамикам.

### Материалы на основе релаксоров

Поиск альтернатив PZT-составам, расположенным вблизи морфотропной фазовой границы, привел исследователей к ревизии релаксорных материалов, открытых советскими учеными в 50-х годах [11], которые представляют собой сложные перовскиты с общей формулой  $Pb(B_1, B_2)O_3$ , где ( $B_1$ : Zn, Mg, Sc, Ni...;  $B_2$ : Nb, Ta, ...). В ряде случаев эти материалы демонстрируют лучшие пьезоэлектрические и диэлектрические свойства по сравнению с PZT-составами. Однако при корректном сопоставлении с учетом температуры Кюри эти преимущества оказываются незначительными. Фирма *EDO Ceramics* (США) предлагает керамику магнониобата свинца ЕС-98, основные параметры которой приведены ниже:

$\rho$ , г/см <sup>3</sup> . . . . .	7,85
$T_c$ , °С . . . . .	170
$Q_M$ . . . . .	70
$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$ . . . . .	5500
$tg\delta$ . . . . .	<0,02
$d_{33}$ , пКл/Н . . . . .	730
$d_{31}$ , пКл/Н . . . . .	-312
$k_{33}$ . . . . .	0,72
$k_{31}$ . . . . .	0,35
$S_{33}^E$ , м <sup>2</sup> /Н . . . . .	$2,1 \cdot 10^{-11}$

Было установлено [12], что в монокристаллическом виде материалы релаксор-титанат свинца,

описываемые формулами  $Pn(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - PbTiO_3$  (цинкониобат свинца — титанат свинца) и  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - PbTiO_3$  (магнониобат свинца — титанат свинца), демонстрируют уникальные электромеханические свойства, привлекательные для использования в актюаторах с высокой плотностью энергии и в ультразвуковых преобразователях.

Фирма *TRS Ceramics Inc.* (США) предлагает монокристаллические сегнетоэлектрики на основе указанных выше составов размером  $5 \times 5 \times 0,5$  мм по цене 400—500 долл. за 1 шт. Параметры кристаллов TRS-A приведены ниже.

$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$ . . . . .	5000
$tg\delta$ . . . . .	0,01
$d_{33}$ , пКл/Н . . . . .	2200
$d_{31}$ , пКл/Н . . . . .	-1000
$k_{33}$ . . . . .	0,92
$k_{31}$ . . . . .	0,56
$k_t$ . . . . .	0,43
$S_{33}^E$ , м <sup>2</sup> /Н . . . . .	$10 \cdot 10^{-11}$
$S_{11}^E$ , м <sup>2</sup> /Н . . . . .	$6,5 \cdot 10^{-11}$
$\rho$ , г/см <sup>3</sup> . . . . .	8

Дальнейшая коммерциализация монокристаллических пьезоэлектриков зависит в первую очередь от разработки высокопроизводительных методов роста, а также совершенствования технологии обработки крупногабаритных кристаллов.

### 1—3 композиты

Промышленное освоение 1—3 композитных материалов и их интенсивное использование в ультразвуковых преобразователях потребовало преодоления не только технологических проблем (замена малопроизводительного метода резки и заполнения методом литья под давлением [13]), но и психологической ломки традиционных представлений технологов и разработчиков керамических материалов и преобразователей. Чтобы отказаться от предшествующей тенденции к изготовлению высокоплотных и совершенных в химическом и структурном отношении керамических материалов и перейти к получению и использованию "несовершенных" низкоплотных и дефектных материалов (пористые керамики, керамики на основе метаниобата свинца, 1—3 композиты), потребовалось достаточно длительное время. Коммерциализация композитных материалов привела также к разработке новых концепций в конструировании ультразвуковых преобразователей, в качестве примера которых можно отметить НИ-технологии силовых ультразвуковых преобразователей фирмы *Imasonic* (Франция) с использованием 1—3 композитных материалов.

Рынок композитных материалов, к сожалению, пока весьма ограничен. Многие крупные компании,

например, *Krautkramer* (Германия), *Morgan Matroc Ltd.* (Великобритания), *Krautkramer Branson* (США) активно используют эти материалы в собственных устройствах, но не предлагают на рынке.

В настоящее время ряд компаний предлагают 1—3 композит в виде элементов или заготовок преобразователей по специальному заказу. *Imasonic* (Франция) наряду с готовыми преобразователями продает 1—3 композитные элементы для работы в частотном диапазоне от 250 кГц до 17 МГц. *Blatek Inc.* (США) предлагает 1—3 композитные пластины площадью до 2 кв. дюймов с рабочими частотами до 10 МГц. Высокая стоимость (более 100 долл. за стандартный элемент) и ограниченные поставки пластин объясняются использованием дорогостоящего и малопродуктивного метода резки и заполнения.

Компания *Materials Systems Inc.* (США) предлагает широкий спектр пьезокомпозитных материалов со связностью 1—3, 0—3 и 2—2, выпускаемых под маркой *SonoPanel™*, которые предназначены для использования в гидроакустических и медицинских преобразователях, а также в актуаторах. Отличительной особенностью этих композитов является использование более производительного метода литья под давлением, допускающего относительно массовое изготовление композитных пластин размером до 25 × 25 см на частоты от 250 кГц до 10 МГц.

### Пьезокерамики на основе метаниобата свинца

Уникальные свойства метаниобата свинца, в первую очередь низкая механическая добротность и высокая температура Кюри, делают этот материал оптимальным для применения в широкополосных ультразвуковых преобразователях, работающих в экстремальных эксплуатационных условиях. В настоящее время все широкополосные преобразователи для неразрушающего контроля и диагностики изготавливаются из пьезокерамики на основе метаниобата свинца, монопольным поставщиком ко-

торой являются компании США. Единственной европейской фирмой, предлагающей пьезокерамику на основе метаниобата свинца, по-видимому, является *Ferroperm* (Дания). В связи с тенденцией к замене узкополосных преобразователей широкополосными, обусловленной быстро растущими требованиями к качеству и разрешению диагностических систем (контроль трубопроводов и изделий сталелитейной промышленности), ожидается существенный рост потребления пьезокерамики метаниобата свинца.

Стоимость пьезоэлементов из керамики метаниобата свинца в среднем в 1,5 раза выше, чем PZT аналогов, что связано в первую очередь с технологической сложностью производства. В таблице приведены основные параметры пьезокерамик на основе модифицированного метаниобата свинца, предлагаемых различными фирмами США.

### Бессвинцовая керамика

Потребность в бессвинцовых пьезокерамиках определяется главным образом все большим осознанием экологических проблем. Однако сомнительно, что какая-либо новая пьезокерамическая система, не содержащая свинца, будет найдена в ближайшее время. Поэтому исследования в настоящее время концентрируются на известных материалах. Разработка бессвинцовых керамик на основе  $(\text{Na}, \text{K})\text{NbO}_3$  и  $(\text{Na}, \text{Li})\text{NbO}_3$  является предметом ряда европейских проектов [3, 4]. Исследования по бессвинцовым пьезоэлектрикам, выполненные в университетах США [14] и Японии [15], позволили определить полезные пьезоэлектрические композиции в системе  $(\text{Na}_{1-x}\text{Bi}_x)\text{TiO}_3$  [15]. Другими кандидатами среди бессвинцовых систем являются перовскиты  $(\text{Na}, \text{K})\text{NbO}_3$ , слоистые висмутсодержащие соединения  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$  и вольфрамовые бронзы  $(\text{Sr}, \text{Ba})\text{Nb}_2\text{O}_6$ . Однако сомнительно, что керамики этих систем будут иметь пьезоэлектрические свойства, хотя бы близкие к свойствам PZT системы.

Параметр	K81	K85	BM900	BM940	EBL1M	EBL4LM
	Keramos Inc.		Sensor Technology Ltd.		Staveley Sensors Inc.	
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	6,2	5,7	6	5,8	6	5,6
$T_c$ , °C	400	300	490	280	450	400
$Q_M$	15	15	15	15	15	15
$\tau_{33}/\epsilon_0$	300	800	300	700	300	700
$\text{tg}\delta$	0,01	0,025	0,01	0,01	0,01	0,02
$d_{33}$ , пКл/Н	85	180	75	150	85	160
$g_{33}$ , мВ/Н	$32 \cdot 10^{-3}$	$27 \cdot 10^{-3}$	$32 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$35 \cdot 10^{-3}$	$26 \cdot 10^{-3}$
$k_{33}$	—	—	0,35	0,42	—	—
$k_t$	0,3	0,35	—	—	—	—
$S_{33}^E$ , м <sup>2</sup> /Н	—	—	$2,1 \cdot 10^{-11}$	$2,1 \cdot 10^{-11}$	—	—
$N_p$ , кГц · мм	1530	1620	1450	1900	1575	1650
$Z_A$ , Мгауl	19	24,5	17,5	22	19	18,5

## Анализ патентной литературы

Наибольшую активность в области патентования пьезокерамических материалов и устройств (микропозиционеры, гидрофоны, сонары, композиты, ПАВ-устройства) проявляют исследовательские лаборатории Министерства Обороны США ("DOD") и финансируемые им университеты. Среди частных компаний, получивших наибольшее число патентов США, доминируют японские компании, в первую очередь *Murata* (гироскопы, зуммеры, акселерометры, биморфные актюаторы). Среди американских компаний, получивших наибольшее число патентов — *Hewlett-Packard* и *General Electric* (ультразвуковые преобразователи для биомедицинских применений). Американские компании доминируют в области биомедицинских применений пьезокерамики (ультразвуковые преобразователи, медицинские системы визуализации, устройства "доставки" лекарств и хирургические инструменты).

Применение пьезокерамических актюаторов в картриджах струйных принтеров было предметом значительной патентной активности и недавнего коммерческого успеха. Наиболее активными разработчиками таких устройств были *IBM* и *Compaq* в США и *Brothers* и *Seiko-Epson* в Японии. Успешная разработка японскими компаниями (*NEC*, *Matsushita*, *Seiko-Epson*, *Canon* и *Olympus*) ультразвуковых моторов, используемых в фотокамерах и других специализированных оптических системах, также позволила достичь существенного рыночного успеха.

Японскими компаниями (*NEC*, *Fujitsu* и *Toshiba*) получено несколько патентов на пьезотрансформаторы. Это применение имеет значительный коммерческий потенциал, поскольку успешная разработка пьезотрансформаторов должна позволить миниатюризировать дисплеи с плоским экраном.

Множество патентов было выдано компаниям Японии и США, занятым в автомобильной индустрии, где пьезокерамика продолжает находить новые применения в качестве сенсоров, например, в антиблокировочных системах торможения. Японские компании, в частности *Murata*, были активны в разработке пьезоэлектрических гироскопов, которые могут найти применение в автомобильных системах управления (глобального позиционирования). Несколько автомобильных компаний (*General Motors*, *Ford*, *Caterpillar* в США и *Toyota*, *Nissan* и *Honda* в Японии) были активны в разработке многослойных пьезоэлектрических актюаторов для систем инъекции топлива. Большинство этих патентов были опубликованы в начале 90-х годов, однако технология до сих пор не была коммерциализирована вследствие сложности снижения стоимости изготовления многослойных актюаторов даже при больших объемах производства, которые эти применения могут обеспечить.

Относительно новой разработкой в США являются микроэлектромеханические системы (MEMS) запатентованные компаниями *IBM*, *Rockwell* и *Массачусетским Технологическим Институтом*. Предполагаемыми применениями MEMS являются биомедицинские устройства, полупроводниковая промышленность и робототехника.

Несколько патентов было получено на "интеллектуальные" системы, т. е. системы, в которых пьезоэлектрические сенсоры и актюаторы интегрированы в композитный материал или структуру. Разработка "интеллектуальных" систем интенсивно финансируется правительством США в связи с некоторыми предполагаемыми военными аэрокосмическими применениями (например, подавление вибрации, обработка данных и структурный мониторинг состояния организма).

## Взгляд из Японии

Результаты опроса японских технологов, занятых в области исследования, разработки и изготовления электронной керамики, проведенного с целью предсказать будущие тенденции R&D [2], показали следующие результаты.

- Среди наиболее значительных недавних разработок в области пьезокерамики отмечены актюаторы, гироскопы, картриджи струйных принтеров, миниатюрные пьезоустройства и т. п. Среди материалов и методов получения отмечены пьезоэлектрики на основе скандата-ниобата свинца, монокристаллы с высокой электрохимической связью и гидротермальный метод синтеза. Упомянута также разработка бессвинцовых керамик, хотя эта область R&D находится в зародышевом состоянии. Большинство разработок, указанных в отзывах, вносят вклад в снижение стоимости изготовления, миниатюризацию компонентов, возможность создания новых или совершенствования существующих изделий, сбережение энергии, формирование экологического сознания.
- Среди перспективных применений пьезоэлектрической керамики указаны устройства сенсор/актюатор, пьезотрансформаторы, актюаторы для систем инъекции топлива, пьезоэлектрические гироскопы, дешевые пьезодвигатели, высокочастотные пьезоэлектрические резонаторы, пьезоустройства для контроля шума и вибрации. Большинство указанных применений требует разработки более дешевых и производительных методов синтеза и изготовления пьезокерамики, обеспечивающих лучшие характеристики и надежность по сравнению с существующими. Отмечается также растущая значимость экологических аспектов.
- В качестве наиболее значительной предполагаемой разработки в ближайшие 5—10 лет указаны дешевые методы изготовления многослойных пьезоэлектрических актюаторов, композитные преобразователи, дешевые методы их изготовления, произ-

водства композитных материалов, ультразвуковые актюаторы и миниатюрные электронные схемы для актюаторов. Отмечена также возрастающая роль совершенствования методов производства и контроля керамических материалов.

- Среди применений с уменьшающейся значимостью отмечены гидрофоны, биморфы и ультразвуковые моторы. Ожидается также постепенное снижение роли свинецсодержащих материалов.
- Основными экологическими факторами, влияющими на разработку и коммерциализацию новых материалов, по мнению респондентов, являются сокращение использования токсичных материалов (главным образом свинца, оксида свинца, а также висмута, кадмия и никеля), сохранение природных ресурсов, экологически чистых источников и сбережение энергии. Среди экономических факторов отмечены стоимость изготовления, миниатюризация, время и стоимость разработки, а также соответствие темпа разработок рыночным требованиям.
- Основными требованиями для коммерциализации новой продукции являются стоимость производства, согласования R&D с потребностями рынка, соотношение качество/цена, маркетинг, экологическое сознание, сокращение времени разработки, фундаментальные исследования, кооперация в исследованиях, миниатюризация, а также новые материалы, качество управления, патентование и новые концепции конструирования устройств.

### Перспективы применения пьезокерамики

Современное производство пьезокерамики основано главным образом на PZT составах и использовании традиционных методов смешивания (шаровые мельницы) и синтеза. PZT составы приемлемы для большинства современных применений пьезокерамики от зуммеров, фильтров, зажигалок и ультразвуковых моек до буксируемых сонарных решеток, систем медицинской визуализации, картриджей струйных принтеров, затворов фотокамер, позиционеров для оптических систем, сенсоров и ультразвуковых преобразователей различного назначения.

Технология многослойных пьезоэлектрических актюаторов была использована для некоторых массовых серийных автомобильных применений (системы впрыска топлива, системы подвески). Коммерциализация этих применений была ограничена трудностями достижения необходимых характеристик и надежности при приемлемой стоимости производства. По этой причине предыдущие предсказания [16] аномального роста рынка пьезоэлектрических актюаторов оказались ошибочными и не материализовались. По-видимому, многослойная керамическая технология, обеспечивающая производство конденсаторов стоимостью несколько центов за штуку, не транслируется непосредственно на изготовление дешевых многослойных актюаторов.

Несмотря на трудности снижения стоимости, необходимого для серийного производства, пьезо-керамика продолжает находить новые применения в мелкосерийных специализированных применениях, где относительно высокая стоимость может быть приемлема. Примерами являются позиционирующие головки для магнитной записи [17], сканирующая тоннельная микроскопия [18], устройства считывания штрих-кодов [19], сенсоры для антиблокировочных систем торможения [20], тонерный сенсор для лазерных принтеров [21], ультразвуковое устройство для заживления костей [22]. По-видимому, некоторые специализированные биомедицинские применения также способны воспринять высокую стоимость пьезокерамических материалов. Например, недавно полученные пьезоэлектрические монокристаллы [23] могут быть использованы в новых поколениях ультразвуковых систем изображения.

Перспектива разработки "интеллектуальных" материалов [24, 25], обеспечивающих одновременно функции сенсора и актюатора, также стимулировала разработку пьезоэлектрических, электрострикционных и других активных материалов. Одним из "интеллектуальных" применений пьезо-керамики является система подвески автомобилей экстра-класса [26].

### Новые методы изготовления

Литье под давлением было разработано в качестве дешевого метода изготовления композитов керамика — полимер [13]. Предполагаемые применения включали решетки преобразователей для ультразвуковых систем визуализации и решетки преобразователь — актюатор для систем подавления вибрации. Более высокие рабочие частоты и, следовательно, меньшие характерные размеры требуются для повышения разрешающей способности ультразвуковых систем изображения. При уменьшении характерного размера до 50 мкм и ниже основным требованием при изготовлении становится механическая прочность.

Использование новых методов синтеза и обработки для получения мелкозернистых микроструктур является плодотворным подходом для улучшения механических свойств при условии обеспечения эквивалентных пьезоэлектрических свойств.

Миниатюрные пьезокерамические трансформаторы [27] были разработаны на основе сегнето-жестких керамик для дисплеев с плоским экраном и других применений, связанных с компьютерами. Потребность в массовом производстве пьезо-керамических материалов с высокой механической добротностью и высокими возбуждающими напряжениями могут потребовать использования новых методов получения керамики.

Методы химического синтеза были успешно использованы для получения конденсаторных ди-

электриков и, несмотря на более высокую стоимость порошков, обеспечили значительные преимущества — получение более тонких слоев и возможность нанесения никелевых электродов. Гидротермальный синтез [28, 29] и другие современные методы [30] также были предложены для получения пьезокерамики. Однако, несмотря на перспективу улучшения параметров и надежности, ни один из методов не вышел за рамки модельных оценочных этапов.

Директивное внедрение бессвинцовых пьезоэлектрических керамик может потребовать значительных R&D для выбора подходящих пьезоэлектрических составов и разработки методов производства этих новых материалов [31]. Кроме того, разработчики систем будут вынуждены согласиться с малой пьезоэлектрической деформацией и сконцентрироваться на подходах, обеспечивающих увеличение деформаций. Примерами недавно коммерциализированных технологий увеличения деформаций являются актюаторы типа "rainbow" [32] и "moonies" [33].

### Выводы и перспективы

- ♦ Существуют значительные различия в структуре R&D в области электронной керамики в США и Японии. В США большинство R&D финансируется правительством и ориентировано на удовлетворение конкретных военных потребностей. В Японии исследования электронной керамики практически полностью поддерживаются крупными промышленными компаниями и ориентированы на конкретную продукцию. В США активными заявителями патентов по электронной керамике являются университеты, предприятия малого бизнеса и правительственные лаборатории. В Японии патенты выдаются практически исключительно промышленным компаниям.
- ♦ Аномального роста применений многослойных пьезоэлектрических актюаторов и ультразвуковых двигателей не произошло вследствие трудностей в снижении стоимости изготовления при серийном производстве. Если дешевые методы производства пьезокерамических устройств не будут разработаны, этот рынок будет ограничен мелкосерийными специализированными применениями.
- ♦ Медицина и аэрокосмическая промышленность являются перспективными областями роста применения пьезокерамики, особенно в США. Пьезокерамика будет продолжать использоваться в диагностическом оборудовании и хирургических инструментах, где может быть воспринята относительно высокая стоимость, связанная с мелкосерийным производством специализированных пьезокерамических компонентов.
- ♦ Наблюдается растущее осознание экологических и энергетических проблем, связанных с элек-

тронной керамикой в Японии и Европе, но не в США. Это может привести к смещению приоритетов для будущих R&D в области электронной керамики. Новые экологические правила могут привести к ограничению использования современных материалов (PZT пьезокерамик, свинецсодержащих релаксорных диэлектриков и т. п.) и к разработке альтернативных материалов (бессвинцовых пьезоэлектриков, припоев и пр.). Также ожидается разработка экологически безопасных процессов изготовления керамик [6].

- ♦ Ожидается сокращение времени разработки пьезокерамических изделий при одновременном уменьшении ресурсов, доступных для R&D. Это потребует существенной концентрации ресурсов R&D для разработки конкретных изделий. Возрастающий акцент на маркетинг и исследование рынка будет необходим для согласования ограниченных R&D ресурсов с рыночными потребностями.

Оценки подтверждают, что пьезокерамика будет оставаться плодородной областью для будущих R&D.

### Список литературы

1. Scott L. Swartz, Thomas R. Shrout, Tadashi Takenaka // Electronic Ceramics R&D in the U. S., Japan. Part I: Patent History. The American Ceramic Society Bulletin. August 1997. Vol. 76. N 7.
2. Scott L. Swartz, Thomas R. Shrout, Tadashi Takenaka // Electronic Ceramics R&D in the U. S., Japan. Part I: Patent History. The American Ceramic Society Bulletin, August 1997. Vol. 76. N 8.
3. Synthesis Report, BREU/CN9200254. New Piezoelectric Ceramics with  $T_c > 1000^\circ\text{C}$  for operation to  $800^\circ\text{C}$ . 1995. P. 1–15.
4. CRAFT-program "Lead-free piezoelectric ceramics based on alkaline niobate family". 1998.
5. Shrout T. R. and Swartz D. L. Processing of Ferroelectric and Related Materials: A Review // Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, IEEE, Piscataway, N. J., 1992. P. 80–88.
6. Wasa K. // Materials Engineering for a Better Global Environment, Bull. Mater. Sci. 1995. Vol. 18. N 8. P. 937–953.
7. International Symposia on Applications of Ferroelectrics (biannual, 1969 to present).
8. International Symposia on Integrated Ferroelectrics (annual, 1989 to present).
9. United States—Japan Seminars on Dielectric and Piezoelectric Ceramics (biannual, 1985 to present).
10. Office of Naval Research Transducer Materials Workshops (annual, 1990 to present).
11. Smolenski G. A., Isupov V. A., Agronovskaja A. I., Popov N. B. // Ferroelectrics with diffuse phase transitions, Sov. Phys. Solid. State. May 1961. P. 2584–2594.
12. Seung-Eek Park, Thomas R. Shrout // Characteristics of relaxor-based piezoelectric single crystals for ultrasonic transducers. IEEE Trans. Ferroelectrics and Frequency Control, September 1997. Vol. 44. P. 1140–1147.
13. Bowen L. J. // Method for Making Piezoelectric Ceramic/Polymer Composite Transducers, U. S. Pat, 1994. N. 5.340.510. Aug. 23.
14. Tumer R. C. et al. // Materials for High-Temperature Acoustic and Vibration Sensors. Appl. Acoustics. 1994. Vol. 41. P. 299–324.
15. Takenaka et al. // Piezoelectric Properties of  $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{TiO}_2$ -Based Ceramics, Ferroelectrics. 1990. Vol. 106. P. 375–380.
16. Uchino K. // Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors. Kluwer, Boston, Mass., 1997.
17. McClure R. J. // Piezoelectric Driven Mass Storage. U. S. 1987. Pat. No. 4.636.893.
18. Nishioka T. // Fine Adjustment Mechanism for Scanning Tunneling Microscope. U. S. Pat. 1990. N 4.945.235. July 31.
19. Drucker S. H. // Method and Apparatus for Self-Referencing and Self-Focusing a Bar-Code Reader, U. S. Pat. 1989. N 4.818.886. Apr. 4.

20. Testardi D. A. // High-Performance Anti-Lock Brake System for Original Equipment and After-Market Applications. U. S. Pat. 1991. N 5.067.778. Nov. 26.
21. Sonnenberg S. et al. // Piezoelectric Sensor for in situ Monitoring of Electrostatographic Developers. U. S. Pat. 1996. N 5.532.802. July 2.
22. Kaufman J. J. et al. // Ultrasonic Bone-Therapy Apparatus and Method. U. S. Pat. 1996. N 5.547.459. Aug. 20.
23. Saitoh et al. // Piezoelectric Single Crystal. Ultrasonic Probe, and Array-Type Ultrasonic Probe. U. S. Pat. 1995. N. 5.402.791. Apr. 4.
24. Newham R. E. and Ruschau G. R. // Smart Electroceramics. Am. Ceram. Soc. 1991. Vol. 74. N 3. P. 463—480.
25. Rogers C. A. // Intelligent Materials. Sci. Am. Sept. 1995. P. 154—157.
26. Tsuka H. et al. A New Electronic-Controlled Suspension Using Piezoelectric Ceramics // IEEE Workshop on Electronic Applications in Transportation (Cat. N. 90TH0310-3). IEEE, Piscataway, N. J. 1990. P. 50—57.
27. Uehara K. et al. // Piezoelectric Ceramic Transformer. U. S. Pat. 1994. N 5.278.471. Jan. 11.

28. Dawson W. J. and Swartz S. L. // Process for Producing Sub-Micron Ceramic Powders of Perovskite Compounds with Controlled Stoichiometry and Particle Size. U. S. Pat. 1992. N 5.112.433.
29. Ohba Y. et al. Precipitation of Lead Zirconate Titanate Powders under Hydrothermal Conditions // J. Ceram. Soc. Jpn. 1996. Vol. 104. N 1. P. 6—10.
30. Smith W. A. // New Opportunities in Ultrasonic Transducers Emerging from Innovations in Piezoelectric Materials, presented at the 1992 SPIE International Symposium, July 21—22. 1992.
31. Pardo L., Duran P., Millar W. W., Wolny C. E. and Jimenez B. High temperature electro-mechanical behaviour of sodium substituted lithium niobate ceramics // Ferroelectrics. 1996. Vol. 186. P. 281—285.
32. Haertling G. H. // Method for Making Monolithic Piezoelectric Ceramic Devices. U. S. Pat. 1995. N 5.471.721.
33. Newham R. E. et al. // Metal-Electroactive Ceramic Composite Actuators. U. S. Pat. Jan. 4, 1994. N 5.276.657.
34. Рыбьянец А. Н., Сахненко В. П. Пьезоэлектрическая керамика за рубежом: современное состояние и перспективы развития // Материалы Международной научно-практической конференции. 24 ноября — 1 декабря 2000 г. М.: МИРЭА. 2000. С. 6—13.

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.382.621.039,533.95

А. Б. Кукушкин, канд. физ.-мат. наук,  
В. А. Ранцев-Каргинов, канд. физ.-мат. наук,  
ИЯС РНЦ "Курчатовский Институт"  
e-mail: kuka@nfi.kiae.ru  
rank@nfi.kiae.ru

### МИКРОПЫЛЕВЫЕ КАРКАСНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ КАК НОВЫЙ ТИП НАНОМАТЕРИАЛА

*Дан краткий обзор широкого круга экспериментальных данных, позволивших обнаружить явление долгоживущих филаментарных структур в плазме в различных типах электрического разряда (токамаки, Z-пинчи, плазменный фокус, вакуумная искра, плазма лазерного факела), а также результатов экспериментов (наноструктурный анализ пылевых осадков и диагностика начальной фазы электрического разряда) по проверке предложенной гипотезы о микропылевой природе таких филаментов. Дан краткий обзор основных гипотез об образовании микропылевых каркасов из углеродных нанотрубок в различных типах электрического разряда и предполагаемых свойств таких каркасов как нового типа ультрадисперсных материалов, который уместно назвать каркасным наноматериалом. Указано на корреляцию ожидавшихся нами свойств таких наноматериалов с новейшими данными в физике наноструктур.*

#### 1. Введение

Настоящая работа представляет собой результат плазмофизических исследований, вышедших в междисциплинарное пространство. "Пограничный" ха-

рактер работы явился объективным следствием развития исследований авторов в 1993—1997 гг. [1—9] по анализу широкого массива экспериментальных данных, накопленных в процессе многолетних исследований по физике горячей плазмы и проблеме управляемого термоядерного синтеза в РНЦ "Курчатовский Институт" для различных типов электрического разряда (токамаки, Z-пинчи, плазменный фокус). Оказалось, что объяснение результатов вышеуказанного анализа потребовало [10—12] выхода за существующие традиционные рамки физики горячей плазмы и работы на стыке ряда различных областей науки. Сюда относятся следующие дисциплины:

- недавно возникший раздел физики плазмы — физика пылевой плазмы, притом в ее дополнительной, новой версии, а именно плазмы с микропылевыми каркасными (т. е. связными, "конденсированными") структурами, а не только с уединенными кулоновски-многозарядными пылевыми микрочастицами;
- новый, бурно развивающийся раздел физики конденсированных сред, а именно физика нанообъектов, в первую очередь, — углеродных нанотрубок (включая также и их предшественников — фуллеренов, а также возможные аналогичные наноструктуры из других химических элементов);
- физика электрического пробоя в различных средах в ее обновленной и расширенной версии, а именно с учетом возможной ключевой роли микропыли;
- физика явлений на поверхности конденсированных сред (прежде всего — твердых тел) в

20. Testardi D. A. // High-Performance Anti-Lock Brake System for Original Equipment and After-Market Applications. U. S. Pat. 1991. N 5.067.778. Nov. 26.
21. Sonnenberg S. et al. // Piezoelectric Sensor for in situ Monitoring of Electrostatographic Developers. U. S. Pat. 1996. N 5.532.802. July 2.
22. Kaufman J. J. et al. // Ultrasonic Bone-Therapy Apparatus and Method. U. S. Pat. 1996. N 5.547.459. Aug. 20.
23. Saitoh et al. // Piezoelectric Single Crystal. Ultrasonic Probe, and Array-Type Ultrasonic Probe. U. S. Pat. 1995. N. 5.402.791. Apr. 4.
24. Newham R. E. and Ruschau G. R. // Smart Electroceramics. Am. Ceram. Soc. 1991. Vol. 74. N 3. P. 463—480.
25. Rogers C. A. // Intelligent Materials. Sci. Am. Sept. 1995. P. 154—157.
26. Tsuka H. et al. A New Electronic-Controlled Suspension Using Piezoelectric Ceramics // IEEE Workshop on Electronic Applications in Transportation (Cat. N. 90TH0310-3). IEEE, Piscataway, N. J. 1990. P. 50—57.
27. Uehara K. et al. // Piezoelectric Ceramic Transformer. U. S. Pat. 1994. N 5.278.471. Jan. 11.

28. Dawson W. J. and Swartz S. L. // Process for Producing Sub-Micron Ceramic Powders of Perovskite Compounds with Controlled Stoichiometry and Particle Size. U. S. Pat. 1992. N 5.112.433.
29. Ohba Y. et al. Precipitation of Lead Zirconate Titanate Powders under Hydrothermal Conditions // J. Ceram. Soc. Jpn. 1996. Vol. 104. N 1. P. 6—10.
30. Smith W. A. // New Opportunities in Ultrasonic Transducers Emerging from Innovations in Piezoelectric Materials, presented at the 1992 SPIE International Symposium, July 21—22. 1992.
31. Pardo L., Duran P., Millar W. W., Wolny C. E. and Jimenez B. High temperature electro-mechanical behaviour of sodium substituted lithium niobate ceramics // Ferroelectrics. 1996. Vol. 186. P. 281—285.
32. Haertling G. H. // Method for Making Monolithic Piezoelectric Ceramic Devices. U. S. Pat. 1995. N 5.471.721.
33. Newham R. E. et al. // Metal-Electroactive Ceramic Composite Actuators. U. S. Pat. Jan. 4, 1994. N 5.276.657.
34. Рыбьянец А. Н., Сахненко В. П. Пьезоэлектрическая керамика за рубежом: современное состояние и перспективы развития // Материалы Международной научно-практической конференции. 24 ноября — 1 декабря 2000 г. М.: МИРЭА. 2000. С. 6—13.

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.382.621.039.533.95

А. Б. Кукушкин, канд. физ.-мат. наук,  
В. А. Ранцев-Каргинов, канд. физ.-мат. наук,  
ИЯС РНЦ "Курчатовский Институт"  
e-mail: kuka@nfi.kiae.ru  
rank@nfi.kiae.ru

### МИКРОПЫЛЕВЫЕ КАРКАСНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ КАК НОВЫЙ ТИП НАНОМАТЕРИАЛА

*Дан краткий обзор широкого круга экспериментальных данных, позволивших обнаружить явление долгоживущих филаментарных структур в плазме в различных типах электрического разряда (токамаки, Z-пинчи, плазменный фокус, вакуумная искра, плазма лазерного факела), а также результатов экспериментов (наноструктурный анализ пылевых осадков и диагностика начальной фазы электрического разряда) по проверке предложенной гипотезы о микропылевой природе таких филаментов. Дан краткий обзор основных гипотез об образовании микропылевых каркасов из углеродных нанотрубок в различных типах электрического разряда и предполагаемых свойств таких каркасов как нового типа ультрадисперсных материалов, который уместно назвать каркасным наноматериалом. Указано на корреляцию ожидавшихся нами свойств таких наноматериалов с новейшими данными в физике наноструктур.*

#### 1. Введение

Настоящая работа представляет собой результат плазмофизических исследований, вышедших в междисциплинарное пространство. "Пограничный" ха-

рактер работы явился объективным следствием развития исследований авторов в 1993—1997 гг. [1—9] по анализу широкого массива экспериментальных данных, накопленных в процессе многолетних исследований по физике горячей плазмы и проблеме управляемого термоядерного синтеза в РНЦ "Курчатовский Институт" для различных типов электрического разряда (токамаки, Z-пинчи, плазменный фокус). Оказалось, что объяснение результатов вышеуказанного анализа потребовало [10—12] выхода за существующие традиционные рамки физики горячей плазмы и работы на стыке ряда различных областей науки. Сюда относятся следующие дисциплины:

- недавно возникший раздел физики плазмы — физика пылевой плазмы, притом в ее дополнительной, новой версии, а именно плазмы с микропылевыми каркасными (т. е. связными, "конденсированными") структурами, а не только с уединенными кулоновски-многозарядными пылевыми микрочастицами;
- новый, бурно развивающийся раздел физики конденсированных сред, а именно физика нанообъектов, в первую очередь, — углеродных нанотрубок (включая также и их предшественников — фуллеренов, а также возможные аналогичные наноструктуры из других химических элементов);
- физика электрического пробоя в различных средах в ее обновленной и расширенной версии, а именно с учетом возможной ключевой роли микропыли;
- физика явлений на поверхности конденсированных сред (прежде всего — твердых тел) в

присутствии мощных динамических электромагнитных полей;

- и наконец, физика ультрадисперсных (нано-)материалов и ее различные приложения к материаловедческим и технологическим проблемам микросистемной техники (МСТ).

Настоящая работа излагает и проецирует концепцию о *микрочастицевых каркасных структурах* [10–12] на область прикладных задач, указывая при этом на возможность рассматривать такие структуры как новый тип наноматериала (под наноматериалами понимаются такие материалы, свойства которых определяются их составными блоками с размерами в нанометровом диапазоне). В настоящей работе приведен краткий аннотационный обзор феноменологии этого явления в плазме сильноточных электрических разрядов (раздел 2), основных гипотез (о микрочастицевых каркасах из квантовых наноструктур), выдвинутых для объяснения этого явления (раздел 3), подтверждений этих гипотез, полученных либо в недавних экспериментах (наноструктурный анализ пылевых осадков в токамаке и диагностика начальной фазы электрического разряда в вакуумной искре), либо путем анализа баз данных предшествующих экспериментов (диагностика начальной фазы электрического разряда в плазменном фокусе и токамаке) (раздел 4); новейших данных по физике наноструктур и наноматериалов, коррелирующих с их гипотетическими свойствами, ранее использованными в вышеупомянутых гипотезах о каркасных структурах (раздел 5); основных задач дальнейшей экспериментальной проверки концепции и связи этих задач с проблемами МСТ (раздел 6).

## 2. Основная феноменология

Авторами проведен анализ обширной базы экспериментальных данных, что позволило обнаружить и изучить явление долгоживущих филаментарных структур в различных типах электрического разряда (как правило — сильноточного); это, в частности, включает:

- газовые Z-пинчи [1–3, 10–12, 13(e)];
- плазменный фокус [5–9, 13(e)];
- токамаки [4, 11, 13, 14];
- плазму лазерного факела [11, 16],

а также аналогичные филаментарные структуры в космосе [1, 2, 10–12].

**2.1.** Обнаружены протяженные нити (т. н. филаменты) повышенной (или пониженной) светимости, обладающие двумя характерными свойствами:

а) правильной геометрической формой (элементарным и наиболее интересным блоком которых является прямолинейное трубчатое образование, часто обладающее коаксиальной внутренней структурой, подробнее см. подраздел 4.1);

б) временем жизни, сравнимым с длительностью всего разряда, что значительно (порой на порядки)

превосходит соответствующие теоретические предсказания для времени жизни таких структур.

Конкретный пример долгоживучести длинного прямого филамента, направленного поперек основного электрического тока Z-пинча, представлен на рис. 1 в работе [12] (подробнее см. ниже п. 4.1).

Структуры, обладающие свойствами а) и б), были названы нами *долгоживущими* филаментами — для "отстройки" от достаточно широко изучаемого явления хаотической, мерцающей филаментации (т. е. в указанном выше контексте — короткоживущей).

**2.2.** Обнаружено *топологическое подобие* структур (среди которых были также и трубчатые) в необычайно широком диапазоне: а) пространственных масштабов (от микрометровых диаметров отдельных филаментов в лабораторных разрядах до структур галактического масштаба и даже более); б) плотностей макроскопического электрического тока; в) типа удержания плазмы — магнитного (токамаки) или инерционного (Z-пинчи, плазменный фокус, плазма лазерного факела). В целом ряде случаев удалось обнаружить у характерных структур их *самоподобие*, т. е. составленность большей структуры из аналогичной структуры меньшего или много меньшего размера.

## 3. Основные гипотезы

**3.1.** На основании наблюдаемой долгоживучести прямолинейных структур выдвинута гипотеза [10–12] о наличии у наблюдаемых долгоживущих филаментов жестких *каркасов* и о том, что только некие *квантовые* связи в конденсированной среде (а не просто взаимодействие *классических* частиц в плазме) могут обеспечить наблюдаемую "жесткость" (или, по меньшей мере, связность) блоков таких каркасов. При этом образование связной (на определенном пространственном масштабе — твердотельной) структуры должно происходить в процессе электрического пробоя и, следовательно, *предшествовать* образованию горячей плазмы.

**3.2.** Конкретным кандидатом на роль элементарного блока в гипотетических каркасах была предложена углеродная *нанотрубка* (или аналогичные наноструктуры из других химических элементов и их соединений, способных строить такого рода структуры) [10–12]. Причиной такого выбора явился целый ряд физико-химических свойств нанотрубок, которые в совокупности открывают возможность новой формы электрического пробоя (не обязательно в присутствии газа), состоящей, по сути, в строительстве каркасных структур из микрочастиц, либо уже присутствующей в разряде (например, вследствие наработки нанотрубок при очень часто практикуемой предварительной "тренировке" разряда), либо образующейся в процессе самого пробоя. Из важнейших свойств нанотрубок укажем здесь только следующие два: во-первых, уже довольно хорошо изученную к 1998 году (см.



напр., обзор [17]) аномальную эмиссию электронов (как эмиссию во внешнем электрическом поле, так и тепловую), что значительно упрощает процесс электрического пробоя и скорее всего способно снять неизменно острую проблему "затравочных" электронов в теории электрического пробоя, и во-вторых, к 1998 году еще слабо изученные аномальные магнитные свойства, которые позволили бы взаимным магнитным притяжением отдельных нанотрубок выстраивать из них (в динамических внешних полях) фрактальные каркасные структуры и интенсивным электромагнитным волнам "скользить" вдоль таких каркасов с аномально малой диссипацией энергии этих волн (см. ниже п. 3.3).

**3.3.** Для разрешения основного парадокса в предлагаемой выше картине, а именно возможности существования фрактальной конденсированной среды (макромолекул) внутри *горячей* плазмы, вплоть до килоэлектронвольтных температур ( $1 \text{ эВ}$  соответствует  $\sim 11 \cdot 10^3 \text{ К}$ ) и выше (что кардинально отличает рассматриваемую нами задачу от решаемых задач в физике обычной, "кулоновской" пылевой плазмы), нами выдвинута гипотеза о том, что обнаруженные нами долгоживущие филаментарные структуры (особенно прямолинейные филаменты, направленные перпендикулярно основному электрическому току) являются "естественными кабелями", существующими вследствие *канализованного* транспорта электромагнитной энергии, накачиваемой из внешней электрической цепи и распространяющейся вдоль гипотетических микротвердотельных каркасов в центр плазмы в виде образующихся высокочастотных (ВЧ) электромагнитных волн [13]. Именно такие ВЧ волны способны защитить (градиентом давления ВЧ поля, т. е. так называемой силой Миллера) каркасы от воздействия окружающей высокотемпературной плазмы (оказывается [13(b, d, f)], например, что зарегистрированные в токамаке Т-10 [18–20] частотные и амплитудные характеристики ВЧ волн обладают требуемыми для этого свойствами, и аналогичная ситуация имеет место и в газовом Z-пинче [13(e)] для спектроскопически диагностированных там ВЧ волн [21]). Таким образом, модель "естественных кабелей" предлагает общее и взаимосвязанное решение следующих двух проблем:

а) выживания микропылевых каркасов в горячей плазме;

б) существования нелокального (недиффузионного, в частности, баллистического) механизма [14, 22] переноса тепла в горячей плазме (наличие нелокального компонента переноса тепла в токамаках было обнаружено в последнее десятилетие в целом ряде экспериментов на различных установках [23]).

#### 4. Проверка гипотез

**4.1.** Прежде всего отметим, что работа по проверке гипотез [10–12], выдвинутых на основании

анализа предшествующих результатов [1–9], сопровождалась как расширением самого массива анализируемых экспериментальных данных, так и углублением их анализа. Поэтому составной частью проверки гипотез оказалось обнаружение тонкой структуры филаментарных структур. Так, было показано наличие длинных прямых трубчатых филаментов с коаксиальной внутренней структурой, длиной в несколько сантиметров и более, часто направленных примерно по радиусу плазменного шнура. Еще более важным элементом стало обнаружение структуры типа тележного колеса (а именно, кольца с прямыми радиальными связями, часто — двух и более коаксиальных колец на единой осевой стрежневой структуре (см. рис. 1, а на третьей стороне обложки). Такая структура уже сама по себе (даже не принимая во внимание ее аномальную долгоживучесть) практически необъяснима газо- или гидродинамической картиной.

Указанные структуры были найдены [13(a, c, f)] в базах данных ряда токамаков (исследованные нами изображения плазмы получены в токамаках ТМ-2, Т-4, Т-6 и Т-10), газового Z-пинча [13(a, e)] (подробнее см. ниже), плазменного фокуса [13(e)] (данные получены в Курчатовском институте [24] на установке ЛВ-2, являвшейся плазменным фокусом типа Филиппова), лазерного факела [16] (данные получены в экспериментах в ТРИНИТИ [25]).

Важно отметить, что надежность всех упоминаемых в настоящей работе результатов обеспечивается богатой статистикой обнаруженных структур, значительной степенью их подобия в различных режимах и установках, а также независимостью обнаруженной структуризации от способа получения изображений. Так, изображения плазмы в видимом свете были получены с высоким разрешением с помощью различных методов: скоростного фотографирования, щелевой фоторазвертки, электронного оптического преобразователя (ЭОП). Исходные изображения обрабатывались методом многоуровневого динамического контрастирования (МДК) [1, 2]. Однако, как правило, наличие структур легко обнаружить и без использования метода МДК, если контраст этих структур достаточно высок. В таких случаях достаточно просто увеличить (порой значительно) исходное изображение, а использование МДК позволяет выявить тонкие детали структур. Как правило, конечные изображения получались из исходных при использовании "однородной" карты контрастирования, т. е. одной и той же для всего изображения (в общем случае карта контрастирования это некая зависимость  $I_1(I_0)$ , указывающая, что конкретное значение  $I_0$  почернения изображения должно быть заменено во всех точках, где такое значение встречается, на величину  $I_1$ ). Надежное же распознавание структуризации требует [1, 2] переменной (т. е. "дышащей", "динамической") карты контрастиро-

вания, чтобы избежать артефактов и отобразить оптимальное окончательное изображение.

Для иллюстрации основных структурных свойств каркасных образований мы приведем несколько характерных данных для случая Z-пинча. На рис. 2, а (см. третью сторону обложки) и рис. 3, 4 приведены данные экспериментов, ранее проведенных одним из авторов (В. А. Р.-К.). Основные параметры установки и электрических разрядов в ней были следующими: расстояние между электродами 60 см, диаметр камеры 20 см, энергозапас  $\sim 30$  кДж, максимальный ток в разряде  $\sim 150\text{--}350$  кА, рабочий газ — дейтерий, давление  $\sim 100\text{--}1000$  Па, начальное напряжение  $\sim 30$  кВ (подробнее условия экспериментов см. в [1, 3]). Система оптической регистрации фиксировала собственное свечение плазмы и выделяла фокусировкой слой (шириной 7,5 см и толщиной 5 см) на оси Z-пинча. Для всех данных характерным является их высокое разрешение, как временное (экспозиция 2—60 нс), так и пространственное (вплоть до десятков микрометров), а также наблюдение в различные моменты времени с различных позиций (время, указанное на рис. 2, а, 3, 4, отсчитывалось от так называемой главной особенности на осциллограмме производной разрядного тока). Последнее собственно и позволило проследить эволюцию жесткого прямого образования спицеобразной формы в течение времени, сравнимого с продолжительностью всего разряда и, что особенно важно, превышающего на порядки величин соответствующую теоретически предсказываемую продолжительность для поддержания своей формы такой прямолинейной структурой, направленной перпендикулярно основному электрическому току в Z-пинче и значительно выходящей за пределы собственно Z-пинча (т. е. более плотного, вертикально направленного плазменного столба) (см. рис. 1 в [12]). Напомним, что обычный механизм пинчевания состоит в сжатии электропроводящих структур (в частности, плазмы) магнитным полем, самосогласованно создаваемым протекающим по нему электрическим током. Такой механизм способен только "оголеть" наблюдаемую спицеобразную структуру (и все остальные каркасные структуры в разрядной камере), но никак не обеспечить ее устойчивости. Наличие оголенного каркаса иллюстрирует рис. 2, а (см. третью сторону обложки), изображение на котором получено как раз вблизи момента главной особенности (т. е.  $t = 0$ ), когда вследствие развития неустойчивости (типа Релея—Тейлора, как правило — аксиально несимметричной) магнитное поле создает сначала "перетяжку" на вертикально направленном плазменном шнуре, а затем вытесняет плотную, ярко свящуюся плазму из этой перетяжки.

Другой пример наличия сложной каркасной структуры из трубчатых блоков дан на рис. 3. Здесь первичное изображение обработано методом мно-

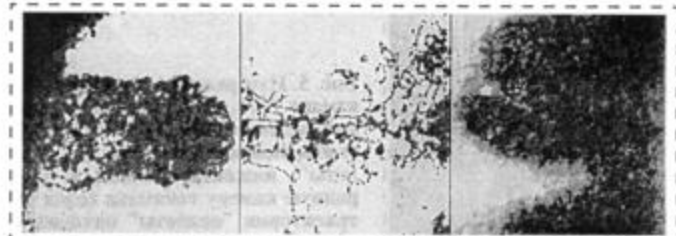


Рис. 3. Фотография (позитив) слоя (шириной 7,5 см и толщиной 5 см) на оси газового Z-пинча в области "перетяжки", образующейся на вертикально направленном плазменном столбе. Экспозиция 10 нс, момент времени  $t = +50$  нс. Древовидные трубчатые филаменты в центральной секции имеют диаметры  $d = 0,7\text{--}1,5$  мм, а толстые фрактальные образования ("темные" филаменты), образующие "перетяжку" на ярком вертикальном плазменном столбе (т. е. на белом фоне) и хорошо различимые в левой и правой секциях изображения, имеют ширину  $\sim 1,2$  и  $0,5$  см соответственно

гоуровневого динамического контрастирования (МДК) [1, 2] с различной картой контрастирования в центральной и периферийной секциях изображения (различие карт необходимо для прослеживания преемственности структур в областях с сильно различающимся уровнем светимости). Различимость структур на фоне достаточно сильного собственного свечения плазмы обусловлена оптической неоднородностью, создаваемой такими структурами. Поэтому филаменты видны как обладающие пониженной светимостью по сравнению с более ярким фоновым излучением плазмы Z-пинча. Более детально структуру радиальных филаментарных структур можно рассмотреть на рис. 4.

На рис. 5 показано наличие крупных каркасных структур на периферии вакуумной камеры токамака Т-10, подсвеченных вспышкой видимого света при "сгорании" углеродной микрочастицы — "пеллеты", инжесктированной в разрядную камеру (см. структуру типа тележного колеса в левом верхнем углу в окне "а", а также колесо в окне "б", распо-

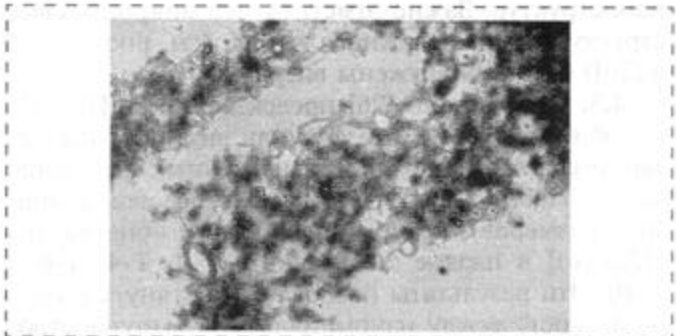


Рис. 4. Тонкая структура типичного радиально направленного филамента в Z-пинче (см. рис. 3). Здесь (вертикальная) ось пинча расположена на левом краю изображения, время  $t = +300$  нс, ширина изображения 3,5 см, позитив. Диаметр кольца на левом конце темного фрактального филамента составляет  $\sim 3$  мм, а тончайшие различные филаменты в диаметре — всего несколько сотен микрометров

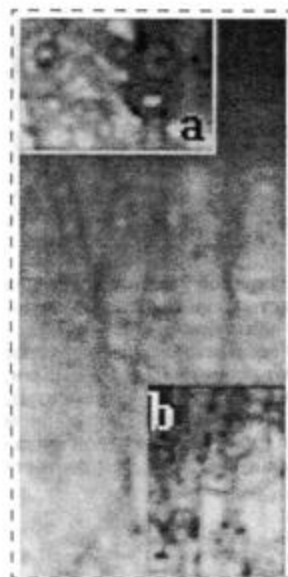


Рис. 5. Изображение периферии токамака Т-10, подсвеченной вспышкой видимого света при "сгорании" углеродной микрочастицы — "пеллеты", инжектированной в разрядную камеру токамака (след от траектории "пеллеты" находится достаточно далеко справа от границы изображения). Негатив, тороидальное направление токамака — по горизонтали. Высота изображения 8,5 см (малый радиус тороидальной камеры токамака Т-10 равен 33 см). Диаметр длинного толстого филамента ~3—4 мм. Уровень контрастирования изображения в окнах "а" и "б" отличается от такового в остальной части для того, чтобы показать тонкую структуру "колес" и пресметственность структурирования в целом

ложенное в торцевом поперечном сечении вертикально направленной трубчатой структуры). Исходный снимок получен В. Ю. Сергеевым.

На следующем этапе непосредственной, по возможности "лобовой", проверки гипотез (в сотрудничестве с коллегами из Курчатовского института [26, 28] и МИФИ [27]) были найдены приведенные ниже подтверждения реалистичности развиваемого подхода.

**4.2.** Обнаружены [26] трубчатые структуры (а также структуры с характерной топологией типа тележного колеса) в нанометровом и микрометровом диапазоне в базе данных по электронной (просвечивающей и сканирующей) микроскопии различных типов пылевых депозитов (частиц и пленок, преимущественно углеродных), извлеченных из камеры токамака Т-10 (см. рис. 1—5 в [26]). Эти результаты указывают на значительную широту диапазона условий электрического разряда, при которых может происходить образование трубчатых наноструктур. Важно отметить, что микропылевые структуры типа тележного колеса (см. рис. 2, 3, 5 в [26]) были обнаружены впервые.

**4.3.** Обнаружено [26] предсказанное в [10—12] подобие трубчатых структур как внутри вышеуказанного диапазона пространственных размеров, так и подобие структурам (в сантиметровом диапазоне размеров), которые были ранее обнаружены [13(а, с)] в плазме токамаков ТМ-2, Т-4, Т-6 и Т-10. Эти результаты позволяют протянуть своего рода "мост" между нанометровыми и микрометровыми структурами (являющимися заведомо конденсированной, "твердой" средой), доступными к наблюдению только в "спокойных" условиях электронной микроскопии, и макрообъектами, наблюдаемыми с помощью различных диагностик в реальной, очень "неспокойной" плазме.

Прямое сопоставление структур типа тележного колеса, топология которых весьма близка и достаточно узнаваема для ее надежной идентификации, проведено на рис. 1, помещенном на третьей стороне обложки журнала. Здесь показано подобие трубчатых структур в токамаке (макроструктур в плазме и микроструктур в пыли), различающихся размером на пять порядков [26]. На рис. 1, а видна структура типа тележного колеса в плазме токамака ТМ-2 (тороидальное направление — по горизонтали, малый радиус тороидальной камеры равен 8 см, в центре шнура электронная температура равна ~500 эВ, а электронная плотность —  $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>). Изображение получено методом фоторазвертки с эффективной экспозицией менее 1 мкс (исходный снимок взят из данных экспериментов [29]). На рис. 1, б показана трубчатая структура, которая обнаружена как небольшой (диаметром 70 нм) фрагмент пылевой частицы размером 1,2 мкм, извлеченной из масла турбомолекулярных насосов, используемых для откачки вакуумной камеры в токамаке Т-10. Благодаря очистке частицы от аморфного компонента видны тонкие детали этой трубчатой структуры (например, виден стержень на оси трубы и соединительные радиальные связи).

Другой пример сопоставления каркасных трубчатых структур в электрическом разряде (конкретно — в Z-пинче) и в пылевой микрочастице, извлеченной из токамака Т-10 дан на рис. 2 (см. третью сторону обложки). Здесь различие в размерах составляет примерно четыре порядка.

**4.4.** В "пылевых" данных в нанометровом и микрометровом диапазоне просматривается [26] предсказанная в [10—12] тенденция к самоподобию, т. е. составленности большей структуры из аналогичной структуры меньшего или много меньшего размера. Иллюстрацией такого явления может служить рис. 1, б (см. третью сторону обложки). Так, составным элементом всей трубчатой структуры — в ее левой стороне — является трубчатая же структура меньшего размера (диаметром ~10 нм). Удалось также показать, что для каркасных структур различной топологии и пространственной размерности (нитевидных, шаровидных и других), также обнаруженных в пылевых осадках, роль ключевого строительного блока играют именно трубчатые структуры. Это согласуется с гипотезой [10—12] в том смысле, что трубчатые структуры являются, по-видимому, самым эффективным блоком для строительства самоподобных структур.

**4.5.** Структура типа тележного колеса, являющаяся наиболее характерной и топологически узнаваемой структурой среди обнаруженных ранее на квазистационарной стадии разряда в токамаках, Z-пинче и плазменном фокусе, обнаружена также и на начальной стадии развития электрического разряда в различных типах установок:

1. В вакуумной искре на "темной" фазе разряда в экспериментах 2000 г. [27, 30] (рис. 6). Основные параметры разряда: емкость конденсаторной батареи 12 мкФ, напряжение 10 кВ, максимальный ток ~150 кА, период ~5 мкс. На "темной" фазе разряда ток меньше 20 % максимального, а собственное свечение плазмы пока еще ниже уровня его детектируемости электронным оптическим преобразователем (ЭОП), обладавшим коэффициентом усиления  $10^5$ . Поэтому диагностировать наличие структур в разрядной камере удалось только с помощью импульсной лазерной подсветки (импульс длительностью 6 нс,  $\lambda = 337$  нм).

2. В токамаке Т-6 на стадии пробоя (примерно за 300 мкс до появления сигнала в поясе Роговского, детектирующем электрический ток всего разряда) [28, 30] в базе данных давних экспериментов.

3. В плазменном фокусе ЛВ-2 на стадии пробоя (примерно за 100 нс до появления разрядного тока) в базе данных давних экспериментов с использованием ЭОПа [30] (рис. 7).

4.6. Обнаружен [31] (с помощью электронной просвечивающей микроскопии) феномен каркасов *древовидной* структуры, состоящих из нитей диаметром порядка нескольких нанометров. Такие структуры найдены как в отдельных субмикронных частицах различной формы (шаровидной, волоконной), так и в агломератах визуально-отдельных пылевых частиц, извлеченных из камеры токамака Т-10 (см. рис. 2, б, в на третьей стороне обложки). Это показывает, что широкий класс каркасных структур, по крайней мере субмикронного размера, может быть образован в результате действия гипотетического механизма [10–12] *стримеро-подобной*, *древовидной* "сборки" каркасов из нанотрубчатых блоков. Интересно, что данные рис. 1, б (см. третью сторону обложки) указывают на то, что результатом *древовидного* механизма построения блоков может быть также и трубчатая структура. Действительно, в трубчатой структуре,

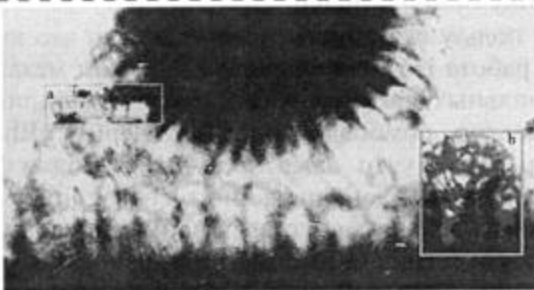


Рис. 6. Трубчатые структуры и "тележные колеса" в вакуумной искре (плоский катод, с центральным отверстием  $d = 3$  мм находится внизу на расстоянии 2 мм от закругленного конца стрелевого анода). Изображение получено на "темной" фазе разряда с помощью импульсной лазерной подсветки. Изображения в окнах "а" и "б" обработаны с большим уровнем контрастности. Тележное колесо видно и в окне "б" и в левой нижней части снимка в виде эллиптической структуры большого размера

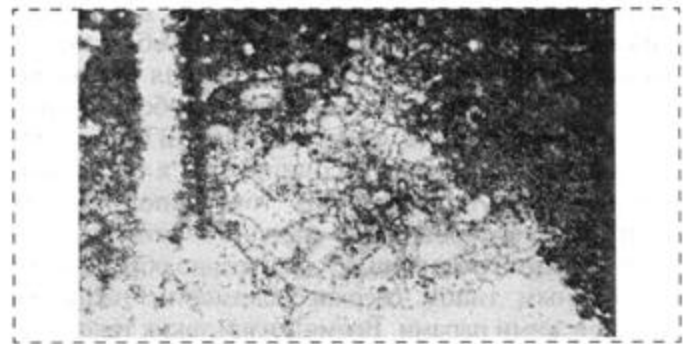


Рис. 7. Трубчатые структуры и "тележные колеса", обнаруженные в плазменном фокусе ЛВ-2 [24] еще за ~100 нс до появления разрядного тока (т. е. его детектирования поясом Роговского). Изображение получено с помощью ЭОПа, позитив, экспозиция 2 нс, ширина снимка 4,6 см. Структуры видны на фоне круглого вертикально расположенного фарфорового изолятора, чей левый край виден в левой части снимка как белая вертикальная полоса (верх грибовидного анода расположен чуть выше верхнего края снимка, а нижняя часть камеры-катода находится вблизи нижнего края снимка)

показанной на рис. 1, б, ее внутренний центральный стержень играет роль "ствола", поскольку радиальные связи существуют не только в торцевом сечении (в структуре типа тележного колеса), но также и между стволом и боковыми трубчатыми структурами в промежуточных сечениях.

Приведенные выше результаты находятся в качественном соответствии с гипотезой [10–12] о роли микропыли в формировании электрического пробоя в сильноточных разрядах, приводящих к образованию долгоживущих филаментарных структур.

## 5. Новейшие данные по физике наноструктур, актуальные для физики каркасных наноматериалов

Приведем здесь несколько новейших данных по физике наноструктур и наноматериалов, которые демонстрируют корреляцию со свойствами трубчатых наноструктур, изначально "заложенными" (в явной или неявной форме) в гипотезах [10–12] о каркасных структурах (см. подробнее п. 3.2) и, соответственно, ожидаемыми нами в момент формулировки этих гипотез. В этом смысле обсуждаемые ниже свойства можно назвать необходимыми для реальности выдвинутой концепции.

Предполагаемые свойства таких каркасов как нового типа ультрадисперсных (нано-)материалов в значительной мере связаны с аномальными магнитными свойствами нанотрубок. Здесь особенно значимым оказалось сравнительно недавно открытое [32] явление аномально слабого затухания токов, возбуждаемых магнитным полем, захватываемым помещенными в него фрагментами необработанных катодных депозитов, содержащих многослойные углеродные нанотрубки. Обнаруженное явление [32] близко к многосвязной высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), поскольку

захват магнитного потока происходит в условиях диамагнетизма исследуемого образца, обладающего петлей гистерезиса, характерной для сверхпроводников второго рода. Сама же по себе потенциальная возможность существования ВТСП в исследованных образцах ассоциируется в [32] с возникновением незатухающих токов (получивших в литературе обобщенное название "*persistent currents*"). Такого рода токи не обязательно обусловлены конкретным типом сверхпроводимости, например куперовскими парами. Время жизни таких токов при комнатной температуре оказывается порядка суток [32]. Незатухающие токи могли бы протекать, как полагают авторы работы [32], по мезоскопическим путям, конкретно — по наблюдаемым в образцах тонким трубкам (диаметром в несколько десятков нанометров, что характерно для многослойных углеродных нанотрубок), которые образуют кольцевые структуры с диаметром в несколько десятков микронетров. Исследования необратимой намагниченности проводились и при весьма сильных магнитных полях  $\sim 10$  Т (правда, для таких полей — только при низких температурах, равных  $\sim 4$  К).

Интересно, что основные результаты [32] подтверждены в только что появившейся работе [33], где исследовались жгуты (*ropes*) диаметром  $\sim 100$  мкм и длиной  $\sim 1$  мм, состоящие из "связок" (*bundles*), собранных, в свою очередь, из отдельных углеродных нанотрубок (метод получения образцов — дуговой разряд). Исследования намагниченности проводились при меньших, чем в [32] полях, однако при больших температурах. Так удалось показать, что наблюдаемое в образцах явление может иметь природу ВТСП (хотя возможны и другие интерпретации). Такая версия означает, что наблюдаемая ВТСП может существовать при температурах выше 400 К, что на сегодняшний день является наибольшим продвижением в сторону больших температур.

Еще одним свидетельством в пользу возможности бездиссипативного электрического транспорта в многослойных углеродных нанотрубках может служить и более ранняя работа [34], где при комнатной температуре в отдельной многослойной углеродной нанотрубке (используемой как щуп сканирующего электронного микроскопа, погруженный в жидкий металл) было найдено явление баллистического (т. е. не зависящего от длины трубки) переноса электрического тока (и притом без выделения тепла) с плотностью тока вплоть до  $10^7$  А/см<sup>2</sup>. В измерениях было обнаружено малое, "квантованное" электрическое сопротивление. Однако даже такого сопротивления с запасом хватило бы для "сгорания" нанотрубки, если бы соответствующее тепловыделение происходило в ней самой. Поэтому скорее всего электросопротивление было обусловлено вкладом остальных элементов электрической цепи (прежде всего, контактов).

Обсуждаемое явление многосвязной ВТСП играет важную роль в разрешении основного парадокса в гипотезе [10–12], а именно возможности неожиданно долгого существования конденсированной среды внутри горячей плазмы, вплоть до электронных температур, равных килоэлектронвольтам (в отличие от известной "холодности" обычной пылевой плазмы). Для объяснения указанного парадокса, как уже указано в п. 3.3, и была выдвинута гипотеза о "естественных кабелях" [13]. Напомним, что давление описанных в [18, 19, 21] ВЧ полей способно оттеснить от каркаса окружающую его высокотемпературную плазму, однако для этого требуется аномально низкая диссипация энергии ЭМ волн (с локальной напряженностью полей вблизи каркаса вплоть до  $10^6$  В/см) при их распространении вдоль каркаса. Последнее свойство как раз и обеспечивается тем, что структура наноматериала, из которого построен каркас, может быть такова, что в нем, как это вытекает из [32, 33], небольшие участки аномально высокой электропроводности (т. е. почти ВТСП) вкраплены в электропрочный диэлектрик.

Другим важным аспектом магнитных свойств является захват такого магнитного потока, при котором возможно осязаемое взаимное притяжение нанотрубчатых блоков. Такой механизм существен для вышеуказанной гипотетической возможности выстраивания каркасных структур из отдельных наноблоков во внешних динамических полях и дальнейшего самоподдержания таких структур. Захват магнитного потока в экспериментах [32, 33] в состоянии диамагнетика, обусловленного сверхпроводимостью второго рода в многосвязной среде, принципиально, как физический механизм вполне приемлем для строительства каркасов. Между тем, имеет смысл вести речь об эффективности процесса захвата или генерации магнитного поля и в более общем случае, независимо от конкретного микроскопического механизма образования магнитных микродиполей.

В пользу сказанного говорит только что вышедшая работа [35], сообщающая о другом механизме аномальных магнитных свойств наноматериала — конкретно, ромбоэдрального фуллерита (Rh-C<sub>60</sub>). Оказывается, что даже *чистый* углерод в форме указанного конденсированного состояния вещества может обладать ярко выраженными свойствами ферромагнетика (а именно насыщением намагниченности, большой петлей гистерезиса и остаточной намагниченностью) при неожиданно высоких температурах с точкой Кюри при  $\sim 500$  К.

Тем самым результаты [32, 33, 35] указывают на широту условий проявления и потенциальную высокотемпературность аномальных магнитных свойств различных наноматериалов.

## 6. Основные задачи дальнейшей экспериментальной проверки концепции и связь этих задач с проблемами МСТ

Дальнейшая проверка справедливости выдвигаемой концепции должна включать исследования как в рамках конкретных научных областей, значимых для проблемы в целом (см. раздел 1), так и на их стыке для объединения усилий в единую схему. Такие исследования могут включать, в частности, изучение следующих проблем [36, 37]:

- аномальные свойства трубчатых структур в условиях электрического пробоя; модельные эксперименты с трубчатыми наноструктурами;
- прослеживание процесса выстраивания ("сборки") каркасов в электрических разрядах (с помощью диагностик высокого разрешения — как в современных экспериментах с термоядерной плазмой и лучше), оценка возможности управления сборкой каркасов на стадии пробоя в электрических разрядах и оптимизация свойств каркасов;
- физические и химические свойства осадков каркасного типа в развитие работ [26, 31] и их распространения на исследование пылевых осадков в электрических разрядах других типов (прежде всего, представляет интерес время жизни каркасов в условиях возможных технологических применений).

Указанные задачи важны для оценки эффективности строительства каркасных структур и получения новых конструкционных наноматериалов. Возможные технологические применения таких каркасных наноматериалов могут охватить необычайно широкий спектр материаловедческих и технологических аспектов различных проблем, прямо или косвенно связанных с микросистемной техникой. Из большого числа таких проблем можно указать, в частности, следующие направления.

1. Создание высокопрочных материалов с внутренней микрокаркасной структурой.
2. Улучшение свойств покрытий на различных поверхностях с помощью микропылевых каркасных структур.
3. Создание слабодиссипативных ВЧ кабелей.
4. Охлаждение микрорелектронных схем с помощью микропылевых каркасных структур на основе аномальной термоэлектронной эмиссии наноблоков.
5. Создание термоэлектрических преобразователей на основе аномальной термоэлектронной эмиссии из наноблоков микропылевых каркасных структур.
6. Создание фотовольтаической ядерной батареи на основе радиоизотопных микропылевых каркасных структур.

7. Создание долговременных автономных источников света на основе радиоизотопных микропылевых каркасных структур.

8. Получение новых катализаторов для химических и плазмохимических реакторов.

## Заключение

Приведенные выше результаты по проверке гипотез [10—12] о возможности образования микропылевых каркасов из (углеродных) нанотрубок в различных типах электрического разряда показывают жизнеспособность указанных гипотез. Соответственно, предполагаемые свойства таких каркасов означают возможность существования нового типа ультрадисперсных наноматериалов, который уместно назвать каркасным наноматериалом, с очень широким спектром его возможного применения.

Авторы глубоко благодарны Б. Н. Колбасову и П. В. Романову, А. С. Савелову и В. А. Крупину — за сотрудничество в работах [26—28], В. М. Леонову, С. В. Мирнову и И. Б. Семенову, К. А. Разумовой, В. Ю. Сергееву, А. Р. Терентьеву и Н. Г. Ковальскому — за предоставление оригиналов данных с токамаков Т-6, Т-4, ТМ-2, Т-10, плазменного фокуса ЛВ-2 [24] и лазерного факела [25], соответственно. Особая благодарность В. И. Когану за неизменную поддержку и интерес к настоящей работе. Нам приятно отметить также частичную финансовую поддержку со стороны Министерства РФ по атомной энергии и Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 00-02-16453).

## Список литературы

1. Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A. Dense Z-Pinch Plasma as a Dynamical Percolating Network // *Laser and Particle Beams*. 1998. V. 16. P. 445—471.
2. Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A. Self-similarity of plasma networking in a broad range of length scales: from laboratory to cosmic plasmas // *Rev. Sci. Instrum.* 1999. V. 70. P. 1387—1391.
3. Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A. Observations of a dynamical percolating network in dense Z-pinch plasmas // *Rev. Sci. Instrum.* 1999. V. 70, P. 1421—1426.
4. Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A. Plasma networking in magnetically confined plasmas and diagnostics of non-local heat transport in tokamak filamentary plasmas // *Rev. Sci. Instrum.* 1999. V. 70. P. 1392—1396.
5. Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A., Terentiev A. R. Self-Organisation Phenomena in Dense Plasma Focus Experiments // *Strongly Coupled Coulomb Systems* / G. J. Kalman, K. B. Blagojev, J. M. Rommel (eds.). New York: Plenum Press. 1998. P. 129—133.
6. Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A., Terentiev A. R. Formation of a Spheromak-Like Magnetic Configuration by a Plasma Focus Self-Transformed Magnetic Field // *Fusion Technology*. 1997. V. 32. P. 83—93.
7. Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A., Terentiev A. R. Large-Scale Spheromak-Like Magnetic Configuration (SLMC) in High-Current Discharges: Self-Formation and Self-Compression of the SLMC in Plasma Focus Experiments // *AIP Conference Proceedings / Dense Z-pinch 4th Int. Conf., Vancouver, Canada, May*

1997. N. Pereira, J. Davis, and P. Pulsifer (eds.). New York: AIP Press. 1997. N 409. P. 377—380.

8. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A., Terentiev A. R., Cherepanov K. V.** Short-Scale Mixing of the Plasma and Magnetic Field, and Magnetic Flux Ropes in Plasma Focus Experiments // *Ibid.* P. 381—384.

9. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A., Terentiev A. R.** Energy concentration in a high-current gas discharge: experiments on plasma-focus-produced dense-plasma spheromak // *Transactions of Fusion Technology*. 1995. V. 27. P. 325—328.

10. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A.** Filamentation and networking of electric currents in dense Z-pinch plasmas // *Fusion Energy*. 1998 / *Proc. 17th IAEA Fusion Energy Conference*. Yokohama, Japan, 19—24 October 1998 / Vienna: IAEA. 1999. IAEA-CSP-1/P. V. 3. P. 1131—1134. ([http://www.iaea.org/programmes/rip/physics/pdf/ifp\\_17.pdf](http://www.iaea.org/programmes/rip/physics/pdf/ifp_17.pdf)).

11. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A.** Long-living filamentation and networking of electric current in laboratory and cosmic plasmas: from microscopic mechanism to self-similarity of structuring // *Current Trends in Int. Fusion Research: Review and Assessment / Proc. 3<sup>rd</sup> Symposium*, Washington D. C., 1999 / E. Panarella (eds.). Ottawa: NRC Research Press. 2002. P. 107—135.

12. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A.** Microsolid tubular skeleton of long-living filaments of electric current in laboratory and space plasmas // *Proc. 26-th Eur. Phys. Soc. conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion / Maastricht*. Netherlands. 1999. P. 873—876 (<http://epsppd.epfl.ch/Maas/web/pdf/p2087.pdf>).

13. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A.** (a) Wild Cables in Fusion Plasmas (Experiment) // *Proc. Innovative Confinement Concepts Workshop (ICC-2000)*. Berkeley. California USA: 2000. <http://ice2000.lbl.gov/proceed.html>; (b) Wild Cables in Fusion Plasmas (Theoretical View) // *Ibid.* (c) Wild Cables in Tokamak Plasmas (Experiment) // *Proc. 27-th Eur. Phys. Soc. conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion*. Budapest. Hungary: 2000. [http://sgi30.rmki.kfki.hu/EPS2000/P2\\_029.pdf](http://sgi30.rmki.kfki.hu/EPS2000/P2_029.pdf); (d) Wild Cables in Tokamak Plasmas (Theoretical View) // *Ibid.* [http://.../P2\\_028.pdf](http://.../P2_028.pdf); (e) Wild Cables in Z-pinch and Plasma Focus // *Ibid.* [http://.../P2\\_051.pdf](http://.../P2_051.pdf); (f) Естественные кабели в плазме токамака // *Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез*. 2000. вып. 2. С. 69—85; (g) // *Rev. Sci. Instrum.* 2001. V. 72. (N 1, Part II). P. 506—507.

14. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A.** On the provable principles of electric current networking in magnetically confined toroidal plasmas // *Pre-print of the RRC "Kurchatov Institute"*. Moscow. May 1998, IAE 6095/6. 52 P.

15. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A.** An extension of Relaxed State Principle to tokamak plasmas with ITBs // *Proc. 26-th Eur. Phys. Soc. conf. in Plasma Phys. and Contr. Fusion*. Maastricht, Netherland. June 1999. P. 1737—1740 (<http://epsppd.epfl.ch/Maas/web/pdf/p4096.pdf>).

16. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A.** Similarity of skeletal structures in high-current electric discharges and laser-produced plasmas: observations and hypotheses // *Advances in Laser Research*. Nova Science. 2002 (to be published); // *Bull. Am. Phys. Soc. / Abstracts 43<sup>rd</sup> Annual meeting of APS Division of Plasma Physics*. Lawrence Berkeley Lab: Long Beach, CA, USA. 2001. RO2.010 (<http://www.aps.org/meet/DPP00/baps/>).

17. **Елецкий А. В.** Углеродные нанотрубки // *УФН*. 1997. Т. 167. С. 945—972.

18. **Гавриленко В. П., Окс Е. А., Ратцев-Картинов В. А.** Обнаружение и анализ осциллирующих электрических полей в периферийной плазме токамака на основе нового спектроскопического эффекта // *Письма в ЖЭТФ*. 1987. Т. 44. № 7. С. 315—317.

19. **Ратцев-Картинов В. А.** Наблюдение электрических полей в плазме токамака // *Физика плазмы*. 1987. Т. 13. С. 387—391.

20. **Poznyak V. I. et al.** // *Proc. 1998 ICPP and 25-th Eur. Phys. Soc. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion*. Prague: ECA. 1998. Vol. 22C. P. 607—610.

21. **Окс Е. А., Ратцев-Картинов В. А.** Спектроскопическое обнаружение и анализ плазменной турбулентности в Z-пинче // *ЖЭТФ*. 1980. Т. 79. № 1(7). С. 99—115.

22. **Kukushkin A. B.** // *Письма ЖЭТФ*. 1992. V. 56. P. 487—491 // *Proc. 14th IAEA Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion*. Wuerzburg, Germany. 1992. V. 2. P. 34—45 // *Oroc. 24th Europ. Phys. Soc. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion*. Berchtesgaden, Germany. 1997. *Contr. Papers*. Vol. 21A. Part II. P. 849—852.

23. **Callen J. D., Kissick M. W.** Evidence and concepts for non-local transport // *Plasma Phys. and Contr. Fusion*. 1997. V. 39. Suppl. 12B. P. 173—188.

24. **Орлов М. М., Терентьев А. Р., Храбров В. А.** // *Физика плазмы*. 1985. Т. 11. С. 1268 // *Там же*. С. 1517.

25. **А. Е. Бугров и др.** // *ЖЭТФ*. 1997. Т. 111. С. 903.

26. **Kolbasov V. N., Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A., Romanov P. V.** Similary of Micro- and Macrotubules in Tokamak Dust and Plasma // *Phys. Lett. A*. 2000. V. 269. P. 363—367.

27. **Кукушкин А. Б., Ратцев-Картинов В. А., Прохорович Д. Е., Сивко П. А., Савелов А. С.** Диагностика начальной стадии разряда в вакуумной искре // *Материалы II Российского Семинара "Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля вещества и окружающей среды"*. Москва: МИФИ. 20—22 июня 2000. С. 53—55; Наблюдение каркасных структур на начальной стадии разряда в вакуумной искре // *Аннотации 28-й Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (19—23 февраля 2001)*. С. 163 (<http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXVIII/PP/ru/ul/03-Rantsev.doc>; .../PP/en/03-Rantsev.doc).

28. **Крушин В. А., Ратцев-Картинов В. А., Кукушкин А. Б.** Трубчатые и колесообразные структуры в плазме токамака T-6 // *Аннотации 28-й Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (19—23 февраля 2001)*. С. 49. (<http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXVIII/MU/ry/sl/11-Rantsev.doc>; .../MU/en/11-Rantsev.doc).

29. **Vinogradova N. D., Razumova K. A.** // *Inf. Conf. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. (Culham, U. K., 1965)*. Vienna: IAEA. 1996. V. 2. P. 617.

30. **Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A.** Long-lived filaments in fusion plasmas: review of observations and status of hypothesis of microdust-assembled skeletons // *Current Trends in Int. Fusion Research — Proc. 4-th Symposium (Washington DC, USA, March 2001) / C. D. Orth, E. Panarella and R. F. Post (eds.)*. Ottawa, Canada: NRC Research Press. 2002 (to appear).

31. **Kolbasov V. N., Kukushkin A. B., Rantsev-Kartinov V. A., Romanov P. V.** Skeletal dendritic structure of duct microparticles and of their agglomerates in tokamak T-10 // *Phys. Lett. A*. 2001. V. 291. P. 447—452.

32. **Цебро В. И., Омеляновский О. Е.** Незатухающие токи и захват магнитного потока в многосвязной углеродной нанотрубчатой структуре // *УФН*. 2000. Т. 170. С. 906—912.

33. **Zhao G., Wang Y. S.** Possible superconductivity above 400 K in carbon-based multiwall nanotubes. Preprint. <http://www.arxiv.org/abs/cond-mat/0111268> (to be published in *Phil. Mag. B*).

34. **Frank S. et al.** Carbon nanotube quantum resistor // *Science*. 1998. V. 280. P. 1744—1746.

35. **Makarova T. L. et al.** Magnetic carbon // *Nature (London)*. 2001, V. 413. P. 716—718.

36. **Кукушкин А. Б., Ратцев-Картинов В. А.** Долгоживущие микропылевые каркасы в электрических разрядах как новый тип наноматериалов // *Сборник трудов научной сессии МИФИ-2001*. Москва: МИФИ. Январь 2001. Т. 9. С. 146—147.

37. **Кукушкин А. Б., Ратцев-Картинов В. А.** Микропылевые каркасы как новый тип наноматериалов: I. Наблюдения и проверка гипотез. II. Гипотезы // *Материалы 6-го Всероссийского совещания-семинара "Инженерно-физические проблемы новой техники"*. Москва: МГТУ им. Баумана. Май 2001. С. 11—14.

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 616.9

Н. Г. Рамбиди, д-р хим. наук, проф.,  
Международный НИИ проблем управления,  
Физический факультет МГУ

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПАРАДИГМ НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Рассматриваются пути практической реализации биомолекулярных информационно-логических устройств, принципиально отличных от полупроводниковой схемотехники и технологии.*

Реальностью последних лет сделали интенсивное возрождение нейросетевых представлений и разработка нейтрокомпьютеров — эффективных средств решения задач высокой вычислительной сложности.

Тем не менее, несмотря на то, что нейросетевая парадигма уходит своими корнями в 40-е годы прошлого столетия, пути ее оптимальной практической реализации, т. е. воспроизведения в "металле", в отличие от законченного понимания теоретических основ, остаются до сих пор не до конца понятыми.

В 40-е годы в основе подхода Мак Каллоха и Питтса — ядре нейросетевой парадигмы, лежало изучение архитектуры человеческого мозга. Да и сам подход, в сущности, был ориентирован скорее на объяснение отдельных аспектов высшей нервной деятельности, чем на создание эффективных информационно-логических средств.

То же самое, вообще говоря, можно сказать и о предпринятой в те же годы попытке фон Неймана разработать теорию клеточных самовоспроизводящихся ав-

томатов, которая по своей сущности имела биологическую подоплеку.

Все изменилось через 15 лет, когда, начиная с работ Розенблатта, было обращено пристальное внимание на теоретические основы нейронных сетей как средств обработки информации. На протяжении последующих лет были детально проанализированы принципы построения нейронных сетей, способных решать выбранные задачи. Были рассмотрены возможности обучения сети, которые приводят к структуре, оптимальной для решаемой задачи. Все это позволило создать позже, в 90-х годах прошлого столетия, эффективные специализированные нейросетевые устройства.

Тем не менее, проблема "железа", т. е. материального воплощения нейросетевых представлений, оставалась на протяжении многих лет практически вне рассмотрения. И поэтому создание нейрокомпьютеров пошло по наиболее "накатанному" пути — использованию планарной полупроводниковой схемотехники и технологии, прекрасно зареко-

мендовавших себя в разнообразных микросистемных устройствах.

Нужно признать, что до сих пор, в сущности, нет альтернативы дискретной и аналоговой полупроводниковой схемотехнике, которая используется для имитации нейрона и нейронных сетей. Это легко объяснимо, поскольку в силу фантастических преимуществ планарной технологии она вытеснила практически все предлагавшиеся ранее технологические воплощения вычислительных устройств. Более того, дискретная схемотехника создавалась для реализации фон-неймановской архитектуры. В этом смысле она оптимальна и, что не менее важно, она далеко не исчерпала своих возможностей.

Ситуация принципиально меняется, когда речь идет о разработке нейросетевых информационно-логических средств.

Основные принципы нейросетевой парадигмы фундаментально отличны от принципов парадигмы фон Неймана. В основе парадигмы фон Неймана лежит понятие неизменной по своей структуре программы. Изменение в программе хотя бы одного оператора приводит к распаду программы, которая становится неспособной выполнять свои функции.

В отличие от этого, в идеологии нейронной сети, даже в первоначальном подходе Мак Каллоха и Питтса, принципиально изложена возможность малых изменений структуры сети. Концепция переменных весов нейронов позволяет варьировать их в некоторой области значений, не вызывая качественных изменений режима функционирования сети.

Именно в этом полупроводниковая дискретная реализация



нейронных сетей принципиально противоречит их сущности.

В общем случае удаление из планарной схемы или добавление в нее хотя бы одного транзистора приводит к потере ее работоспособности (здесь не рассматриваются варианты дублирования информационных режимов, что, как нетрудно видеть, не меняет общих выводов). Поэтому постепенная адаптация схемы к наиболее эффективному решению конкретной задачи встречает принципиальные трудности при использовании полупроводниковой планарной технологии.

В то же время известные биологические системы с архитектурой нейронных сетей построены из исходных молекулярных фрагментов, качественно отличных от полупроводниковых элементов (транзисторов). Одной из основных и, по-видимому, наиболее важных из особенностей является структурная избыточность молекулярного объекта по отношению к его функциям. Так, биополимерные молекулы белков ферментов играют важную роль в функционировании биологических систем. Их структура представляет собой сочетание функциональной группировки, определяющей функции фермента, и протяженного (углеводородного) "хвоста". Замечательным свойством этой структуры является то, что отщепление даже сравнительно больших фрагментов этого хвоста приводит лишь к несущественному малому изменению функций фермента.

Важным классом объектов с функциональной избыточностью

являются реакционно-диффузионные системы, примеры которых можно найти на разных уровнях структурной организации. Это и ткани человеческого тела (миокард), и колонии микроорганизмов, и биохимические и химические среды, и плазменные и твердотельные устройства. Динамика таких систем описывается наборами нелинейных дифференциальных уравнений. Как правило, в пространстве состояний, отвечающем подобной системе, проявляются бассейны аттракторов, т. е. области определенных динамических режимов, в которых система самопроизвольно переходит в стационарное состояние. Но при этом движение в пределах бассейна не приводит к качественным изменениям динамики, т. е. к переходу к другому режиму (бассейну другого аттрактора). Это можно определить как динамическую избыточность системы.

В общем случае структурная и (или) динамическая избыточность элементов (молекулярных фрагментов), исходных для построения информационно-логических систем, является основой их изменчивости. А это, в свою очередь, должно лежать в основе эволюционного отбора. Поэтому из таких исходных элементов, в принципе, могут быть построены информационно-логические устройства, постепенно обучающиеся наиболее эффективному решению задачи в процессе самого решения.

Естественно, я могу ошибаться, но я отталкиваюсь от понимания теоретических основ, анали-

за совокупности экспериментальных фактов и интуитивного восприятия тех или иных аспектов проблемы практического воплощения нейронных сетей. По-видимому, сегодня забрезжил "свет в конце туннеля", т. е. видны пути практической реализации биомолекулярных информационно-логических устройств, принципиально отличные от полупроводниковой схмотехники и технологии. Их основные отличия — естественный, адекватный структуре нейронной сети и ее динамике характер практической реализации.

В серии последующих статей будет сделана попытка проиллюстрировать возникшие возможности не теоретическими посылами или же интуитивными соображениями, а результатами конкретных экспериментальных работ по созданию информационно-логических устройств. Они еще далеки от коммерческой реализации, тем не менее, это реальные устройства, позволяющие оценить перспективы обсуждаемого подхода.

В качестве дополнительного соображения хотелось бы заметить, что переход от полупроводниковой цифровой техники к другим, более естественным материальным воплощениям нейронных сетей может оказаться не более революционным, чем переход в прошлом от вакуумных ламп к полупроводникам. Нельзя забывать, что именно полупроводниковая техника оказалась естественным практическим воплощением парадигмы фон Неймана.

УДК 616.9.078.33-073.537

**В. Н. Злобин**, д-р техн. наук, проф.,  
**Н. С. Осип**, д-р биол. наук, проф.,  
**В. Г. Помелова**, д-р биол. наук, проф.,  
 Государственный НИИ биологического  
 приборостроения Минздрава РФ (Москва)

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СРЕДСТВА ИНДИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ИММУНОФЛЮОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

*Рассмотрены возможности совершенствования средств экспресс-индикации на основе комбинации современных методов иммунохимического и молекулярно-генетического анализа с новейшими разработками в области создания люминесцентных меток, техники регистрации сверхслабых световых потоков в режиме счета фотонов и лазерных методов спектроскопии.*

Быстрое обнаружение и идентификация возбудителей опасных инфекционных заболеваний, т. е. специфическая индикация (СИ), занимают ключевое место в системе мероприятий по противобиологической защите войск и населения при возникновении экстремальных ситуаций, связанных как с преднамеренным применением поражающих биологических агентов в качестве средства оружия и терроризма, так и с авариями на объектах, где ведутся работы с болезнетворными микроорганизмами и вирусами [5, 32], а также при экологическом мониторинге природных очагов инфекций и клинической лабораторной диагностике.

Сложность задач по созданию универсальных средств СИ определяется необходимостью учета ряда факторов, среди которых наиболее существенны следующие:

- низкая концентрация возбудителей в пробах из природных источников (вода, почва, воздух), в материалах из очагов (суспензии из переносчиков, суспензии из органов животных), в пробах из биологических жидкостей организма человека и животных (кровь, моча, ликвор и др.);
- необходимость проведения экспресс-индикации в сроки, достаточные для принятия мер по экстренной защите и профилактике;
- возможное присутствие в анализируемых пробах нескольких болезнетворных агентов, в том числе представителей различных таксономических групп (бактерии, грибы, вирусы), сапрофитной микрофлоры, а также неспецифических мешающих примесей (пыль, различные органические и неорганические вещества), затрудняющих учет и интерпретацию результатов [5, 7, 20].

В связи с изложенным к разрабатываемым средствам СИ предъявляются жесткие требования по чувствительности, быстродействию, специфичности, производительности, возможности одновременного выявления в пробе нескольких биоагентов

(мультикомпонентный анализ). Не последнюю роль играют требования по безопасности для персонала и экономичность. Основные требования к средствам СИ возбудителей инфекций и токсинов перечислены в табл. 1.

Наиболее перспективными для решения задач СИ являются методы биоспецифического связывания, основанные на специфическом "узнавании" возбудителя, его антигенов и (или) продуктов метаболизма. Среди них основными методами экспресс-индикации возбудителей различных таксономических групп и серодиагностики вызываемых ими заболеваний на протяжении многих лет остаются:

- реакция иммунофлюоресценции (РИФ) с использованием люминесцентного микроскопа и меток типа ФИТЦ (флюоресцеина изотиоцианат);
- реакция непрямой гемагглютинации (РНГА);
- метод твердофазного иммуноферментного анализа (ИФА) [5].

Эти методы просты и экономичны, однако по своим функциональным возможностям (специфичности, чувствительности, помехоустойчивости) уже не могут конкурировать с современными методами иммунохимического и молекулярно-генетического анализа.

Процесс перехода к новому поколению средств СИ довольно сложен и сопряжен с большими финансовыми затратами, что обусловлено необходимостью комплексной разработки методик, технических средств и биореагентов (тест-систем), предназначенных для выявления широкого спектра возбудителей. Кроме того, как показывает опыт НИИ военной медицины по апробации новых методов, их реальный выбор для целей экспресс-индикации существенно ограничен [3, 5]. Так, серьезным препятствием для создания универсальных средств экспресс-индикации на основе твердофазных иммуноферментных методов служат относительно низкая температурная и временная стабильность иммунореагентов и низкий уровень защиты персонала при работе с полистирольными планшетами. Для методов молекулярной гибридизации нуклеиновых кислот на основе полимеразной цепной реакции (ПЦР) по-прежнему актуальны вопросы контаминации проб продуктами реакции, что обуславливает высокий уровень ложноположитель-

Таблица 1

**Основные требования к средствам экспресс-индикации возбудителей инфекционных заболеваний и токсинов**

Параметр	Значение параметра
Чувствительность	Единичные клетки или вирионы, токсины в концентрации 0,1 нг/мл
Быстродействие	1—10 мин (не более 2 ч)
Специфичность	Вид, штамм, серотип возбудителя
Помехоустойчивость	Работоспособность при наличии в пробе неспецифических компонентов из воздуха, воды, почвы
Универсальность	Бактерии, вирусы, токсины
Производительность	Не менее 100 анализов за 1 ч
Стабильность реагентов	Не менее 2 лет

ных реакций, а также высокая стоимость, низкая производительность и длительность анализа [3].

Очевидно, что ни один из разработанных к настоящему времени методов биоспецифического связывания не удовлетворяет полностью требованиям, предъявляемым к методам экспресс-индикации, однако может быть эффективным при решении конкретных задач СИ.

Можно выделить три группы задач, принципиально различающихся по срокам проведения экспресс-индикации (табл. 2):

- быстрая, в пределах 5—20 мин, оценка эпидемиологической ситуации в случае возникновения экстремальных обстоятельств, связанных с возможностью распространения болезнетворных агентов;
- экологические исследования в очагах, клиническая лабораторная диагностика с использованием высокочувствительных и специфичных, но не обязательно быстрых методов;
- санитарно-эпидемиологический надзор, требующий проведения непрерывного мониторинга за состоянием водных источников и воздушной среды.

Быстрая оценка биологической обстановки по результатам экспресс-индикации возбудителей чрезвычайно важна для своевременного принятия мер по противобиологической защите. Как показано в табл. 2, для решения этой группы задач наиболее целесообразно использовать методы гомогенного иммуноанализа, а также иммуносенсоры и методы иммунофильтрации, хотя они могут уступать другим методам по чувствительности, помехоустойчивости, производительности и ряду других параметров.

Для экологических исследований и клинической лабораторной диагностики используются высокочувствительные и специфичные методы твердофазного иммуноанализа (ИФА, ИРМА и др.), молекулярно-генетические методы (ПЦР); высокоэффективна РИФ, особенно с применением моноклональных антител. Преимуществами твердофаз-

ных методов являются высокая производительность за счет использования планшетной или мембранно-фильтрационной технологии, а также существенное повышение помехоустойчивости иммуноанализа за счет отмывания твердой фазы от неспецифических компонентов.

Для осуществления непрерывного мониторинга целесообразно проведение анализа на иммуносорбентах, а также использование иммуносенсоров и проточной клеточной флуорометрии.

Применение всех перечисленных методов особенно перспективно в сочетании с люминесцентным микроанализом, что обусловлено следующими важными преимуществами этого типа анализа:

- люминесцентный микроанализ обеспечивает регистрацию сигнала бесконтактным способом. При этом отсутствуют серьезные ограничения для детекции предельно низкого содержания люминесцентных меток (до  $10^{20}$  моль/л в пробе);
- люминесцентные зонды обладают большой стабильностью и устойчивы к воздействию широкого спектра примесей;
- разработка нового поколения люминесцентных иммунохимических и молекулярно-генетических тестов ориентирована на преемственность в создании диагностических реагентов на основе базовых биотехнологий, первоначально разработанных для получения диагностикумов для иммунолюминесцентной микроскопии, ИФА, ПЦР и др.

Кроме того, одним из основных достоинств люминесцентного микроанализа является легкость его адаптации практически ко всем известным иммунохимическим и молекулярно-генетическим методикам для "считывания" результатов реакции, что позволяет повысить их чувствительность.

Все изложенное обусловило выбор метода иммунофлуоресцентного микроанализа в качестве базового для создания в НИИ биологического приборостроения средств экспресс-индикации. Следует особо отметить, что в рамках этой работы в едином комплексе разрабатывались технические средства, химические и иммунохимические реагенты, методы иммуноанализа, тест-системы для выявления возбудителей различных таксономических групп. В данном сообщении мы попытаемся проанализировать тенденции развития различных методических подходов и оценить перспективы совершенствования средств экспресс-индикации на основе люминесцентного микроанализа.

На рисунке схематично представлены основные механизмы молекулярной люминесценции, лежащие в основе рассматриваемых нами методов.

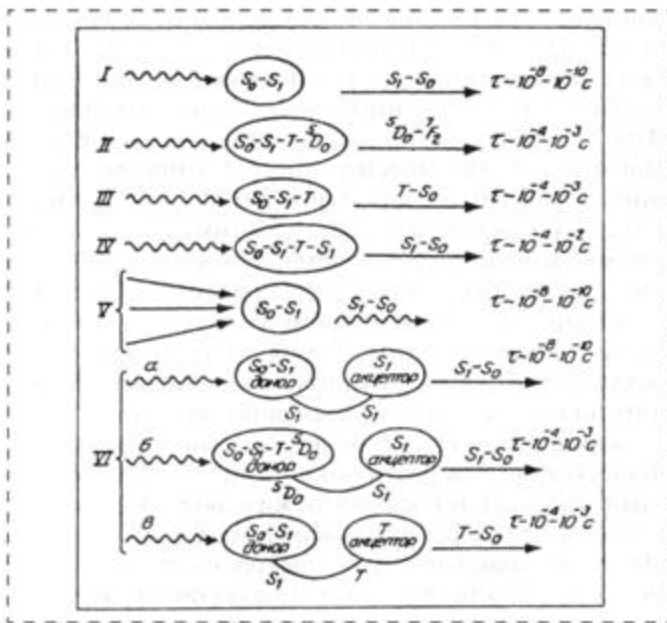
### Методы иммунофлуоресцентного анализа в объеме пробы

Развитие гомогенных методов иммунофлуоресцентного анализа тесно связано с обнаружением и количественной оценкой содержания низкомоле-

Таблица 2

Область преимущественного использования люминесцентных методов контроля биоспецифического связывания для реализации задач СИ

Быстрая оценка эпидемиологической обстановки ( $\tau = 5-20$ мин)	Экологический мониторинг, клиническая диагностика ( $\tau < 2$ ч)	Санитарно-эпидемиологический надзор (непрерывный мониторинг)
Объемный (гомогенный, суспензионный) иммуноанализ	Твердофазный иммуноанализ	Анализ на иммуносорбентах
Иммуносенсоры	Иммунолюминесцентная микроскопия	Иммуносенсоры
Иммунофильтрация	Молекулярная гибридизация нуклеиновых кислот	Проточная клеточная флуорометрия



#### Основные механизмы молекулярной люминесценции:

*I* — быстрая люминесценция (ФИТЦ); *II* — длительная люминесценция хелатных комплексов лантаноидов (Eu, Tb, Sm, Dy); *III* — фосфоресценция металлопорфиринов; *IV* — замедленная флюоресценция металлопорфиринов; *V* — двух- и трехфотонное возбуждение люминесценции (DAPI); *VI* — межмолекулярный безызлучательный перенос энергии в системе лиганд\*—аналит—лиганд\*;  
 $S_0$  — основной,  $S_1$  — возбуждаемый синглетные уровни молекулы;  $T$  — триплетный уровень молекулы;  $^5D_0$  и  $^7F_2$  — электронные уровни Eu.  
 Волнистая стрелка — фотовозбуждение люминесценции; прямая стрелка — люминесценция; символы в овале — внутри- и межмолекулярный перенос энергии фотовозбуждения

кулярных соединений в биологических образцах и использованием ФИТЦ в качестве основной метки (см. рисунок, *I*). Наибольшее распространение получил иммунофлюоресцентный анализ, основанный на регистрации эффекта изменения степени поляризации ФИТЦ при биоспецифическом связывании пары лиганд — аналит, один из компонентов которой был конъюгирован с меткой [16]. Меченные ФИТЦ и свободные молекулы анализируемого вещества конкурируют за связывание с антителами, при этом чем сильнее изменяется сигнал люминесценции (поляризации), тем выше концентрация искомого аналита в пробе. Этот принцип детекции оказался малопродуктивным в отношении крупных биомолекул, вирусов и микроорганизмов, так как меченные ФИТЦ молекулы антител давали слабый отклик на связывание с антигеном. Кроме того, его реализация оказалась чрезвычайно затрудненной для проб, содержащих мешающие примеси, в том числе люминесцирующие.

Тем не менее привлекательность идеи быстрого обнаружения биоагентов в объеме пробы стимулировала развитие других методических подходов. Один из них — метод универсального полифазного концентрирования комплексов биоагентов (вирусов, микроорганизмов, токсинов) с мечеными

ФИТЦ антителами [14]. Суть этого метода заключается в том, что в пробирку помещают две жидкости (фосфатный солевой раствор и полиэтиленгликоль) в равных объемах, затем вносят смесь меченных ФИТЦ антител и анализируемой пробы и встряхивают пробирку до образования суспензии. Физико-химические условия подбирают таким образом, чтобы после расслоения суспензии на две фазы на границе их раздела концентрировались биоагенты и их комплексы с мечеными ФИТЦ антителами, а несвязавшиеся антитела и примеси оставались в одной из фаз. При сканировании пробирки в специализированном иммунофлюоресцентном анализаторе на границе раздела фаз наблюдается пик люминесценции, превосходящий по интенсивности пик в контрольной пробе, не содержащей биоагент. Этот метод, получивший в 1983—1984 гг. приборную реализацию, по существу является первым серьезным опытом по созданию средств экспресс-индикации для обнаружения возбудителей опасных инфекций на основе объективного приборного люминесцентного иммуноанализа. Основными недостатками метода являются невысокая устойчивость к воздействию больших концентраций мешающих примесей и сильное влияние степени очистки антител на результаты анализа.

Эти недостатки удалось преодолеть за счет другого методического приема, разработанного нами. Суть его заключается в том, что в качестве двухфазной системы используются растворы с различной удельной плотностью. Плотность верхнего слоя ниже, а нижнего выше по сравнению с удельной плотностью биологических агентов. При выявлении корпускулярных антигенов (микроорганизмов) на поверхность двухфазной системы наслаивают люминесцирующие антитела и анализируемую пробу. При выявлении вирусов, растворимых антигенов и токсинов их предварительно сорбируют на латексных иммуносорбентах. На следующем этапе анализа пробирку центрифугируют (5000 об/мин) в течение 5 мин, а затем сканируют в специализированном флюориметре. В зоне равновесной плотности наблюдается пик люминесценции, обусловленный образованием иммунного комплекса биоагента с люминесцирующими иммуноглобулинами. Высокие концентрации примесей распределяются в одной из фаз в соответствии с их плотностью и не мешают определению. Предложенный способ позволил не только существенно повысить помехоустойчивость люминесцентного иммуноанализа, но и выявлять в пробе одновременно несколько корпускулярных биоагентов с помощью смеси моноспецифических люминесцирующих иммуноглобулинов.

Особое место среди гомогенных методов занимает липосомальный иммуноанализ [2]. Суть его состоит в том, что липосомы, нагруженные флюоресцентным красителем и содержащие в своих поверхностных структурах антитела, при взаимодей-

ствии с гомологичными биоагентами становятся механически непрочными (проницаемыми) для флуоресцентных красителей. Вытекающий краситель из-за высокой разности концентраций внутри и снаружи липосомы изменяет свое агрегатное состояние, что приводит к резкому усилению его флуоресценции. При очевидной простоте и экспрессности данного метода он имеет один существенный недостаток, ограничивающий его применение для целей СИ: липосомы, как и иммунореагенты, недостаточно стабильны и не выдерживают длительных сроков хранения.

Наиболее многообещающим оказался другой методический подход, основанный на явлении переноса энергии возбуждения люминесценции с молекулы донора на молекулу акцептора. Суть его заключается в том, что для детекции биоагентов используют антитела, меченные не одним, а двумя и более люминесцентными метками, причем спектр эмиссии донора должен перекрываться спектром поглощения акцептора. При биоспецифическом связывании меченых антител с антигеном из-за высокой плотности эпитопов на поверхностных антигенных детерминантах возбудителей молекулы донора и акцептора оказываются пространственно сближенными, т. е. создаются условия для переноса энергии возбуждения на молекулу акцептора. Эффективность переноса в сильной степени (как функция от  $R_6$ ) зависит от расстояния между молекулами. Усиление сигнала люминесценции донора свидетельствует о наличии искомого биоагента.

Впервые такой подход был реализован с помощью пары флуоресцеин—родамин (см. рисунок *VIa*). Он характеризовался высоким быстродействием, но, к сожалению, имел существенные ограничения по чувствительности и помехоустойчивости из-за высокого уровня фоновой люминесценции примесей. Мы попытались снизить фон за счет использования пары флуоресцеин—Pd-копропорфирин [11] (см. рисунок, *VIб*). В этом случае перенос энергии происходит на фосфоресцентный (триплетный) уровень молекул акцептора, а регистрация фосфоресценции с длительностью  $10^{-3}$  с осуществляется в режиме временного разрешения с отсечкой короткоживущей составляющей. Как оказалось, этот прием также не позволил существенно снизить фоновую люминесценцию вследствие частичного перекрывания областей возбуждения флуоресцеина и металлопорфирина. Использование хелатов Eu и Tb с ДТРА-карбостирилом 124 в качестве доноров и тетраметилпродамина и карбоцианина Су5 в качестве акцепторов [36, 37] не повышало чувствительность.

Ограничения, обусловленные фоновой люминесценцией в системе донор—акцептор, удалось преодолеть за счет использования системы, включающей хелатирующий комплекс Eu на основе криптата в качестве донора и аллофикианина в качестве акцептора [31] (см. рисунок, *VIв*). В такой

системе перенос энергии осуществляется последовательно с триплетных уровней молекулы хелата на электронную систему Eu, а затем на синглетные возбужденные уровни молекул аллофикианина. При этом регистрируется кинетика изменения длительной люминесценции с временем затухания, характерным для ионов Eu, но в области излучения аллофикианина (650 нм). В настоящее время этот подход является одним из наиболее перспективных для создания средств экспресс-индикации с быстродействием 1–5 мин и чувствительностью  $10^{-12}$ – $10^{-14}$  моль/л (в пересчете на концентрацию метки), причем чувствительность ограничивается преимущественно афинностью иммунореагентов. Несмотря на довольно сложные технические средства реализации этого метода (импульсный стробоскопический режим возбуждения люминесценции с регистрацией сигнала в режиме счета фотонов), данный подход следует считать одним из наиболее перспективных для создания средств специфической экспресс-индикации, предназначенных для анализа небольшого массива проб.

#### Твердофазные методы иммунолюминесцентного анализа

Совершенствование методов и технических средств экспресс-индикации на основе твердофазного люминесцентного иммуноанализа направлено на поиск новых люминесцентных меток и методических приемов детекции, обеспечивающих существенное повышение соотношения сигнал/фон. Следует отметить, что в задачи данной статьи не входит рассмотрение люминесцентных меток, используемых в качестве флуорогенных, а также длительно люминесцирующих (фосфорогенных) и хемилюминесцентных субстратов для ИФА, что связано с их недостаточной стабильностью, ограничивающей возможность применения для целей экспресс-индикации [19].

Попытки использовать ФИТЦ, а также такие флуорохромы, как порфирины, фикобилины, филокоцианины в твердофазном анализе с детектированием короткоживущей люминесценции пересчитанных меток оказались малоэффективными из-за сильной фоновой люминесценции твердой фазы (мембран и различных полимерных материалов, используемых для сорбции иммунореагентов) [13]; чувствительность методов детекции (в пересчете на концентрацию метки) при этом не превышала  $10^{-10}$ – $10^{-12}$  моль/л.

Принципиально более высокий уровень чувствительности ( $10^{-13}$ – $10^{-14}$  моль/л) был достигнут за счет использования меток, обладающих аномально длительной люминесценцией, и специального способа ее выделения в режиме временного разрешения с отсечкой короткоживущей фоновой составляющей. Впервые такой подход в начале 80-х годов был реализован финскими исследователями в лантанидном иммунофлуоресцентном анализе —

так называемом методе DELFIA, или диссоциативно-усиленном лантанидном флюоресцентном иммуноанализе [24]. В качестве меток были использованы хелаты лантаноидов, ковалентно связанные с антителами (см. рисунок, II — для Eu). Перед "считыванием" результатов реакции проводили перекомплексацию ионов лантаноидов (Eu, Tb, Dy, Sm) из комплексов с антителами в усиливающий раствор, содержащий избыток фотосенсибилизаторов, что позволяло резко повысить "выход" люминесценции.

Метод DELFIA прекрасно зарекомендовал себя при диагностике вирусных инфекций [30] и нашел применение в медицинской иммунодиагностике, в частности, для определения в сухом пятне крови одновременно 3—4 маркеров, свидетельствующих о наличии у новорожденных врожденных аномалий развития. Вместе с тем, несмотря на возможность одновременного определения в одной пробе до четырех различных ионов лантаноидов, метод DELFIA оказался недостаточно эффективным для проведения высокочувствительного многокомпонентного анализа возбудителей инфекций. Это связано со снижением чувствительности метода при использовании вместо Eu других редкоземельных меток, обладающих более слабой люминесценцией. Кроме того, при создании методик многокомпонентного анализа очевидные преимущества имеют недиссоциативные схемы, позволяющие осуществлять идентификацию биоагентов при детектировании люминесценции непосредственно с поверхности твердой фазы из отдельных зон биоспецифического связывания.

В процессе поиска новых длительно люминесцирующих меток для недиссоциативного типа иммуноанализа было создано и испытано большое количество различных хелатирующих агентов [15, 18, 25], в том числе разработанных специалистами НИИ биологического приборостроения [35], однако ни один из них пока не позволил достичь чувствительности иммуноанализа, эквивалентной методу DELFIA.

В связи с этим представляет интерес использование в качестве длительно люминесцирующих меток металлокомплексов Al и Zn, обладающих замедленной флюоресценцией (см. рисунок, IV), и

фосфоресцирующих Pt- и Pd-комплексов водорастворимых металлопорфиринов [1, 6, 10, 12] (см. рис. III), которые могут оказаться весьма перспективными для создания многокомпонентного иммуноанализа. Сравнение спектрально-люминесцентных характеристик металлопорфиринов и хелатов лантаноидов показывает (табл. 3), что по уровню люминесценции комплексы водорастворимых порфиринов с Pt превосходят Eu в усиливающем растворе. Вместе с тем вследствие довольно высокой степени гидрофобности не удастся связать с антителами без повреждения их структуры более 1—2 молекул металлопорфиринов, в результате чего фосфоресцентный иммуноанализ с металлопорфиринами проигрывает в чувствительности методу DELFIA [6]. Снижение гидрофобности порфиринов может быть достигнуто за счет их гликозилирования [40] и использования специальных носителей (полимерных молекул или наночастиц), что позволит увеличить нагрузку метки на молекулы антител и, как следствие, увеличить чувствительность анализа.

Последние данные по созданию люминесцирующих хелатирующих комплексов лантаноидов на основе сложных координационных гетероциклических соединений и  $\beta$ -дикетонатов [25, 35] также позволяют рассчитывать на создание в ближайшей перспективе меток, не уступающих по пороговому уровню детекции методологии DELFIA.

Разработка принципиально другого подхода для повышения чувствительности биологического микроанализа основана на двух- и трехфотонном возбуждении люминесценции (см. рисунок, V). Этот подход позволяет регистрировать люминесценцию с характерным для меток спектром эмиссии, тогда как возбуждение люминесценции осуществляется в более красной области, смещенной на 100—300 нм. Антистоксовское смещение резко снижает фон люминесценции. Реализация этого метода основана на использовании довольно мощных короткоимпульсных ( $10^{-15}$  с) лазерных источников [23, 27, 28, 41]. Вследствие сопоставимой чувствительности этот метод может составить серьезную конкуренцию люминесцентному анализу с временным разрешением (DELFIA).

Таблица 3

Фотофизические характеристики люминесцентных меток

Соединение	Квантовый выход, $\varphi$	$\tau \cdot 10^6$ , с	$\lambda_{\text{возб}}$ , нм	$\lambda_{\text{эм}}$ , нм	$\epsilon$ , $\text{M}^{-1} \cdot \text{CM}^{-1}$	$\varphi \cdot \epsilon$	Источник литературы
Eu в усиливающем растворе	0,7	730	340	615	37 600	26 320	[25]
Eu-4-(арилэтинил)-пиридин	—	1310	314	615	—	26 060	[25]
Pt-копропорфирин III-тетраакислота	0,6	100	381	645	284 000	170 400	[10]
Pt уропорфирин III-октаакислота	0,69	75	381	646	191 000	132 000	[12]
Pd копропорфирин III-тетраакислота	0,2	1200	392	645	184 000	36 000	[10]
Pd-уропорфирин III-октаакислота	0,24	1200	392	665	163 500	39 240	[6]

Примечание.  $\tau$  — время жизни люминесценции;  $\lambda_{\text{возб}}$ ,  $\lambda_{\text{эм}}$  — длины волн максимумов соответственно возбуждения и эмиссии люминесценции;  $\epsilon$  — коэффициент экстинкции. Прочерк — данные отсутствуют.

Параллельно с развитием химии люминесцентных меток и методик иммунологического анализа происходит активный переход на лазерные источники возбуждения и оптоволоконные системы передачи сигнала. Внедрение этих базовых элементов с компьютерной обработкой информации открывает блестящие перспективы для создания компактных регистрирующих устройств и расширения их функциональных возможностей без снижения чувствительности анализа [20, 21]. Прежде всего речь идет о существенном уменьшении объемов анализируемых образцов до микролитров, а также о снижении расхода диагностических реагентов и стоимости анализа, при том что число анализируемых образцов для планшетных технологий возрастает с 96 до 384 и даже до 1536. Одновременно изменяется и формат вспомогательных аксессуаров (дозаторов, промывателей и др.) [4]. По-видимому, в ближайшей перспективе произойдет существенное смещение акцентов от фотометрических к люминесцентным методам твердофазного микроанализа. За последние два года появились новые производители приборов для флюороиммуноанализа. Уже сейчас эти приборы и вспомогательные аксессуары к ним начинают доминировать на рынке приборов для иммунодиагностики [4] и по существу становятся базовыми при создании методик проточного люминесцентного сортирования клеток, иммунобиосенсорных устройств и иммунолюминесцентной микроскопии.

#### Люминесцентные методы детекции продуктов молекулярно-генетического анализа

Молекулярно-генетический анализ обладает наибольшей чувствительностью из всех известных методов экспресс-индикации. Применение традиционных флюоресцентных меток для обнаружения биоагентов с помощью ДНК-зондов, как правило, позволяет выявлять не менее  $10^5$ – $10^6$  копий нуклеиновой кислоты. Амплификация генетического материала методом ПЦР нуклеиновых кислот снижает этот порог до единичных копий. Развитие методологии ПЦР в настоящее время рассматривается как одно из важнейших направлений для создания чувствительных и специфичных методов индикации и идентификации возбудителей, не имеющих равных среди методов лабораторной диагностики по чувствительности и специфичности анализа. Вместе с тем опыт практического применения ПЦР для экспресс-индикации возбудителей показывает, что существенными ограничениями метода являются его длительность и низкая помехозащищенность от контаминации продуктами реакции. В связи с этим одним из важных направлений в совершенствовании методологии ПЦР для целей СИ являются разработка методических приемов и создание люминесцентных зондов нового поколения, позволяющих существенно снизить число циклов амплификации за счет повышения чувствительно-

сти детекции метки. Как и в случае твердофазного иммуноанализа, наиболее перспективно использование длительно люминесцирующих меток на основе хелатов лантаноидов и металлопорфиринов [22, 38, 39]. Отрабатываются приемы проведения всех стадий анализа (включая и этап детекции зондов) непосредственно в лунках микротитровальных планшетов. Для контроля продуктов ПЦР весьма перспективными могут оказаться описанные выше метки для двухфотонного возбуждения люминесценции [29].

Методы амплификации нуклеиновых кислот позволяют кардинально повысить чувствительность иммунохимических методов обнаружения токсинов, антигенов за счет создания гибридных молекул антител, меченных олигонуклеотидами. Твердофазный анализ при этом проходит две стадии. На первой стадии на твердой фазе адсорбируется комплекс искомого аналита и связанных с ним молекул гибридных антител, на второй осуществляются амплификация нуклеиновой кислоты и ее выявление с помощью различных (в том числе люминесцентных) ДНК-зондов. В ряде работ было показано, что использование высокоафинных антител, меченных олигонуклеотидами, позволяет выявлять десятки молекул аналита в пробе [17, 34].

#### Люминесцентная микроскопия

Несмотря на то что в практической работе по-прежнему доминируют традиционные методики иммунофлюоресцентного анализа с меткой антител ФИТЦ, современная база люминесцентной микроскопии претерпела кардинальные изменения. Применение нескольких флюорохромоов, различающихся по спектрально-люминесцентным характеристикам, позволяет гораздо надежнее осуществлять идентификацию возбудителей. Функциональные возможности методов иммунолюминесцентной микроскопии заметно расширяются за счет применения длительно люминесцирующих меток и регистрации сигнала люминесценции в режиме фосфометрии или двухфотонного возбуждения с отсечкой фона люминесценции [39].

По-видимому, сочетание современных технологий ультрамикроанализа, используемых в люминесцентной микроскопии, таких как лазерное возбуждение люминесценции ДНК-зондов с регистрацией в режиме фосфоресценции или двухфотонного возбуждения, с компьютерным распознаванием образов позволит исключить этапы амплификации и контролировать наличие биоагентов в пробе непосредственно по уровню сигнала люминесценции.

Вместе с тем сложность и высокая стоимость оборудования, необходимого для осуществления такого типа анализа, с учетом имеющихся более простых и доступных средств индикации обуславливают возможность его внедрения только в крупных диагностических центрах. Это в полной мере относится и к системам для проточного анализа. Пер-

спективы их использования для задач экспресс-индикации, по-видимому, также весьма ограничены.

### Люминесцентные иммуносенсоры

Иммуносенсоры привлекательны тем, что, как правило, не требуют операций по предварительной пробоподготовке и "работают" в реальном масштабе времени. Создание люминесцентных иммуносенсоров является одним из приоритетных направлений в разработке средств экспресс-индикации. В этой области также доминируют методические подходы с использованием длительно люминесцирующих меток с регистрацией в режиме временного разрешения [26, 27].

Вместе с тем анализ данных научно-технической литературы [8, 9, 33] показывает, что в отличие от полупроводниковых и электрохимических иммуносенсоров создание капиллярных и оптоволоконных иммунолюминесцентных сенсоров в настоящее время не вышло из стадии научно-методической и технологической разработки. По-видимому, еще потребуется определенный период времени для их "обкатки" сначала для контроля за накоплением биомассы и продуктов микробиологического синтеза при реакторном культивировании бактерий и вирусов [9], а затем для расширения области применения в целях экологического непрерывного мониторинга, а также решения задач лабораторной экспресс-диагностики.

В заключение отметим следующее. Принципиально важно, что задачи экспресс-индикации биологических агентов ни в настоящее время, ни в ближайшей перспективе, по-видимому, не смогут быть решены с помощью какого-либо одного универсального метода.

Для исследований, связанных с необходимостью быстрого обнаружения возбудителей и токсинов, оптимальными являются иммуносенсорные технологии и технологии, реализующие принципы гомогенного иммуноанализа.

Для стационарных лабораторий основное значение приобретают такие характеристики методов, как чувствительность, специфичность, производительность, тогда как фактор времени анализа менее важен. В этой ситуации методы молекулярной гибридизации и мультикомпонентного твердофазного иммуноанализа с регистрацией продуктов биоспецифического связывания в режиме временного разрешения люминесценции, взаимно дополняя друг друга, по-видимому, будут доминировать над остальными.

В связи с нарастающим антропогенным воздействием на окружающую среду все большее значение приобретает непрерывный динамический мониторинг воды и воздуха, который, по-видимому, станет важным самостоятельным направлением в развитии средств биоиндикации, предназначенных для проведения экологического контроля. Это обусловлено тем, что практически все известные

индикационные методы предусматривают разовый отбор проб ограниченного объема, например, из рек, каналов и других проточных систем. Возбудители инфекций попадают в такие пробы дискретно и не всегда могут быть выявлены при последующем иммуноанализе, что, безусловно, снижает эффективность мероприятий противобиологической защиты. Непрерывный мониторинг природных очагов и объектов внешней среды, включающий селективное концентрирование возбудителей, в том числе из проб большого объема, позволит решить эту задачу.

### Список литературы

1. А. с. 1561042 СССР. Способ проведения иммуноанализа / Осин Н. С., Лепешкина Н. В., Папковский Д. Б. и др. // Бюл. изобрет. 1990. № 16.
2. А. с. 1720003 СССР. Способ определения липополисахаридных антигенов микроорганизмов в сыворотке крови / Скопинская С. Н., Ярков С. П., Злобин В. Н. // Там же. 1992. № 10.
3. Белоухов А. С. // Военная медицина: Проблемы профилактики, диагностики, лечения экстремальных состояний. — М., 1994. С. 335—343.
4. Информационные материалы фирмы Whatman Polyfilitronics // Biotech. Products intern. 1998. Vol. 10. N 2—3.
5. Клименко Ю. В., Гольдин Р. Б., Раевский К. К. и др. // Военная медицина: Проблемы профилактики, диагностики, лечения экстремальных состояний. М., 1994. С. 218—229.
6. Миронов А. Ф., Осин Н. С., Пономарева О. Н. и др. // Вестн. новых мед. технологий (Тула). 1997. Т. 4. С. 45—48.
7. Общая и частная вирусология / Под ред. В. М. Жданова, С. Я. Гайдамович. М., 1982.
8. Осин Н. С., Храмов Е. Н., Москвина Т. М. Способ твердофазного люминесцентного иммуноанализа компонентов биологических жидкостей. Пат. № 2082982 РФ // Бюл. изобрет. 1997. № 18.
9. Папковский Д. Б., Побережный М. М., Ярополов А. И. и др. // Всесоюзный иммунологический съезд, 1-й: Тезисы докладов. М. 1989. Т. 1. С. 166.
10. Пат. № 1707539 РФ. Маркер для люминесцентного иммуноанализа / Осин Н. С., Румянцева В. Д., Прошина Е. Ю. и др. // Бюл. изобрет. 1992. № 3.
11. Пат. № 20009505 РФ. Способ проведения иммуноанализа / Осин Н. С., Иванова А. М. // Там же. 1994. № 5.
12. Пат. № 2066455 РФ. Маркер для люминесцентного иммуноанализа / Осин Н. С., Миронов А. Ф., Румянцева В. Д. и др. // Там же. 1996. № 25.
13. Савицкий А. П. // ВИНТИ. Итоги науки и техники. Сер.: Биотехнология. М., 1987. Т. 3. С. 117—166.
14. Храмов Е. Н., Семенова Л. А., Кудряцева С. А. // Приборы и методы анализа и контроля в микробиологической промышленности. М., 1983. С. 124—128.
15. Alpha B., Ballardini R., Nalzi V. et al. // J. Photochem. and Photobiol. 1990. Vol. 52. P. 299.
16. Butirrez M. C., Bomez-Henz A., Perez-Benedito D. // Talanta. 1989. Vol. 36, N 12. P. 1187—1201.
17. Chang T. C., Huang S. H. // J. Immunol. Meth. 1997. Vol. 208. P. 35—42.
18. Diamandis E. P., Christopoulos T. K. // Analyt. Chem. 1990. Vol. 62. P. 62.
19. Dickson G. E. F., Pollac A., Diamandis E. P. // J. Pharmacol. Ther. 1995. Vol. 66. P. 207.
20. Ekins R. P., Chu F., Biggart E. // J. Ann. Biol. clin. 1990. Vol. 48. P. 655.
21. Ekins R., Chu F., Biggart E. // J. Clin. Immunoassay. 1990. Vol. 13. P. 169.
22. Fernandez M. R., Valencis-Gonzalez M. J., Diaz-Garcia M. E. // Analyt. Chem. 1997. Vol. GS. P. 2406—2410.
23. Friedrich D. M., McClain W. M. // J. Annu. Rev. phys. Chem. 1980. Vol. 31. P. 559—577.
24. Hemmila I. // Alloys and Compounds. 1995. Vol. 225. P. 480—485.
25. Hemmila I., Mikkala V.-M., Takalo H. // Ibid. 1997. Vol. 249. P. 158—162.
26. Ives J. T., Lin J. N., Andrade J. D. // L. Amer. Biotechnol. Lab. 1989. Vol. 7, N 7. P. 10. 12—16. 18.



27. Kooyman R. P. N., De Bruijn H. E., Greve J. // J. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1987. Vol. 798. P. 290–293.
28. Lacowicz J. R., Gruczynski I., Malak H. et al. // Biophys. J. 1997. Vol. 72. P. 567–578.
29. Leif R. C., Vallarino L. M., Kompala D. S. et al. // J. Cell Separat. Sci. Technol. ACS Symp. Ser. 1991. Vol. 464. P. 62.
30. Lovgren T., Hemmila I., Peterson K. et al. // Alternative Immunology / Ed. W. P. Collins. New York, 1985.
31. Mathis G. // J. clin. Chem. 1993. Vol. 39. P. 1953.
32. Morse S. S. // Emerg. insect. Dit. 1995. Vol. 1, N 1. P. 7–15.
33. Petrea R. D., Sepaniak M. J. // Talanta. 1988. Vol. 35, N 2. P. 139–144.
34. Sano T., Smith C. L., Cantor C. R. // Science. 1992. Vol. 258, N 1. P. 20–122.

35. Sabitsky A. P., Chudinov A. V., Krilova S. M. // Advances in Fluorescence Sensing Technology / Ed. J. R. Lakowicz. 1995. SPIE 2388. P. 429–434.
36. Selvin P. R., Hearst L. R. // Proc. nat. Acad. Sci. USA. 1994. Vol. 91. P. 10024.
37. Selvin P. R., Rana T. M., Hearst J. E. // J. Amer. chem. Soc. 1994. Vol. 116. P. 6029.
38. Seveus L., Vaisala M., Syrjanen S. et al. // J. Cytometry. 1992. Vol. 13. P. 329.
39. Seveus L., Vaisala M., Kojola H. et al. // J. Microsc. Res. Techn. 1994. Vol. 28. P. 149.
40. Spiro M., Gaud O., Sol V. et al. // European Biophysical Congress, 2-d: Abstracts. 1997.
41. Wirth M. J., Koskelo A., Sanders M. J. // J. appl. Spectrosc. 1981. Vol. 35. P. 14–21.

## ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 629.7.005

В. А. Ермаков, А. Н. Михоленок, СКБ "Топаз"

### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Приведены характеристики российских мини- и микросамолетов.*

Реализация концепции сохранения жизни и боеспособности личного состава, участвующего в боевых и опасных для жизни действиях, привела к возникновению идеи и поиску путей практического создания роботизированных миниатюрных и сверхминиатюрных аппаратов различного назначения. В различных иностранных источниках указывается, что вопросу создания летательных микроаппаратов уделяется большое внимание. О серьезности отношения к этой проблеме свидетельствует тот факт, что многие военно-исследовательские центры НАТО, Пентагон и ряд фирм США, исследовательские центры Германии, Японии и других стран выделяют значительные средства на проекты по созданию микроминиатюрных самолетов и вертолетов.

**Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.** (США) на базе технологий МЭМС (микроэлектромеханических систем) разрабатывает микрогазотурбинный двигатель в качестве силовой установки для микровоздушного аппарата.

**D-STAR Engineering, Shelton, Conn.** (США) занимается разработкой и созданием безопасных, малозаметных двигателей и силовых установок для перспективных микровоздушных аппаратов.

**California Institute of Technology, Pasadena, Calif.** (США) проектирует и создает электрические микроисточники питания для микровоздушных аппаратов.

По сведениям из различных доступных источников, разработаны и практически созданы не только

основные фрагменты конструкции летающей платформы, включая приводы, исполнительные устройства и системы управления ими, но и летающие микровоздушные аппараты нескольких типов. Все реально созданные аппараты, узлы, силовые установки и пр. разработаны и изготовлены на основе использования достижений современных технологий в области миниатюризации силовых элементов и устройств электромеханики, гидромеханики, электроники, материаловедения, источников питания и т. д.

В настоящее время исследуются научно-технические проблемы разработки и создается макетный образец микровоздушного аппарата для решения задачи мониторинга окружающей среды и пространства. Такие аппараты предназначены для передачи видеoinформации на расстояние до 10 км и характеризуются весьма малыми размерами. В настоящее время созданы аппараты массой до 100 г и размахом 200 мм, совершающие полет длительностью более 20 мин. со скоростью 70 км/ч.

Одной из причин роста интереса к микроДПЛА является то, что для их обслуживания и запуска не требуется специальных средств транспортировки и запуска и они могут обслуживаться одним человеком. Эти аппараты могут оказаться намного более дешевыми в производстве, чем уже используемые ДПЛА.

*Новизна исследований, проведение которых необходимо для достижения намеченной цели, определяется тем, что при решении проблемы создания микровоздушного аппарата будут использованы последние достижения в области аэродинамики малых чисел Рейнольдса, микроминиатюризации электро(гидро-, пневмо-) механических устройств и элементов, силовых установок, методов микропроцессорного управления.*

Проблема создания микроминиатюрных летательных аппаратов (по американской терминологии — "воздушных микроаппаратов") требует решения ряда научных и технических задач. Так, например, "новый класс" летательных аппаратов не позволяет автоматически переносить на него законы классической аэродинамики. Микроаппаратам труднее

27. Kooyman R. P. N., De Bruijn H. E., Greve J. // J. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1987. Vol. 798. P. 290–293.
28. Lacowicz J. R., Gruczynski I., Malak H. et al. // Biophys. J. 1997. Vol. 72. P. 567–578.
29. Leif R. C., Vallarino L. M., Kompala D. S. et al. // J. Cell Separat. Sci. Technol. ACS Symp. Ser. 1991. Vol. 464. P. 62.
30. Lovgren T., Hemmila I., Peterson K. et al. // Alternative Immunology / Ed. W. P. Collins. New York, 1985.
31. Mathis G. // J. clin. Chem. 1993. Vol. 39. P. 1953.
32. Morse S. S. // Emerg. insect. Dit. 1995. Vol. 1, N 1. P. 7–15.
33. Petrea R. D., Sepaniak M. J. // Talanta. 1988. Vol. 35, N 2. P. 139–144.
34. Sano T., Smith C. L., Cantor C. R. // Science. 1992. Vol. 258, N 1. P. 20–122.

35. Sabitsky A. P., Chudinov A. V., Krilova S. M. // Advances in Fluorescence Sensing Technology / Ed. J. R. Lakowicz. 1995. SPIE 2388. P. 429–434.
36. Selvin P. R., Hearst L. R. // Proc. nat. Acad. Sci. USA. 1994. Vol. 91. P. 10024.
37. Selvin P. R., Rana T. M., Hearst J. E. // J. Amer. chem. Soc. 1994. Vol. 116. P. 6029.
38. Seveus L., Vaisala M., Syrjanen S. et al. // J. Cytometry. 1992. Vol. 13. P. 329.
39. Seveus L., Vaisala M., Kojola H. et al. // J. Microsc. Res. Techn. 1994. Vol. 28. P. 149.
40. Spiro M., Gaud O., Sol V. et al. // European Biophysocal Congress, 2-d: Abstracts. 1997.
41. Wirth M. J., Koskelo A., Sanders M. J. // J. appl. Spectrosc. 1981. Vol. 35. P. 14–21.

## ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 629.7.005

В. А. Ермаков, А. Н. Михоленок, СКБ "Топаз"

### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Приведены характеристики российских мини- и микросамолетов.*

Реализация концепции сохранения жизни и боеспособности личного состава, участвующего в боевых и опасных для жизни действиях, привела к возникновению идеи и поиску путей практического создания роботизированных миниатюрных и сверхминиатюрных аппаратов различного назначения. В различных иностранных источниках указывается, что вопросу создания летательных микроаппаратов уделяется большое внимание. О серьезности отношения к этой проблеме свидетельствует тот факт, что многие военно-исследовательские центры НАТО, Пентагон и ряд фирм США, исследовательские центры Германии, Японии и других стран выделяют значительные средства на проекты по созданию микроминиатюрных самолетов и вертолетов.

**Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.** (США) на базе технологий МЭМС (микроэлектромеханических систем) разрабатывает микрогазотурбинный двигатель в качестве силовой установки для микровоздушного аппарата.

**D-STAR Engineering, Shelton, Conn.** (США) занимается разработкой и созданием безопасных, малозаметных двигателей и силовых установок для перспективных микровоздушных аппаратов.

**California Institute of Technology, Pasadena, Calif.** (США) проектирует и создает электрические микроисточники питания для микровоздушных аппаратов.

По сведениям из различных доступных источников, разработаны и практически созданы не только

основные фрагменты конструкции летающей платформы, включая приводы, исполнительные устройства и системы управления ими, но и летающие микровоздушные аппараты нескольких типов. Все реально созданные аппараты, узлы, силовые установки и пр. разработаны и изготовлены на основе использования достижений современных технологий в области миниатюризации силовых элементов и устройств электромеханики, гидромеханики, электроники, материаловедения, источников питания и т. д.

В настоящее время исследуются научно-технические проблемы разработки и создается макетный образец микровоздушного аппарата для решения задачи мониторинга окружающей среды и пространства. Такие аппараты предназначены для передачи видеoinформации на расстояние до 10 км и характеризуются весьма малыми размерами. В настоящее время созданы аппараты массой до 100 г и размахом 200 мм, совершающие полет длительностью более 20 мин. со скоростью 70 км/ч.

Одной из причин роста интереса к микроДПЛА является то, что для их обслуживания и запуска не требуется специальных средств транспортировки и запуска и они могут обслуживаться одним человеком. Эти аппараты могут оказаться намного более дешевыми в производстве, чем уже используемые ДПЛА.

*Новизна исследований, проведение которых необходимо для достижения намеченной цели, определяется тем, что при решении проблемы создания микровоздушного аппарата будут использованы последние достижения в области аэродинамики малых чисел Рейнольдса, микроминиатюризации электро(гидро-, пневмо-) механических устройств и элементов, силовых установок, методов микропроцессорного управления.*

Проблема создания микроминиатюрных летательных аппаратов (по американской терминологии — "воздушных микроаппаратов") требует решения ряда научных и технических задач. Так, например, "новый класс" летательных аппаратов не позволяет автоматически переносить на него законы классической аэродинамики. Микроаппаратам труднее

справляться с ветром, дождем и другими природными явлениями, чем обычным самолетам.

Тем не менее, по оценкам американских экспертов, сделанным еще в 1996 г., испытания на практическое применение первые летательные микроаппараты пройдут самое позднее через пять лет.

Фрагменты необходимых составляющих технологий, совокупность которых даст возможность создать пригодный для реального применения микроаппарат, в настоящее время практически разработаны и реализованы:

- в Массачусетском технологическом институте разработано и создано устройство, состоящее из микротелевизионной камеры, размещенной на микрочипе;
- в Аляскинском университете разработаны и созданы "интеллектуальные" отклоняемые аэродинамические поверхности для крыльев, позволяющие изменять их конфигурацию в зависимости от прикладываемого электрического напряжения. В результате можно отказаться от таких механически сложных узлов, как рули поворота и высоты;
- работы по созданию микросамолетов ведутся также в Германии. Ученые Института микротехники в Майнце сконструировали и создали микровертолет из алюминия. Он весит столько же, сколько стрекоза, и может размещаться в скорлупе земляного ореха. Два электромотора (размером со спичечную головку каждый) крутят два ротора. При 40 тыс. оборотах в минуту "вертолет" отрывается от земли.

Аналогичные исследования проводятся и в нашей стране. При этом наибольший интерес в рассматриваемом случае представляют комплексы с малоразмерными летательными аппаратами (МЛА), которые обладают следующими основными отличительными свойствами:

- высокой выживаемостью МЛА, определяемой низкой заметностью (акустической, оптической, тепловой и радиолокационной) и малой уязвимой площадью;
- высокой мобильностью и выживаемостью комплекса в целом вследствие небольшого количества и малых габаритных размеров его наземных элементов;
- экономической эффективностью вследствие относительно невысокой стоимости комплексов вообще и стоимости МЛА в частности;
- пониженной стоимостью и повышенной технологичностью производства и эксплуатации вследствие высокой степени аппаратной и программной унификации с другими беспилотными комплексами;
- возможностью работы в единой системе с пилотируемыми комплексами и пунктами управления вследствие технической, информационной, программной и лингвистической совместности с ними.

Проводимые исследования показывают, что существующая в настоящее время отечественная тех-

Краткая сравнительная таблица БЛА в диапазоне масс до 20,0 кг

Характеристика	БЛА-20	БЛА-10	БЛА-4	БЛА-2
Масса БЛА, кг	20,0	10,0	4,0	2,0
Энергоноситель	Бензин	Бензин	Метанол	Аккумуляторы
Размеры БЛА, м	3,2×2,3	2,2×1,5	1,5×1,1	2,0×1,0
Старт БЛА	Катапультный	Катапультный	Катапультный	С руки
Посадка БЛА	По-самолетному	По-самолетному	По-самолетному	По-самолетному
Диапазон высот применения, м	0...5000	0...2500	0...2500	0...5000
Продолжительность полета, ч	3,0.. 4,0	2,1..2,8	0,9..1,2	0,7 (40 мин)
Воздушная скорость, км/ч	120..140	120..140	90	60..80
Кратность применения	Более 100 раз	Более 100 раз	Более 100 раз	До 1000 раз
Количество ТВ камер	3	3	2	1...2
Транспортбельность комплекса	Возимый (на двух автошасси УАЗ или на одном автошасси КАМАЗ)	Переносной	Переносной	Переносной
Дальность действия комплекса, км	70,0	20,0	10,0	10,0

нологическая база делает возможной разработку роботизированных комплексов на базе мини- и микроБЛА с дистанционным (а в последующем и автономным) управлением. Разработка комплексов первого направления потребует всесторонней проработки вопросов обеспечения надежной связи БЛА с оператором и создания навигационной системы, работающей в автоматическом режиме. Успешное решение этих задач может быть достигнуто на основе внедрения широкополосной спутниковой связи и использования единой радиотехнической системы навигации.

Создание систем автономного управления более перспективно, но требует проведения дополнительного комплекса исследований по созданию и внедрению средств искусственного интеллекта.

В качестве полезной нагрузки на мини- и микроБЛА предполагается использовать миниатюрные ТВ камеры, неохлаждаемые тепловизионные камеры, биохимические, радиационные и акустические датчики, ретрансляторы связи. Эти аппараты должны быть недорогими и обеспечивать решение функциональных задач в близком к реальному масштабе времени.

Актуальной проблемой реализации концепции развития мини- и микроБЛА является создание технологий, позволяющих достичь сверхплотной компоновки силовой установки с приводами, источниками питания, телекамерами и другими миниатюрными системами. При этом требуется достижение уровня интеграции бортовой аппаратуры намного выше достигнутого в настоящее время.

Характеристики различных типов БЛА приведены в таблице.

Внешний вид показан на рисунках на четвертой стороне обложки.

*В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—12, 2001 г., № 1, 2, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.*

<http://intra.rfbr.ru>

## АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

### Получение и исследование электронных, экситонных и фононных состояний квантовых точек на основе широкозонных соединений II-VI

Номер проекта: 97-02-18138-а

Год предоставления отчета: 1997

Методами молекулярно-пучковой и атомно-слоевой эпитаксии выращен набор образцов с одиночными слоями CdSe разной степени заполнения (от 0,15 до 1) толщиной до двух монослоев в матрицах ZnSe, Zn(S, Se) и (Zn, Mg)(S, Se), а также сверхрешетки на их основе.

Обнаружена сильная зависимость коэффициента встраивания атомов Cd от соотношения потоков Se/Cd. Получены первые результаты по прямой характеристизации структурных свойств некоторых образцов методами рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения.

Обнаружено, что при субмонослойном покрытии распределение атомов Cd крайне неравномерно, причем характер этого распределения зависит не только от степени заполнения, но и от технологических параметров роста, таких как температура осаждения, время экспозиции и т. п.

Начато изучение оптических спектров отражения, люминесценции и возбуждения люминесценции полученных структур с целью дополнительной оперативной характеризации их качества, а также изучения особенностей энергетической структуры экситонных состояний и кинетики релаксации энергии экситонов в этих структурах. С увеличением интенсивности оптического возбуждения наблюдалось возникновение стимулированного излучения при температурах образца от гелиевых до нормальных. Показано, что некоторые свойства лазерной генерации в исследованных структурах с субмонослойными сверхрешетками CdSe в матрице ZnMgSSe характерны для систем с квантовыми точками. В то же время обнаружено, что положение основного экситонного максимума в спектре излучения немонотонно зависит от степени запол-

нения монослоя атомами Cd. Такая немонотонность может быть следствием различного распределения атомов Cd в монослое по узлам решетки при разной степени заполнения монослоя и/или в зависимости от технологических параметров роста. Предполагается продолжить систематическое исследование такой взаимосвязи.

### Фазовые переходы в кристаллах с несколькими конкурирующими критическими степенями свободы и в условиях внешних воздействий: механизмы переходов, динамика решетки, реальная структура

Номер проекта: 97-02-17878-а

Год предоставления отчета: 1997

Экспериментально обнаружено, что наличие аммониевых ионов индуцирует беспорядок в сульфатной подрешетке смешанного кристалла  $(\text{Rb}_x(\text{NH}_4)_{1-x})_2\text{SO}_4$ , проявляющийся интенсивным центральным пиком в полносимметричных спектрах КР при нормальной температуре. Спектры КР позволяют зафиксировать самое начало процесса образования полярных кластеров в PbAS-70 ниже 220 К.

Показано, что вся совокупность стабильных кристаллических форм  $\text{SiO}_2$ , проявляющихся на его  $p$ - $T$  диаграмме, может быть получена из единой исходной ОЦК структуры. Это позволило описать механизмы реконструктивных переходов между кварцем и коэситом, а также коэситом и стишовитом. Оказалось возможным, кроме того, предсказать форму и симметрию межфазных границ. Модель позволяет установить механизм образования под давлением аморфной структуры.

Экспериментально измеренные критические индексы  $b$  при переходе между одноосной и двуосной нематическими фазами подтверждают неуниверсальность критического поведения мицеллярных жидких кристаллов. Данные интерпретируются в рамках феноменологической модели с двумя взаимодействующими ПП: (i) понижающий симметрию ПП, описывающий изменение формы сицелл; (ii) не нарушающий симметрию скалярный

ПП, отражающий изменение объема мицелл и определяющий, как было показано, специфическую форму области существования двуслойной фазы на фазовой диаграмме.

Для переходов сегрегационного типа развита феноменологическая теория, описывающая симметричные и термодинамические особенности переходов из изотропного состояния в упорядоченные, неупорядоченные фазы и в фазы с ближним порядком. Для получения в теории полностью сегрегированного состояния ( $n = 1$ ) установлена функциональная связь феноменологического ПП с микроскопическими параметрами, которые описывают отклонение заселенности сегрегированных областей атомами, молекулами или ионами от равновесного значения в изотропной фазе.

### **Исследование процессов формирования полупроводниковых наноконструктивных пленок и воздействия лазерного излучения на их свойства**

Номер проекта: 97-02-17861-а  
Год предоставления отчета: 1997

Обнаружен эффект быстрого перехода состоящей из нанозерен кремния пленки в поликристаллическую фазу под действием импульсного излучения  $\text{CO}_2$ -лазера средней интенсивности. По нашим оценкам, поглощенной в пленке энергии излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, даже без учета теплоотвода, явно недостаточно для достижения температуры плавления. В статье, где описан этот эффект, предлагаются различные подходы для объяснения его природы.

Обнаружено, что выход фотолюминесценции от пленки пористого кремния, полученной методом лазерохимического осаждения из пара, когда берутся в качестве исходного реагента только тетрафторид кремния и непрерывный  $\text{CO}_2$ -лазер мощностью несколько ватт, заметно выше, чем от пористого кремния, полученного методом травления. Результаты наблюдений будут опубликованы в соответствующей статье, уже принятой к печати.

Теоретическое исследование, касающееся кластеров кремния с малыми добавками различных каталитических элементов, позволило сделать вывод о том, что это один из наиболее перспективных материалов для получения водорода и кислорода из воды за счет использования солнечной энергии. По результатам этих исследований опубликован препринт.

Были продолжены теоретические исследования межмолекулярного взаимодействия в присутствии резонансного и квазирезонансного электромагнитного излучения. Выяснено, что в случае возбуждения одной из молекул кластера, состоящего из двух молекул различного изотопического состава, изменение потенциала взаимодействия между ни-

ми происходит за время, соизмеримое с периодом электромагнитного поля. Результаты исследований готовятся к печати.

Были проведены исследования на совместимость с биологическими тканями пористого кремния, полученного методами травления, и кластерных пленок, полученных методом лазерохимического осаждения из пара. Оба типа кремниевых наноструктур в предварительных исследованиях проявили хорошую совместимость с биологическими объектами. Считаем необходимым продолжить эти исследования.

### **Теоретическое и экспериментальное исследование самоорганизации многослойных квазиупорядоченных систем нанобъектов при молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур германий—кремний**

Номер проекта: 97-02-18408-а  
Год предоставления отчета: 1997

За первый год исследований в соответствии с планом работ была переоборудована автоматизированная установка типа "Катунь" для синтеза многослойных наноструктур методом МЛЭ. Она была снабжена устройством для регистрации и обработки временных изменений изображения картин дифракции быстрых электронов в процессе МЛЭ.

Проведена серия ростовых экспериментов с детальной регистрацией динамики изменений дифракционных картин при росте гетероэпитаксиальной пленки по механизму Странского—Крастанова. Анализ этих изменений позволил раскрыть их взаимосвязь с морфологическими и структурными перестройками на поверхности при заполнении атомных слоев псевдоморфных пленок при образовании упругонапряженных и пластически деформированных островов и кластеров. Проведено моделирование этих процессов методом Монте-Карло на основе математической модели поверхности кристалла кремния, покрытой прямолинейными ступенями.

Установлено влияние кинетики структурных и морфологических изменений поверхности пленок при самоформировании наноструктур на форму и период ДБЭ-осцилляций.

Получены структуры с квантовыми точками германия в слое кремния, на которых впервые в мире зарегистрированы эффекты резонансного туннелирования и кулоновской блокады носителей заряда при нормальной температуре. Результаты оформлены в виде статей и направлены в печать (журналы ЖЭТФ, Physics of Low-Dimensional Structures, Thin Solid Films, Journal Crystal Growth), а также доложены на международных совещаниях в форме устных и стендовых докладов.

## Размерные эффекты в системах малых магнитных частиц

Номер проекта: 97-02-16103-а  
 Год предоставления отчета: 1997

Исследованы условия формирования наноразмерных (100–200 нм) периодических решеток ферромагнитных элементов (нитей, точек) при облучении интерферирующими лазерными пучками тонкопленочных (10–20 нм) смесей Fe-Cr и Fe(Co)-C. Смесей изготавливались поочередным напылением малых порций Fe(Co) и Cr(C) на кремниевые подложки, а затем облучались интерферирующими пучками эксимерного лазера XeCl с плотностью энергии до 100 мДж/см<sup>2</sup>. Длительность облучения варьировалась от 50 до 10 нс.

Методом электронной микроскопии было установлено, что короткоимпульсное лазерное воздействие, как и стандартный термический отжиг, приводит к росту Fe(Co)-обогащенных кластеров в исследуемых образцах. Этими изменениями в микроструктуре качественно объяснялся переход из пара в ферромагнитное состояние, наблюдаемое после воздействия при нормальной температуре. В образцах, облученных двумя когерентными пучками, возникали полосы ферромагнитной упорядоченности, на что указывали как появление магнитной анизотропии в плоскости образца, так и прямые наблюдения решеток на магнитном силовом микроскопе. Ширина магнитных полос существенно зависела от энергии и длительности лазерного излучения. При облучении длительностью 5 нс формировались решетки с шириной полос вплоть до 200 нм, тогда как при большей длительности (50 нс) ширина магнитных полос составляла не менее 500 нм. В образцах смесей Fe/Cr был обнаружен эффект увеличения коэрцитивной силы (до 700 Э) при уменьшении периода решеток до 300 нм. Наблюдаемые значения коэрцитивной силы в сочетании с малой толщиной магнитного слоя и достаточно высокими значениями остаточной намагниченности (0,1 Тл) позволяет рассматривать исследуемые образцы как новый материал для магнитного хранения и записи информации со сверхвысокой плотностью (1 Гбит/см<sup>2</sup>).

## Экспериментальное и теоретическое исследование явления колоссального магнитосопротивления в замещенных оксидах системы La-Mn

Номер проекта: 97-02-17325-а  
 Год предоставления отчета: 1997

Проведено комплексное исследование электрофизических, магнитных, магнитоупругих, акустических и субмиллиметровых свойств монокристаллов

магнитных перовскитов системы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $0 < x < 0,25$ ), выращенных методом зонной плавки. С помощью магнитострикционных измерений в сильных импульсных магнитных полях (до 250 кЭ) обнаружены индуцированные спинпереориентационные ( $x = 0; 0,05$ ) и структурные ( $x = 0,1; 0,175$ ) фазовые переходы. В частности, в  $\text{LaMnO}_3$  при  $H \parallel b$ -оси определено поле спиновой переориентации слабоферромагнитного момента от  $c$ - к  $b$ -оси кристалла  $H_{\text{ср}} \approx 200$  кЭ. Впервые измерены субмиллиметровые спектры проводимости и диэлектрической проницаемости системы  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  на частотах 3–33 см<sup>-1</sup>. В  $\text{La}_{0,825}\text{Sr}_{0,175}\text{MnO}_3$  обнаружено сильное возрастание динамической проводимости при ферромагнитном фазовом переходе, сопровождающемся переходом металл — полупроводник. В  $\text{La}_{0,9}\text{Sr}_{0,1}\text{MnO}_3$  обнаружен скачок диэлектрической проницаемости при  $T = 100 \div 120$  К, свидетельствующий о существовании нового фазового перехода (помимо ферромагнитного перехода при 170 К), который, по-видимому, связан с поляронным упорядочением. В  $\text{LaMnO}_3$  и  $\text{La}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}\text{MnO}_3$  обнаружены моды антиферромагнитного резонанса, изучено их температурное поведение и определены параметры магнитных взаимодействий (константы анизотропии, обменные поля). Впервые проведены эксперименты по возбуждению звука в  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0,1; 0,2; 0,25$ ) в диапазоне температур  $T = 80 \div 400$  К и магнитных полях до 10 кЭ. Получены предварительные результаты, указывающие на заметное изменение модулей упругости при подходе к точкам магнитных и структурных фазовых переходов.

## Исследование процесса роста квантоворазмерных сверхрешеток кремний/оксид кремния методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Номер проекта: 97-02-18409-а  
 Год предоставления отчета: 1997

Для получения сверхрешеток кремний/оксид кремния была разработана и изготовлена система напуска кислорода в камеру роста установки МЛЭ. Исследование начальной стадии роста эпитаксиальной пленки методом регистрации изменения интенсивности дифракционных рефлексов показало, что период осцилляций интенсивности зависит от условий роста. Уменьшение периода осцилляций с увеличением температуры роста обусловлено отставанием края ступени от первоначального значения на длину миграции адатома за время формирования сплошного атомного слоя.

Поскольку необходимо получение чистых эпитаксиальных слоев, особое внимание в работе было уделено исследованию типа и уровня фоновых

примесей при молекулярно-лучевой эпитаксии кремния (МЛЭ-Si). В результате были выявлены основные источники фонового легирования, определены закономерности изменения уровней примеси и предложены способы получения эпитаксиальных пленок кремния с малой концентрацией примеси. Для захоронения кислорода в объеме кремния использовалась методика получения дельта-легированных слоев, наличие примеси подтверждается данными послойного анализа. Излучательная рекомбинация неравновесных носителей заряда в нанокристаллах кремния исследовалась с помощью фотолюминесценции на модельных образцах, сформированных термическим отжигом слоев оксида кремния с имплантированными атомами кремния. Полученные результаты свидетельствуют в пользу того, что излучательная рекомбинация в нанокристаллах кремния идет через уровни дефектов.

### Прямое экспериментальное изучение доменных структур и нелинейной динамики спинов в ферро- и антиферромагнитных многослойных пленках

Номер проекта: 97-02-16879-а  
Год предоставления отчета: 1997

С помощью новой магнито-оптической методики, основанной на использовании индикаторной феррогранатовой пленки с плоскостной анизотропией, исследованы микроскопические механизмы перемагничивания многослойных пленок CoNiCu/Cu, би-слоев NiO/NiFe с обменной связью и несимметричных спин-клапанных структур Si/NiO/Co/Cu/Co/Ta. Показано, что при перемагничивании многослойной пленки состояние доменных границ и характер их движения существенно зависят от типа обменной связи между слоями. Выявлены спин-флоповская и несимметричные угловые фазы, возникающие в зависимости от направления перемагничивания антиферромагнитной сверхрешетки CoNiCu/Cu. Обнаружена асимметрия активности центров зарождения доменов при перемагничивании би-слоя NiO/NiFe вдоль направления однонаправленной анизотропии. Перемагничивание такой би-слоя, как установлено, определяется влиянием на этот процесс дефектной структуры антиферромагнитного слоя. Установлено, что перемагничивание несимметричной спин-клапанной структуры Si/NiO/Co/Cu/Co/Ta происходит за счет рождения и развития мелкомасштабных доменов большой плотности, размер которых растет с увеличением толщины кобальтовых слоев. Обнаружена диссипативная доменная структура, возникающая

в пленках Co под действием переменного магнитного поля. Предложена теория, объясняющая резкое изменение коэрцитивной силы би-слоя Fe/Cr, экспериментально обнаруженное вблизи температуры фазового перехода в Cr.

Обнаружен эффект резкого увеличения амплитуды собственных изгибных колебаний  $180^\circ$ -й доменной стенки, содержащей блоховские линии, в тонкой монокристаллической пластине иттриевого феррограната, происходящего при возбуждении дрейфа блоховских линий. Показано, что этот эффект наиболее вероятно связан с явлением магнитного последствия. Обнаружены и исследованы новые ветви спектра спин-волновых возбуждений блоховской доменной стенки в ферромагнитной пленке со сложным типом магнитной анизотропии.

### Исследование механизмов возникновения отрицательной дифференциальной проводимости в полупроводниковых сверхрешетках с узкими запрещенными зонами

Номер проекта: 97-02-16926-а  
Год предоставления отчета: 1997

В ходе выполнения проекта получены следующие основные результаты.

Предложен новый механизм возникновения отрицательной проводимости для электронов, дрейфующих в скрещенных электрическом и магнитном полях поперек периодического потенциала. Отмечено, что этот механизм аналогичен механизму при аномальной эффекте Доплера. Расчеты проводимости системы электронов, выполненные в квазиклассическом приближении в указанных условиях в n-GaAs показали, что для получения реальной отрицательной проводимости необходимо выйти за рамки квазиклассического рассмотрения.

Проведен анализ отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) на частотах вблизи частоты блоховских колебаний для случая сверхрешеток (СР):

- где транспортные процессы определяются процессами в пределах одной минизоны;
- где эти процессы определяются межминизонным туннелированием.

Оказалось, что частотная зависимость проводимости в обоих случаях разная (в первом случае ОДП существует на частотах ниже блоховской, во втором — выше). Однако в обоих случаях ОДП не стремится к бесконечности при уменьшении транспортных процессов, что связано с безынверсионностью системы электронов в СР и что затрудняет создание высокочастотного источника излучения на основе блоховских колебаний.

Создан пакет программ для расчета спектров минизон практически любых полупроводниковых систем, используемых для изготовления СР.

## **Структурообразование, пространственный хаос и волны в сетях мультистабильных автоколебательных систем**

Номер проекта: 97-02-16550-а  
Год предоставления отчета: 1997

Проведено исследование пространственно-временной динамики одномерных и двумерных сетей, состоящих из активных элементов. Рассмотрены сети как с локальными связями (так называемый "диффузионный" тип связи), так и полносвязные сети, в которых каждый из элементов связан со всеми другими элементами. В случае сетей с диффузионным типом связи изучено также взаимодействие между собой сетей с "волоконной" и "слоистой" геометрией. По типу элементов исследуемые сети можно разделить на два класса:

- сети, построенные из автоколебательных элементов с жестким режимом возбуждения, динамика которых определяется движениями на фазовой плоскости;
- сети элементов ("осцилляторов") Чуа, динамика которых в трехмерном фазовом пространстве в зависимости от управляющих параметров может быть как регулярной, так и хаотической.

## **Магнитотранспортные свойства двумерного электронного газа в непланарных GaAs/AlGaAs гетеропереходах**

Номер проекта: 97-02-18402-а  
Год предоставления отчета: 1997

На гофрированной поверхности GaAs, созданной с помощью электронно-лучевой литографии и жидкостного травления, выращены МЛЭ непланарные GaAs/AlGaAs гетеропереходы с рекордной для подобных структур подвижностью  $500000 \text{ см} \cdot \text{см}/(\text{В} \cdot \text{с})$  при  $T = 4,2 \text{ К}$ . Такую высокую подвижность двумерного электронного газа в непланарных гетеропереходах удалось получить в результате длительного отжига предостовой гофрированной поверхности GaAs в высоком вакууме и выращивания толстого буферного слоя.

В выращенных непланарных YAs/AlYAs гетеропереходах в слабых магнитных полях обнаружены соизмеримые осцилляции магнетосопротивления, обусловленные периодической пространственной модуляцией магнитного и электрического полей.

Обнаружено подавление осцилляций Шубникова-де Гааза при вращении структуры во внешнем магнитном поле и увеличении компоненты поля в параллельной подложке. Затухание осцилляций объясняется дополнительным рассеянием во внешнем неоднородном магнитном поле.

Приведены оценки времени релаксации носителей заряда в статическом флуктуирующем магнитном поле, совпадающие с экспериментальными результатами.

## **Теоретическое исследование фундаментальных процессов нелинейного взаимодействия когерентного света с простыми квантовыми системами**

Номер проекта: 97-02-16973-а  
Год предоставления отчета: 1997

В режиме оптического туннелирования получено распределение фотоэлектронов по скоростям в момент ионизации лазерным полем с произвольной эллиптической поляризацией. Дано квантомеханическое обоснование полуклассической двухступенчатой модели фотоионизации. В аналитической форме получена координатная волновая функция, представляющая собой суперпозицию парциальных волновых пакетов, образующихся на последовательных оптических периодах. Показано, что поперечная и продольная структуры парциальных пакетов формируются на различных временных масштабах. Разработана итерационная процедура вычисления амплитуды фотоионизации, позволяющая учесть влияние поля ядра на движение фотоэлектрона в континууме. Первый член ряда совпадает с амплитудой ионизации в модели Келдыша, а второй отвечает однократному перерассеянию фотоэлектрона родительским ионом. Установлены скэйлинговые свойства процесса лазерного охлаждения ниже энергии отдачи и их связь с распределением Леви. Предложен простой интерферометрический метод измерения пространственной волновой функции атома. Разработан метод исследования процессов взаимодействия высокоэнергетичных частиц (электронов и фотонов) с бихроматическим лазерным полем высокой интенсивности. С его помощью получены спектральные распределения вероятности рождения электрон-позитронной пары фотонов. Показано, что вероятность в таком поле существенно зависит от распределения интенсивности между компонентами поля и при любом распределении превышает соответствующую вероятность в монохроматическом поле той же интенсивности.



# ИНФОРМАЦИЯ

## ВОСЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

### АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

(14—19 сентября 2002 г.,  
пос. Дивноморское,  
Краснодарский край, Россия)

Министерство образования РФ, Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь, Международная академия информатизации, Российская академия наук, Академия инженерных наук РФ, Таганрогский государственный радиотехнический университет (ТРТУ), Московский государственный институт электронной техники (технический университет), Московский инженерно-физический институт (технический университет), Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), НИКТП "Белмикросистемы" (г. Минск, Беларусь), НИПИ "Океангеофизика" (г. Геленджик, Россия), Северо-Кавказское отделение АИН РФ, Геленджикский филиал ТРТУ, ЛМО (Германия) проводят Международную научно-техническую конференцию

#### "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники" ПЭМ-2002

Конференция проводится в лечебно-оздоровительном комплексе "Голубая даль", являющемся лучшим пансионатом известного приморского климатического курорта Геленджик Краснодарского края.

#### Тематика секций конференции:

- Фундаментальные исследования.
- Нанoeлектроника.
- Технология микроэлектроники.
- Материалы электронной техники.

- Микросхемотехника.
- Проектирование приборов и микросхем.
- Твердотельная электроника СВЧ.
- Микросистемная техника.
- Планирование, менеджмент и экономика в электронике

#### Адрес оргкомитета:

347928, Россия, Ростовская обл., г. Таганрог,  
ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44, ТРТУ,  
деканат ФЭП.

Телефон для справок (86344) 37-17-67,  
факс (8634) 36-15-00.

E-mail: pem@fep.tsure.ru

<http://www.fep.tsure.ru> в разделе "КОНФЕРЕНЦИИ"  
или

<http://www.fep.tsure.ru/win/conferenc/index.html>

# AMPER 2002

10 международная ярмарка электротехники и электроники

9 – 12 апреля 2002  
Прага, Чешская республика

700 экспонентов из 12 стран мира



#### Организатор:

TERINVEST s.r.o., Legerova 15, 120 00 Praha 2, ČR, [www.terinvest.com](http://www.terinvest.com), [www.amper.cz](http://www.amper.cz)  
tel: + 420 2 21992133, 34, fax: + 420 2 21992139, e-mail: [amper@terinvest.com](mailto:amper@terinvest.com)

(0732) 51-20-12, 77-48-36