

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 621.3.049.77

С. П. Тимошенко, канд. техн. наук,
МИЭТ (технический университет)

ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, РЕАЛИЗУЕМЫХ НА СОСТАВНЫХ СТРУКТУРАХ

Проведен анализ возможностей использования составных структур типа кремний на изоляторе для изготовления элементов микроэлектромеханических систем.

Структуры "кремний на изоляторе" (КНИ), изготовленные различными способами, широко применяются для производства специализированных интегральных схем. В то же время существует заблуждение, состоящее в том, что структуры КНИ целесообразно использовать только для производства спецстойких интегральных схем (ИС).

На самом деле перевод производства традиционных микросхем массового применения с подложек объемного кремния на современные структуры КНИ может сделать его значительно рентабельней. Дело в том, что при производстве ИС массового применения на основе структур с полной диэлектрической изоляцией упрощается конструкция активных элементов ИС, поскольку упраздняются глубокие карманы и разделительные $p-n$ -переходы. В результате уменьшается площадь чипов и соответственно увеличивается полезная площадь на пластине (до 30 %), упрощается технология (уменьшается число операций) при производстве. В итоге возможно увеличение прибыльности производства. Однако следует учитывать существенное преимущество при использовании структур КНИ и подобных технологий в создании радиационно- и термостойких интегральных схем, а также схем, работающих при пониженных напряжениях питания, быстродействующих схем, комбинированных и т. д. [1–4].

Разрабатываемые структуры КНИ могут служить также исходным материалом при производстве интеллектуальных ИС с выходными силовыми каскадами (разумные ИС), выдерживающими напряжения до 1500 В. Кроме того структуры КНИ являются хорошим исходным материалом для разработки квантовых ИС (ИС, в которых активными элементами являются квантовые "точки" и квантовые "проволочки").

Технология составных структур КНИ является основой для разработки технологии трехмерных ИС повышенной плотности компоновки.

Перечисленные достоинства ИС с полной диэлектрической изоляцией, исходной основой которых являются составные структуры КНИ, должны привести не только к росту потребления структур, выпускаемых западными фирмами (Seiko Epson, Oki Electric, Samsung Electronics, Cannon, SOITEC, Intel, Japans New Energy, NEDO и др.), но и к развитию технологических процессов производства структур на отечественных предприятиях. Развитие этих технологий определяет темп развития разработок ИС военного назначения и их качество, имеет хорошие экономические (коммерческие) перспективы и имеет прямое отношение к развитию нового направления интегрального производства элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС).

В мировой практике известны около пятнадцати способов изготовления структур КНИ, являющихся исходным материалом для производства ИС с полной диэлектрической изоляцией и элементов микроэлектромеханических систем. В последние годы все большее предпочтение отдается группе технологий, реализованных на принципе соединения (сращивания) кремниевых пластин в так называемых составных структурах КНИ [1–4].

Повышенный интерес к составным структурам КНИ и их технологии объясняется следующими их существенными достоинствами при изготовлении ИС и элементов микроэлектромеханических систем:

- низкий уровень дефектности приборного слоя, сравнимый с дефектностью монокристаллического кремния наивысшего качества (плотность дислокаций и дефектов упаковки не превышает 10^2 см^{-2});
- возможность изготовления приборного слоя практически любой толщины с погрешностью не более 10 %;
- практически любые заданные уровни и тип легирования и распределение легирующих примесей;
- практически любая толщина изолирующего диэлектрического слоя;
- широкий спектр комбинаций прослоек диэлектриков, металлов и полупроводников в изолирующем слое;
- возможность комбинирования кремния со множеством других материалов (Al_3B_5 , A_2B_6 , SiC, стеклом, керамикой, металлами);
- возможность изготовления структуры практически любого диаметра (76, 100, 150, 200 и 300 мм);

- возможность построения способов изготовления структур на основе традиционных операций и процессов кремниевой технологии;
- практическое отсутствие коробления в процессе изготовления структур;
- возможность изготовления многоэтажных структур КНИ и трехмерных ИС и микроэлектромеханических систем;
- возможность изготовления ИС и МЭМС на основе имеющихся технологических процессов микроэлектроники.

Анализ конструкций и технологий изготовления структур КНИ и подобных многослойных составных структур показывает, что они не только органично могут быть использованы для производства механических элементов МЭМС, но и существенно упрощают технологический процесс производства и обеспечивают надежную межкомпонентную диэлектрическую изоляцию.

Элементы МЭМС, изготовленные на основе полупроводниковых технологий (и на основе структур КНИ), по своему функциональному назначению являются аналогами существующих механических систем (датчики давления, акселерометры, датчики угловой скорости и т. п.), однако имеют значительно меньшие габаритные размеры и массу, а в ряде случаев превосходят их по своим техническим характеристикам. Благодаря высокой степени интеграции на пластине, прецизионности технологических операций и групповым методам обработки стоимость таких элементов существенно ниже.

МЭМС в интегральном исполнении являются новым направлением в микроэлектронике, которое в последнее время получило значительное развитие. В целом, технология изготовления МЭМС основана на операциях, составляющих технологию полупроводниковых, в основном кремниевых, приборов и ИС. Однако она все же имеет множество существенных особенностей, которые при разработке конкретных микромеханических структур и систем приходится учитывать при использовании типовых технологических процессов. Как правило, эти проблемы могут быть преодолены путем разработки нестандартных технических решений.

К таким нестандартным (или нетрадиционным) для микроэлектронных технологических процессов применениям относятся операции соединения (сращивания) кремниевых пластин (возможно, и других подложек) или отдельных элементов МЭМС.

В МИЭТ разрабатываются и используются следующие способы соединения:

- непосредственная термокомпрессионная сварка кремниевых пластин;
- твердоадгезионное сращивание;
- сращивание с использованием химической сборки методом молекулярного наслаивания;
- сращивание с помощью стекловидных материалов (SiO_2 , стекла, ситаллов, композиционных стекловидных материалов);

- термоэлектростимулированное сращивание;
- сращивание с использованием промежуточных неорганических слоев (металлов, силицидов, эвтектических сплавов), пайка припоями, контактно-реактивная пайка, пайка эвтектическими сплавами;
- сращивание с использованием промежуточных слоев материалов на основе тугоплавких покрытий низкотемпературными методами (на основе элементоорганических полимерных пленок и покрытий с помощью неорганических полимеров);
- приклеивание с использованием низкотемпературных клеевых составов (эпоксидных клеевых композиций, полиимидных клеев, каучуковых клеевых компаундов).

Широкие возможности различных методов сращивания кремниевых (а также других материалов, например стеклянных) подложек или отдельных фрагментов (элементов) позволяют реализовывать различные технологические маршруты при изготовлении элементов МЭМС.

Перспективы развития технологий производства МЭМС и отдельных элементов, входящих в эти системы, будут в ближайшее время революционным образом воздействовать на все сферы жизнедеятельности человека и играть важнейшую роль в научно-техническом прогрессе, развитии различных отраслей промышленности и даже экономик многих государств. В военной области применение микросистемной техники уже сейчас приводит к изменению концепций стратегии и тактики применения оружия. Иными словами, развитие этого направления может значительно влиять на оборонную мощь государства и на развитие различных систем вооружений.

Одним из наиболее актуальных направлений микросистемной техники является развитие микромеханических датчиков, например, датчиков относительного и абсолютного давления, микромоторов, акселерометров и датчиков угловой скорости, используемых для различных подвижных объектов, в том числе малых и легких летающих тел (самолетов, ракет, снарядов, крупнокалиберных пуль и т. д.). Развитие систем навигации и ориентации в пространстве для малых и миниатюрных объектов немислимо без использования элементов микросистемной техники.

В то же время, несмотря на безусловно революционную роль МЭМС в военной сфере, нельзя не учитывать фантастических перспектив их использования во многих отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая техника, автомобильный, железнодорожный и водный транспорт, добычающий и энергетический комплекс (газ, нефть, уголь, ядерное топливо, нетрадиционная энергетика), перерабатывающая, химическая и пищевая промышленность, биотехнология и медицина.

Анализ динамики рынка традиционных изделий микросистемной техники свидетельствует об

очень бурном развитии производства и потреблении различных изделий и о том, что рынок далеко еще не заполнен. Не менее любопытным является то, что огромное число разрабатываемых элементов и устройств МЭМС собрано с применением технологий сращивания (аналогичных упомянутым выше) или изготовлено на составных структурах. Следует упомянуть, что такие устройства, как датчики давления, акселерометры, микромеханические вибрационные гироскопы, химические сенсоры, оптические переключатели, микронасосы, головки для струйной печати, достаточно традиционные для изготовителей МЭМС, в последнее время разрабатываются и изготавливаются на составных структурах типа КНИ [5].

Необходимо отметить, что элементы микросистемной техники формируют на основе комбинации многих составляющих, таких как монокристаллический, поликристаллический, пористый кремний, диоксид и нитрид кремния, полиимид, вольфрам, никель, медь, золото, алюминий, силициды, алмазоподобный углерод, нитрид алюминия, карбид кремния, различная керамика и т. п. Наибольшее значение имеют структуры, аналогичные гибридным или микромодульным конструкциям, в которых наряду с кремнием и другими полупроводниковыми и диэлектрическими материалами используются полимеры, керамика, металлы. В классической микроэлектромеханике, ориентированной на базовые кремниевые микротехнологии, в настоящее время наиболее перспективны многослойные составные структуры типа КНИ. Подобные структуры в настоящее время с успехом применяются также для разработок и производства микромеханических датчиков поворота, микрореакторов, различного вида микроинструментов — микропинцетов и микрозахватов, микродозаторов, микротурбин и т. п.

Преимущества использования составных структур для изготовления элементов микросистемной техники заключены в возможности диэлектрической развязки активных и пассивных элементов устройства, получения заданной толщины и необходимого зазора в конструкции. Микроэлектромеханические приборы можно формировать как на основе исходных кремниевых структур с последующим изготовлением элементов конструкции, так и с первоначальным изготовлением элементов конструкции, на основе чего затем формируется составная структура. В обоих случаях к материалам конструкции предъявляются жесткие требования по химической и термомеханической совместимости, тепловой и электрической стойкости, механической прочности, механической усталости. Составные структуры позволяют использовать диэлектрическую развязку между активными электрическими элементами конструкции и механические свойства кремния (и других материалов) для реализации уникальных возможностей элементов микромеханики.

На рис. 1 и 2 (см. четвертую сторону обложки) показан разрез исходных составных структур, которые могут быть использованы для изготовления, например, датчиков абсолютного и относительного давления. При этом гарантирована диэлектрическая изоляция между механическими (мембраной) и электрическими элементами (транзисторами, схемой управления), а также получение заданной толщины подвижной мембраны методами химического травления до стоп-слоя (в данном случае до слоя SiO_2).

В последнее время значительное внимание разработчиков МЭМС направлено на изучение возможности производить высокоточные микроакселерометры и датчики угловой скорости. Следует отметить безусловную важность этих изделий для широкой номенклатуры приборных реализаций как в военной, так и в гражданских областях. На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) приведена фотография многослойной составной структуры, полученной с использованием методов анизотропного химического травления и сращивания кремниевых пластин, предназначенной для изготовления микроакселерометра. Емкостная микромеханическая инерционная система предназначена для измерения малых ускорений в диапазоне $\pm 5g$.

Сочетание планарной технологии микроэлектроники возможности объемной обработки элементов на пластинах кремния и процессов сращивания позволяют реализовать интегральный вариант изготовления дешевых датчиков.

Анализ литературных источников и прогноз рынка микромеханических приборов показал, что одним из наиболее перспективных изделий, необходимых для огромного количества приложений как в военной, так и гражданской области, является микромеханический датчик угловой скорости.

Несмотря на колоссальный спрос на эти изделия немногие фирмы могут разрабатывать и производить подобные приборы. Точностные характеристики известных микромеханических датчиков угловой скорости достаточно низки. Поэтому следует работать над возможностью улучшения конструктивных механических характеристик, методов получения и обработки сигнала. Перспективным в данном случае могут быть датчики угловой скорости, изготовленные на составных структурах КНИ или использующие основные технологические процессы изготовления составных структур, такие как термоэлектростимулированное сращивание кремния и стекла. На рис. 4 (см. четвертую сторону обложки) приведена фотография чувствительного элемента датчика угловой скорости после операции сращивания кремния и стекла.

Инерциальные микросистемы, использующие датчики угловой скорости, находят применение во многих областях: навигации, прецизионных системах, компьютерах, медицине, автомобильной промышленности, робототехнике, сельском хозяйст-

ве, авиации, ракетной технике, железнодорожном транспорте, горном деле и т. д.

Актуальность изготовления микромеханических датчиков угловой скорости на составных структурах обусловлена возможностью достижения (согласно расчетам) высоких технических показателей, благодаря которым эти изделия найдут широкое применение в самых высокоточных навигационных системах. Поэтому конструкции и технологии изготовления датчиков активно исследуются в различных фирмах как за рубежом [в лаборатории им. Дрейпера (J. Draper), фирмы Samsung, Rockwell и Honeywell и т. д.], так и нашей стране.

Таким образом, составные структуры типа КНИ и технологии их получения позволяют решать актуальные задачи по улучшению параметров разрабатываемых и изготавливаемых интегральных микросхем и элементов микроэлектромеханических систем, а подобные технологии являются одними из наиболее актуальных технологических процес-

сов, определяющих перспективы развития производства МЭМС.

Список литературы

1. Анализ преимуществ, перспектив применений и технологичности производства структур КНИ: Препринт ИТЭФ 27-00 / А. Л. Суворов, Ю. А. Чаплыгин, С. П. Тимошенко, В. И. Графутин, С. А. Дьячков, А. Г. Залужный, В. В. Калугин, Е. П. Прокопьев, В. Ф. Реутов, Б. Ю. Шарков. М., 2000. 51 с.
2. Прокопьев Е. П., Тимошенко С. П. Возможность прямого соединения пластин кремния с использованием химической сборки поверхности методом молекулярного наслаивания // Материаловедение. 1999. № 4. С. 49–51.
3. Tong Q.-Y., Gösele U. Wafer Bonding and Layer Splitting for Microsystem // Adv. Mater. 1999. Vol. 11. N 17. P. 1409–1425.
4. Tong Q.-Y., Gösele U. Semiconductor Wafer Bonding: Science, Technology. Wiley, New York. 1988. 262 p.
5. Погалов А. И., Тимошенко В. П., Тимошенко С. П., Чаплыгин Ю. А. Разработка микрогроскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 36–40.
6. Петрова В. З., Погалов А. И., Тимошенко С. П. Оптимизация параметров многослойных структур микросенсоров // Известия вузов. Электроника. 1999. № 3. С. 41–44.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 681.7.062

А. Е. Панич, д-р техн. наук, проф., А. И. Сокалло, Е. А. Гришин, канд. техн. наук, Г. А. Житомирский, канд. техн. наук, НКТБ "Пьезоприбор", г. Ростов-на-Дону

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ГИБКИХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Описаны преимущества применения адаптивных оптических систем (АОС), способы их совершенствования и повышения эффективности использования. Рассмотрены новые исполнительные устройства АОС — деформируемые зеркала, приводимые в действие твердотельными электромеханическими преобразователями — пьезоэлектрическими или электрострикционными.

Для эффективного решения научных и прикладных задач, возникающих при наблюдении за космическими объектами (КО), необходимо обеспечить максимально высокую освещенность цели при лазерной локации и возможность получения детальных изображений КО с максимальным разрешением, а также реализовать максимально высокую чувствительность системы "телескоп—фотоприемник".

1. Эффективность применения адаптивных оптических систем

При реализации указанных выше условий имеется естественная внешняя помеха — турбулентность атмосферы, которая наряду с поглощением излучения искажает волновой фронт (ВФ) как принимаемого от КО излучения, так и излучаемого лазерными передатчиками при локации КО. Для компенсации атмосферных искажений ВФ оптических сигналов в реальном масштабе времени используют адаптивные оптические системы (АОС), которые обладают достаточно высокой эффективностью при работе по точечным объектам (звездам). Эффективность использования АОС для наблюдений космических аппаратов (КА) может быть существенно повышена путем применения искусственного опорного источника света в виде так называемой "лазерной звезды" и гибких зеркал.

При работе АОС искажения ВФ регистрируются многоапертурным датчиком ВФ, который регистрирует смещения локальных максимумов в каждой субапертуре и, управляя длиной пьезокерамических толкателей, искажает поверхность гибкого зеркала, отражающего световой пучок из телескопа таким образом, чтобы привести изображения этих максимумов к оптической оси телескопа во всех субапертурах. При этом в фокальной плоскости телескопа, а следовательно, и в регистрирующей системе формируется исправленное изображение КО.

ве, авиации, ракетной технике, железнодорожном транспорте, горном деле и т. д.

Актуальность изготовления микромеханических датчиков угловой скорости на составных структурах обусловлена возможностью достижения (согласно расчетам) высоких технических показателей, благодаря которым эти изделия найдут широкое применение в самых высокоточных навигационных системах. Поэтому конструкции и технологии изготовления датчиков активно исследуются в различных фирмах как за рубежом [в лаборатории им. Дрейпера (J. Draper), фирмы Samsung, Rockwell и Honeywell и т. д.], так и нашей стране.

Таким образом, составные структуры типа КНИ и технологии их получения позволяют решать актуальные задачи по улучшению параметров разрабатываемых и изготавливаемых интегральных микросхем и элементов микроэлектромеханических систем, а подобные технологии являются одними из наиболее актуальных технологических процес-

сов, определяющих перспективы развития производства МЭМС.

Список литературы

1. Анализ преимуществ, перспектив применений и технологичности производства структур КНИ: Препринт ИТЭФ 27-00 / А. Л. Суворов, Ю. А. Чаплыгин, С. П. Тимошенко, В. И. Графутин, С. А. Дьячков, А. Г. Залужный, В. В. Калугин, Е. П. Прокопьев, В. Ф. Реутов, Б. Ю. Шарков. М., 2000. 51 с.
2. Прокопьев Е. П., Тимошенко С. П. Возможность прямого соединения пластин кремния с использованием химической сборки поверхности методом молекулярного наслаивания // Материаловедение. 1999. № 4. С. 49–51.
3. Tong Q.-Y., Gösele U. Wafer Bonding and Layer Splitting for Microsystem // Adv. Mater. 1999. Vol. 11. N 17. P. 1409–1425.
4. Tong Q.-Y., Gösele U. Semiconductor Wafer Bonding: Science, Technology. Wiley, New York. 1988. 262 p.
5. Погалов А. И., Тимошенко В. П., Тимошенко С. П., Чаплыгин Ю. А. Разработка микрогроскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 36–40.
6. Петрова В. З., Погалов А. И., Тимошенко С. П. Оптимизация параметров многослойных структур микросенсоров // Известия вузов. Электроника. 1999. № 3. С. 41–44.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 681.7.062

А. Е. Панич, д-р техн. наук, проф., А. И. Сокалло, Е. А. Гришин, канд. техн. наук, Г. А. Житомирский, канд. техн. наук, НКТБ "Пьезоприбор", г. Ростов-на-Дону

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ГИБКИХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Описаны преимущества применения адаптивных оптических систем (АОС), способы их совершенствования и повышения эффективности использования. Рассмотрены новые исполнительные устройства АОС — деформируемые зеркала, приводимые в действие твердотельными электромеханическими преобразователями — пьезоэлектрическими или электрострикционными.

Для эффективного решения научных и прикладных задач, возникающих при наблюдении за космическими объектами (КО), необходимо обеспечить максимально высокую освещенность цели при лазерной локации и возможность получения детальных изображений КО с максимальным разрешением, а также реализовать максимально высокую чувствительность системы "телескоп—фотоприемник".

1. Эффективность применения адаптивных оптических систем

При реализации указанных выше условий имеется естественная внешняя помеха — турбулентность атмосферы, которая наряду с поглощением излучения искажает волновой фронт (ВФ) как принимаемого от КО излучения, так и излучаемого лазерными передатчиками при локации КО. Для компенсации атмосферных искажений ВФ оптических сигналов в реальном масштабе времени используют адаптивные оптические системы (АОС), которые обладают достаточно высокой эффективностью при работе по точечным объектам (звездам). Эффективность использования АОС для наблюдений космических аппаратов (КА) может быть существенно повышена путем применения искусственного опорного источника света в виде так называемой "лазерной звезды" и гибких зеркал.

При работе АОС искажения ВФ регистрируются многоапертурным датчиком ВФ, который регистрирует смещения локальных максимумов в каждой субапертуре и, управляя длиной пьезокерамических толкателей, искажает поверхность гибкого зеркала, отражающего световой пучок из телескопа таким образом, чтобы привести изображения этих максимумов к оптической оси телескопа во всех субапертурах. При этом в фокальной плоскости телескопа, а следовательно, и в регистрирующей системе формируется исправленное изображение КО.

Поясним суть достигаемого преимущества при использовании АОС в наземных оптико-лазерных станциях. Энергопотенциал лазерной локации, выраженный в величине $E_{\text{пр}}$ энергии принимаемого от КА отраженного сигнала, обратно пропорционален квадрату величин расходимости лазерного луча φ : $E_{\text{пр}} \sim k\varphi^{-2}$. Дальность действия R при фиксированном значении принимаемого сигнала: $R \sim n\varphi^{-1/2}$. Расходимость лазерного луча потенциально (без учета турбулентности атмосферы) ограничена только отношением длины волны λ к диаметру главного зеркала телескопа D : $\varphi_{\text{пот}} = 1,22\lambda/D$. При $\lambda = 0,53$ мкм и $D = 1,5$ м $\varphi_{\text{пот}} = 0,1'' (5 \cdot 10^{-7}$ рад). Реально атмосферная турбулентность ограничивает эту величину для пункта со средними параметрами астроклимата $\varphi_{\text{реал}} = 3'' (1,46 \cdot 10^{-7}$ рад). Таким образом, при использовании АОС, которая устраняет атмосферные искажения и приближает $\varphi_{\text{реал}}$ к $\varphi_{\text{пот}}$, выигрыш в предельно достижимых параметрах лазерного локатора составляет по дальности действия, более чем в 5,5 раза, по величине принимаемого сигнала при фиксированной дальности — в 900 раз.

Рассмотрим процесс формирования изображения КО при прохождении излучения через атмосферу. Для упрощения описания возьмем случай точечного КО. Вследствие атмосферной турбулентности (локальных изменений показателя преломления излучения) изображение точки в фокальной плоскости телескопа "разваливается" на несколько точечных изображений, которые при относительно большом времени экспозиции превращаются в размытое (нерезкое) пятно. Чтобы уменьшить влияние атмосферных искажений на структуру получаемого изображения, применяют малое время экспозиции — порядка 10^{-3} с; его называют временем "замороженности" атмосферы. Использование метода коротких экспозиций ограничивает энергетические возможности регистрации изображения за счет накопления.

АОС позволяет собрать так называемое "турбулентное" изображение в одну точку, благодаря чему значительно улучшается качество изображения. Поэтому при фотометрии точечных КО можно уменьшить влияние фона за счет уменьшения полевой диафрагмы и тем самым увеличить отношение сигнал/фон.

Проницающая способность $m_{\text{пр}}$ телескопа при наблюдениях с Земли в условиях турбулентной атмосферы $m_{\text{пр}} \sim 2,51gD/\beta$, где β — угловой размер изображения точечного источника. Предельное значение β определяется дифракционным пределом $\beta = 1,22\lambda/D$ и для телескопа диаметром 1,5 м $\beta_{\text{пот}} = 0,1'' (5 \cdot 10^{-7}$ рад). Реальное значение β для пункта со средними параметрами астроклимата $\beta_{\text{реал}} = 3'' (1,46 \cdot 10^{-7}$ рад). Поэтому при применении адаптивной оптики в фотометрии можно по-

лучить увеличение отношения сигнал/фон в 900 раз, проникающей способности системы "атмосфера—телескоп—фотоприемник" — на 3,6 звездные величины (m), что даст возможность регистрировать излучение от точечных КО почти в 30 раз менее ярких. Что касается получения изображений низкоорбитальных КО, то в настоящее время при вышеуказанных параметрах атмосферы и дальности до объекта 500 км можно различить и идентифицировать элементы конструкции размером 7,5 м.

Применение АОС позволит при тех же дальностях различать детали размером около 25 см или, другими словами, увеличить информативность получаемых площадных изображений в 900 раз, что приведет к увеличению вероятности опознавания формы КО, состояния его внешних элементов и решению ряда других задач.

2. Проблемы совершенствования АОС

Работы по созданию АОС с применением деформируемых зеркал показали их очевидные преимущества перед традиционными оптическими системами. За период с 1982 по 1993 г. создан ряд АОС, повысивших разрешающую способность телескопов и улучшивших при этом отношение сигнал/шум в 7—12 раз. Дальнейшее совершенствование АОС в части повышения чувствительности без снижения быстродействия и управляющего напряжения, уменьшения электромеханического гистерезиса и временных изменений параметров, а также увеличения максимальной деформации стало возможным благодаря созданию новых конструкций твердотельных исполнительных устройств. В России приоритет в их разработке и технологии изготовления принадлежит НКТБ "Пьезоприбор".

Создание новых исполнительных устройств АОС. Интенсивное освоение инфракрасного диапазона стимулировало создание как информационных, так и силовых оптических систем различного назначения. Примером информационной системы служит АОС получения высокодетальных изображений КА в лазерном свете, а примером силовой системы — разрабатываемая система уничтожения ракет среднего радиуса действия, размещаемая на борту самолета. В любом случае исполнительное устройство АОС представляет собой модулятор ВФ оптического излучения и служит для компенсации искажений ВФ, вызванных атмосферными флуктуациями. Одним из вариантов модулятора ВФ является деформируемое зеркало, приводимое в действие твердотельными электромеханическими преобразователями — пьезоэлектрическими или электрострикционными. При этом возможно применение как продольного, так и поперечного пьезоэлектрического или электрострикционного эффектов.

Деформируемое зеркало с крестообразными пьезоэлектрическими преобразователями. Фазовый

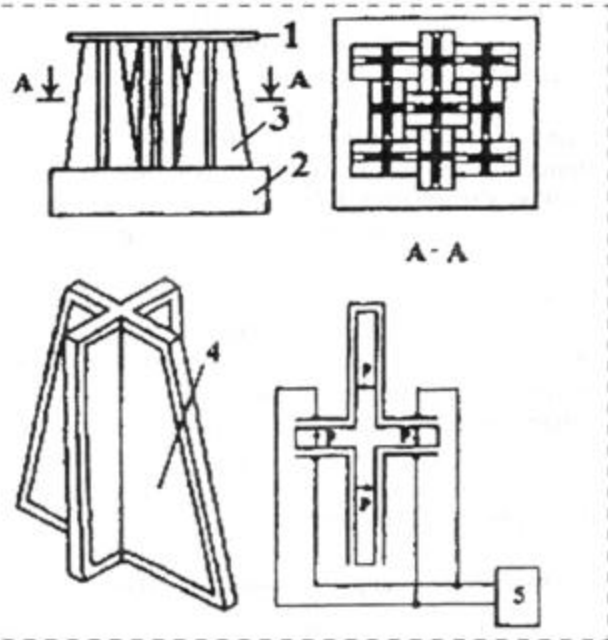


Рис. 1. Фазовый модулятор

модулятор [1] (рис. 1) содержит деформируемое зеркало 1, жесткое основание 2 и размещенный между ними набор пьезоэлементов 3 из сегнето-пьезоматериала на основе твердого раствора цирконата — титаната свинца. Основой пьезоэлемента 3 является монокристаллический стержень с крестообразным поперечным сечением. На боковые плоскости стержня нанесены управляющие электроды 4, подключенные к источнику управляющего напряжения 5. Пьезоэлементы 3 жестко соединены с зеркалом 1 и основанием 2 склейкой. Соединенные пьезоэлементы повернуты на 90° один относительно другого, образуя жесткую коробчатую структуру адаптивного зеркала. В предпочтительном варианте, обеспечивающем наибольшую температурную стабильность, все детали 1, 2, 3 выполняются из высокоплотной пьезоэлектрической керамики, изготовленной методом горячего прессования.

Модулятор работает следующим образом. При подаче сигнала от источника управляющего сигнала 5 на электроды 4, нанесенные на пьезоэлемент 3, вследствие поперечного пьезоэффекта происходит продольная деформация пьезоэлемента 3 в направлении продольной оси стержня, вызывающая изгибную деформацию зеркала 1. Значение управляющего сигнала определяется в зависимости от фазового искажения ВФ оптического луча, падающего на зеркало 1. Фазовое искажение, вызываемое атмосферными флуктуациями, измеряется датчиком ВФ, подключенным к источнику управляющего сигнала. В результате фазовой коррекции

оптический луч, отраженный от зеркала 1, имеет плоский ВФ.

Деформируемое зеркало с Ш-образными электрострикционными преобразователями. Как известно, пьезоэлектрические приводы обладают значительным электромеханическим гистерезисом в сильных переменных электрических полях (достигающая 15...20 %) и временным старением электрофизических параметров (15 %), а клеевая технология сборки только усиливает эти недостатки. Наличие в пьезоэлектрических материалах как прямого, так и обратного пьезоэффекта приводит к взаимному влиянию приводов при работе гибкого зеркала.

Использование электрострикционного материала в конструкции привода решает частично эти проблемы, но получить необходимую знакопеременную деформацию затруднительно, так как электрострикционный материал всегда имеет положительную деформацию независимо от направления электрического поля, а использование клеевой технологии сборки в целом не улучшает картины.

Проблему повышения технических и эксплуатационных характеристик гибкого зеркала, на наш взгляд, необходимо решать путем применения новых технических решений.

Предлагаемая в данной работе конструкция привода позволяет, используя электрострикционный материал системы магнониобата—свинца (PMN), получить знакопеременную деформацию в широком диапазоне частот с электромеханическим гистерезисом (~ 4 %), а технология пайки стеклом дает возможность избежать клеевой технологии сборки, как приводов, так и гибкого зеркала в целом.

Конструктивно привод выполнен в виде Ш-образного монокристаллического блока (рис. 2), состоящего из трех многослойных секций 2.1, 2.2, 2.3, изготовленных из электрострикционного материала PMN.

Все три многослойные секции базируются на одном основании 2 из материала PMN и могут независимо деформироваться под действием управляющего напряжения.

Если две торцевые поверхности крайних секций (2.1 и 2.3) привода механически жестко закрепить на базе 3, а электроды пластин 4 электрически параллелировать, то при подаче управляющего напряжения на них, основание привода будет перемещаться (при изменении управляющего напряжения) относительно базы 3. Таким образом, с увеличением напряжения расстояние между базой и основанием увеличивается и наоборот. Для средней секции привода опорой является вся механическая цепочка: база 3, две крайние секции и основание Ш-образного привода. Поэтому при подаче электрического напряжения на среднюю секцию ее торцевая поверхность будет деформироваться в

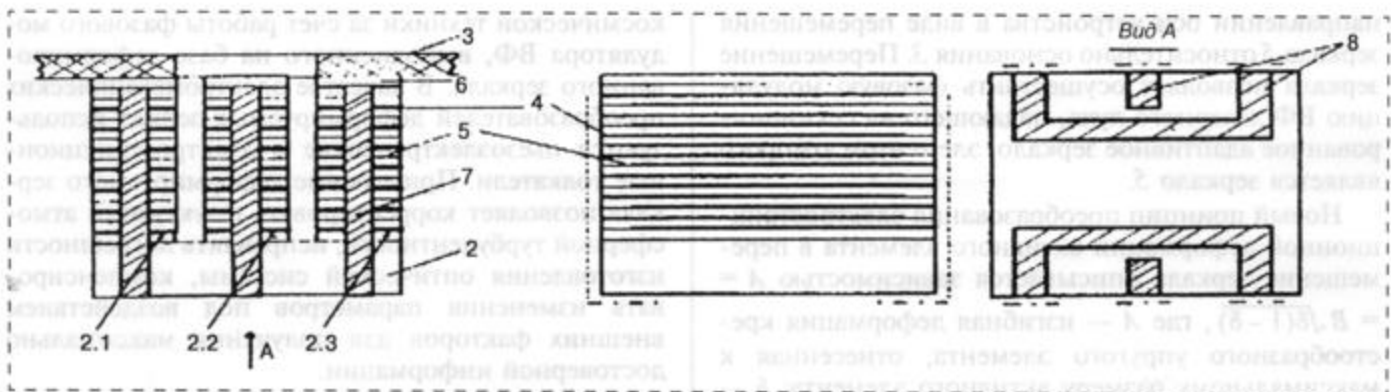


Рис. 2. Конструкция привода:

2.1, 2.2, 2.3 — многослойные секции; 2 — основание; 3 — база; 4 — электроды пластин; 5 — активные элементы; 6 — пассивные элементы; 7 — коммутирующие электроды; 8 — контактные площадки

противоположном направлении относительно общей базы 3.

Таким образом, подавая управляющее напряжение попеременно то на крайние, то на среднюю секции, мы получим знакопеременное перемещение торцевой поверхности средней секции.

В НКТБ "Пьезоприбор" разработана технология производства такого вида привода.

База гибкого зеркала выполнена из материала с коэффициентом теплового расширения, близким к материалу PMN. Это обеспечивает температурное согласование при пайке приводов на базу.

Модуль гибкого зеркала работает следующим образом. При подаче электрического напряжения на электроды средних секций приводов они удлиняются пропорционально квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Так как жесткость крайних секций и оснований приводов значительно больше, чем жесткость отражающей поверхности гибкого зеркала, она подвергается положительной деформации в местах закрепления.

При подаче электрического напряжения на электроды крайних секций приводов на том же принципе осуществляется отрицательная деформация точек крепления толкателей. Таким образом, удается осуществить знакопеременную деформацию локальных точек отражающей поверхности гибкого зеркала при использовании электрострикционного материала PMN.

В результате разработки новой конструкции привода на основе электрострикционного материала PMN и новой технологии сборки как приводов, так и гибкого зеркала в целом [2] получен минимум электромеханического гистерезиса (~4 %) и высокая временная стабильность параметров гибкого зеркала.

Электрострикционный привод секционированного адаптивного зеркала. Монолитное электрострикционное исполнительное устройство [3] (рис. 3) содер-

жит набор крестообразных пластин 1, изготовленных из сегнетоэлектрика с размытым фазовым переходом (твердый раствор магнийниобата — свинца). Между каждыми двумя сегнетоэлектрическими пластинами расположены крестообразные металлические элементы 2. Центральная часть одной из крайних сегнетоэлектрических пластин набора жестко соединена с основанием 3, а центральная часть другой крайней пластины набора жестко соединена через толкатель 4 с зеркалом 5, которое является элементом секционированного модулятора ВФ. На поверхность пластин нанесены металлические электроды. Пластины электрически соединены параллельно и подключены к источнику напряжения. Устройство работает следующим образом. При подаче управляющего напряжения от источника 6 к пластинам 1 за счет поперечного электрострикционного эффекта ширина пластины, т. е. расстояние между ее периферийными частями, уменьшается. Упругий элемент 2 испытывает при этом механическое сжимающее напряжение и, теряя устойчивость, изгибается в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Изгибные деформации всех упругих элементов суммируются в

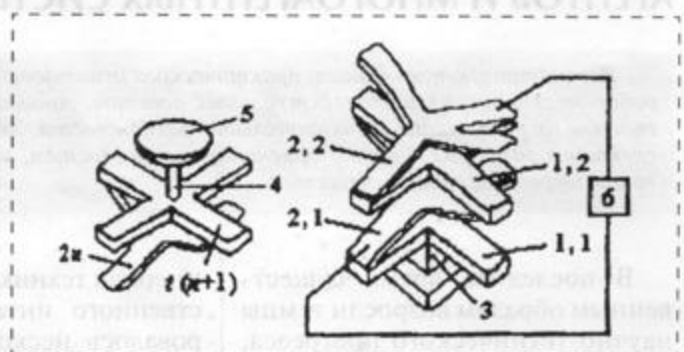


Рис. 3. Электрострикционное исполнительное устройство

направлении оси устройства в виде перемещения зеркала 5 относительно основания 3. Перемещение зеркала позволяет осуществить фазовую модуляцию ВФ лазерного луча, падающего на секционированное адаптивное зеркало, элементом которого является зеркало 5.

Новый принцип преобразования электрострикционной деформации активного элемента в перемещение зеркала описывается зависимостью $A = B\sqrt{\delta(1-\delta)}$, где A — изгибная деформация крестообразного упругого элемента, отнесенная к максимальному размеру активного элемента; δ — относительная поперечная электрострикционная деформация; коэффициент $B \approx 2,6$ учитывает синусоидальную форму изогнутого упругого элемента. При максимальных значениях $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$; достижимых в электрострикционных материалах, значения A превосходят δ в 150 раз. При меньших значениях δ значения A возрастают и превосходят δ в несколько сотен раз.

Результаты исследований показывают, что АОС "лазерная звезда" дает возможность при минимальной освещенности с высокой разрешающей способностью обнаруживать и распознавать объекты

космической техники за счет работы фазового модулятора ВФ, выполненного на базе деформированного зеркала. В качестве электромеханических преобразователей деформируемых зеркал используются пьезоэлектрические и электрострикционные толкатели. Применение деформируемого зеркала позволяет корректировать флуктуации атмосферной турбулентности, исправлять погрешности изготовления оптической системы, компенсировать изменения параметров под воздействием внешних факторов для получения максимально достоверной информации.

Список литературы

1. Пат. № 2080638 РФ. Кл. G02 F 1/00, 1997. Фазовый модулятор волнового фронта. / Г. А. Житомирский, А. Е. Панич.
2. Пат. № 2133052 РФ. Кл. G02 F 1/00, 1997. Фазовый модулятор волнового фронта. / А. Е. Панич, А. И. Сокалло, А. В. Гориш, Ю. Н. Коптев.
3. Пат. № 2134479 РФ. Кл. H 02 № 2/02. G 02 F 1/29 1998. Твердотельный привод модулятора волнового фронта. / Г. А. Житомирский, А. Е. Панич.
4. Панич А. Е., Сокалло А. И., Гришин Е. А., Житомирский Г. А. Новые конструкции и технологии создания гибких зеркал для адаптивных оптических систем // Материалы Международной научно-практической конференции "Пьезотехника-2000". М.: МИРЭА, 2001. С. 139—143.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 004.3

В. О. Толчеев, канд. техн. наук, доц.,
Московский энергетический институт (технический университет)

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ И МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются области практического использования программных и робототехнических интеллектуальных агентов, многоагентных систем, способы их реализации, функциональные возможности. Анализируются перспективы развития агентно-ориентированных систем, их роль в формировании информационного общества.

В последнее время существенным образом возросли темпы научно-технического прогресса, особенно в таких областях, как телекоммуникационная и компь-

ютерная техника, системы искусственного интеллекта, сформировалось несколько новых перспективных направлений — био-, нано- и MEMS-технологии, спо-

собных (подобно компьютерной и сетевой революциям) внести существенные инновации не только в производственную сферу, но и в повседневную жизнь. Вместе с тем современный этап развития науки и техники характеризуется все большим взаимным влиянием ведущих технологий, созданием "прорывных" пограничных исследований. Так, в рамках работ в области распределенных систем искусственного интеллекта (*Distributed Artificial Intelligence Systems*) и "искусственной жизни" (*Artificial Life*) развивается новое направление, получившее название интеллектуальных агентов и многоагентных систем.

Автономным интеллектуальным агентом (*autonomous intelligent agent*) называется программ-

направлении оси устройства в виде перемещения зеркала 5 относительно основания 3. Перемещение зеркала позволяет осуществить фазовую модуляцию ВФ лазерного луча, падающего на секционированное адаптивное зеркало, элементом которого является зеркало 5.

Новый принцип преобразования электрострикционной деформации активного элемента в перемещение зеркала описывается зависимостью $A = B\sqrt{\delta(1-\delta)}$, где A — изгибная деформация крестообразного упругого элемента, отнесенная к максимальному размеру активного элемента; δ — относительная поперечная электрострикционная деформация; коэффициент $B \approx 2,6$ учитывает синусоидальную форму изогнутого упругого элемента. При максимальных значениях $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$; достижимых в электрострикционных материалах, значения A превосходят δ в 150 раз. При меньших значениях δ значения A возрастают и превосходят δ в несколько сотен раз.

Результаты исследований показывают, что АОС "лазерная звезда" дает возможность при минимальной освещенности с высокой разрешающей способностью обнаруживать и распознавать объекты

космической техники за счет работы фазового модулятора ВФ, выполненного на базе деформированного зеркала. В качестве электромеханических преобразователей деформируемых зеркал используются пьезоэлектрические и электрострикционные толкатели. Применение деформируемого зеркала позволяет корректировать флуктуации атмосферной турбулентности, исправлять погрешности изготовления оптической системы, компенсировать изменения параметров под воздействием внешних факторов для получения максимально достоверной информации.

Список литературы

1. Пат. № 2080638 РФ. Кл. G02 F 1/00, 1997. Фазовый модулятор волнового фронта. / Г. А. Житомирский, А. Е. Панич.
2. Пат. № 2133052 РФ. Кл. G02 F 1/00, 1997. Фазовый модулятор волнового фронта. / А. Е. Панич, А. И. Сокалло, А. В. Гориш, Ю. Н. Коптев.
3. Пат. № 2134479 РФ. Кл. H 02 № 2/02. G 02 F 1/29 1998. Твердотельный привод модулятора волнового фронта. / Г. А. Житомирский, А. Е. Панич.
4. Панич А. Е., Сокалло А. И., Гришин Е. А., Житомирский Г. А. Новые конструкции и технологии создания гибких зеркал для адаптивных оптических систем // Материалы Международной научно-практической конференции "Пьезотехника-2000". М.: МИРЭА, 2001. С. 139—143.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 004.3

В. О. Толчеев, канд. техн. наук, доц.,
Московский энергетический институт (технический университет)

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ И МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются области практического использования программных и робототехнических интеллектуальных агентов, многоагентных систем, способы их реализации, функциональные возможности. Анализируются перспективы развития агентно-ориентированных систем, их роль в формировании информационного общества.

В последнее время существенным образом возросли темпы научно-технического прогресса, особенно в таких областях, как телекоммуникационная и компь-

ютерная техника, системы искусственного интеллекта, сформировалось несколько новых перспективных направлений — био-, нано- и MEMS-технологии, спо-

собных (подобно компьютерной и сетевой революциям) внести существенные инновации не только в производственную сферу, но и в повседневную жизнь. Вместе с тем современный этап развития науки и техники характеризуется все большим взаимным влиянием ведущих технологий, созданием "прорывных" пограничных исследований. Так, в рамках работ в области распределенных систем искусственного интеллекта (*Distributed Artificial Intelligence Systems*) и "искусственной жизни" (*Artificial Life*) развивается новое направление, получившее название интеллектуальных агентов и многоагентных систем.

Автономным интеллектуальным агентом (*autonomous intelligent agent*) называется программ-

ный или технический объект, выполняющий поставленную задачу в некоторой среде, обладающий способностью планировать и принимать самостоятельные решения, обмениваться информацией с другими интеллектуальными агентами. Множество интеллектуальных агентов, способных к коллективному функционированию для решения поставленной задачи (иерархическому подчинению, разделению обязанностей, кооперации, синхронизации своих действий) и имеющих механизмы разрешения межгентных конфликтов, представляет *многоагентную систему* [1].

Среда, в которой действуют автономные интеллектуальные агенты, может быть различной. В случае, когда такой средой является киберпространство, под автономными агентами понимаются программные интеллектуальные агенты (*software intelligent agents*) — программы, реализующие функции поиска, сбора и преобразования информации преимущественно в сетевой среде. В соответствии с классификацией программных интеллектуальных агентов на основе целей и задач, которые они выполняют, различают информационные и мобильные агенты (*information and mobile agents*), агенты-переговорщики и агенты-ассистенты пользователя (*collaborative, interface agents*) и т. д.

Когда упомянутой средой является реальный мир, под автономными агентами понимаются робототехнические интеллектуальные агенты (*robotic intelligent agents*) — роботы, способные автономно функционировать в реальной среде (решать задачи выживания, перемещения, навигации, энергообеспечения и т. п.) в целях регистрации требуемых физико-химических параметров объектов окружающего мира, передачи полученной информации ее потребителю, осуществления спланированных действий.

Как программные, так и робототехнические агенты могут рассматриваться в качестве самостоятельных средств, подчиняющихся своим закономерностям развития и предназначенных для решения специфических функциональных задач. Вместе с тем, поскольку в основе разработки и практического использования этих средств лежат общие принципы теории искусственного интеллекта, на наш взгляд, необходим взаимосвязанный подход к анализу современного состояния и перспектив развития таких агентов.

Программные интеллектуальные агенты

Работы по созданию программных агентов можно разделить на два периода [2]. Во время первого периода (с середины 70-х годов до начала 90-х годов) с помощью доступных для того времени программных и технических средств осуществлялась разработка так называемых "смышленных" агентов (*smart agents*), функциональные возможности которых были достаточно ограничены. Второй период, начавшийся с начала 90-х годов, ознаменовался поиском новых решений в области стремительно развивавшихся сетевых, телекоммуникационных, интеллектуальных технологий. Подобно нейросетям и нечеткой логике, на новом вычислительном и аппаратном уровнях интеллектуальные агенты достаточно быстро превратились в ведущую информационную технологию с продажей агентно-ориентированных продуктов на сумму, превышавшую в 2000 году 4 млрд долл.

В настоящее время можно выделить несколько направлений в области создания программных интеллектуальных агентов.

1. *Многоагентные интеллектуальные системы*, осуществляющие поиск, предварительную обработку (фильтрацию, классификацию, аннотирование) и анализ

информации. Их можно разделить (с некоторой степенью условности) на три группы:

- *неспциализированные интеллектуальные агенты*, которые ищут информацию по ключевым словам или словосочетаниям на основании вычисления различных мер близости и коэффициентов корреляции между запросом пользователя и документами в сети Internet;
- *специализированные интеллектуальные агенты*, которые ищут строго специализированную (например, новостную) информацию на определенных сайтах;
- *интеллектуальные агенты, основанные на знаниях*, т. е. имеющие модель предметной области, что позволяет при поиске информации максимально использовать методы и средства теории систем искусственного интеллекта, повышая эффективность поиска по сравнению с неспециализированными интеллектуальными агентами [2].

Многие интеллектуальные агенты, основанные на знаниях, являются *мобильными агентами*, т. е. снабжены механизмами самостоятельной навигации в сети и выявления новых источников информации (в соответствии с заданием пользователя) [3]. Дальнейшее развитие интеллектуальных агентов и многоагентных систем в данной области будут базироваться на следующих принципах:

- совершенствование алгоритмов распознавания текста, что должно привести к более "осмысленным" действиям агентов при работе с ключевыми словами, особенно при выявлении новой релевантной информации и знаний;
- разработка средств организации взаимодействия различных интеллектуальных агентов, которые часто бывают реализова-

ны с помощью плохо совместимых программных средств;

- развитие методов многомерного статистического анализа, автоматической классификации и искусственного интеллекта.

2. **Автономные интеллектуальные агенты**, используемые для защиты сетей от несанкционированных проникновений или, наоборот, агенты, которые могут быть использованы для атак на закрытые сети государственных учреждений и частных компаний — программные агенты "демоны" и "тройские кони", дезорганизации работы компьютеров (программные агенты — вирусы). Некоторые такие агенты могут перемещаться по сети Internet и отслеживать информацию, которой обмениваются пользователи, анализировать сетевой трафик и декодировать коммуникационные протоколы (программные агенты типа "sniffer").

Автономные интеллектуальные агенты и многоагентные системы позволяют осуществлять как пассивное, так и активное вторжение в защищенные сети. При *пассивном вторжении* (перехвате информации) происходит только наблюдение за прохождением информации по каналу связи без вторжения в содержание передаваемой информации (например, определяются пункты назначения или факт прохождения сообщения, его длина и частота обмена). При *активном вторжении* возможно осуществить подмену информации, передаваемой в сообщении (например, выборочно модифицировать, изменить, удалить, задержать или изменить порядок следования сообщений). Таким образом, при активном вторжении происходит нарушение конфиденциальности информации, ее целостности или даже потеря работоспособности всей информационной системы, а опасность пассивного вторжения заключается в том, что в этом слу-

чае не остается никаких следов наблюдения за каналом связи [4].

Одним из наиболее перспективных способов повышения сохранности сетевой информации представляется использование автономных интеллектуальных агентов и многоагентных систем. На рынке программного обеспечения уже появились новые программные продукты RealSecure (компания Internet Security Systems) и CMDC — Computer Misuse Detection System (корпорация Science Application International Corporation), в которых используются автономные интеллектуальные агенты, действующие в наиболее критических точках сетей, анализирующие проходящие по сети пакеты данных и ищущие в них признаки внешней или внутренней атаки известных образцов, т. е. по существу реализуется "вторая линия" обороны сети, расположенная за брандмауэром и выявляющая запрещенные вторжения, неотсеченные брандмауэром или проведенные кем-то из числа имеющих санкционированный доступ к сети (внутренняя атака). На сегодняшний день база данных RealSecure насчитывает более 130 моделей всевозможных атак, что свидетельствует о достаточно высокой ее эффективности и надежности¹ [5].

¹Однако даже использование современных средств защиты сетей не позволяет достичь достаточного уровня защищенности информации. По мнению большинства специалистов, основные причины существования угроз нарушения конфиденциальности информации заключены в том, что инфраструктура сети Internet и ее протоколы (семейства TCP/IP) разрабатывались с конца 60-х до середины 80-х, исходя в основном из соображений надежности связи, но не из соображений безопасности. Осознание этого факта привело к созданию нескольких новых перспективных проектов. Так, в рамках инициативы "Интернет следующего поколения" (Next Generation Internet) осуществляется разработка высокоскоростных сетей с повышенными требованиями к сохранению секретности и конфиденциальности передаваемых сообщений — американский проект (Internet II).

3. **Программные агенты для проведения операций в рамках электронной коммерции.** Так, интеллектуальный агент, называемый *автоматический брокер (automatic broker)*, может отслеживать обновленные сведения, необходимые пользователю (например, изменения курса акций), на каком-либо сервере. Как только стоимость акций (или динамика их роста—падения) затрагивает интересы клиента, интеллектуальный агент осуществляет одно из заданных действия (покупку—продажу, срочное информирование пользователя и т. д.). Подобные агенты получают широкое применение в области электронной торговли для заказа и оплаты различных товаров в виртуальных магазинах. Аналогичным образом интеллектуальные агенты могут быть использованы в системе интерактивного телевидения, например, для изучения программы всех каналов и составления расписания просмотра пользователем программ в соответствии с его пожеланиями.

4. **Специализированные агенты**, которые разрабатываются для обеспечения функционирования распределенных систем управления, дистанционного обучения и т. д. Использование интеллектуальных агентов в системах обучения и тренажерах заключается в выявлении в процессе обучения сильных и слабых сторон студентов, их интеллектуальных возможностей (быстроты мышления, скорости и степени усваивания материала, способности к обобщению и анализу, эмоциональности и т. д.), уровня культуры и образования, а также профессиональных наклонностей.

В настоящее время при создании интеллектуальных агентов используются как логический, так и бионический подходы. В случае логического подхода интеллектуальный агент содержит символическую модель окружающей среды, принятие решений в ко-

торой осуществляется на основе логических операций. При этом активно используются специализированные языки моделирования рассуждений: Пролог, Лисп, Смолток. Однако в настоящее время большинство разработчиков интеллектуального программного обеспечения переориентируются на использование бионического подхода (нейросетей, нечеткой логики и генетических алгоритмов), который обеспечивает лучшую обучаемость и адаптацию.

Робототехнические интеллектуальные агенты

Робототехнический агент представляет собой автономную интеллектуальную систему, состоящую из следующих мехатронных компонентов [6]:

- двигательной системы ("тело");
- сенсорной системы ("органов чувств");
- систем управления ("мозга");
- системы коммуникации ("языков и каналов связи").

Существует несколько общих подходов для построения робототехнических агентов.

Подход на основе символической модели мира, в которой решения принимаются путем логических рассуждений (так называемая *делиберативная архитектура* {*deliberative architecture*}). Такие агенты называются агентами, основанными на знаниях. Для представления знаний используются хорошо известные в системах искусственного интеллекта методы:

- логический;
- продукционный;
- семантический;
- фреймовый.

Альтернативный подход основывается на том, что интеллектуальное поведение может быть обеспечено без использования символической модели мира путем формирования реакций агента на события внешнего мира. Такой подход был предложен Р. Брук-

сом (R. Brooks) в 1985 году в процессе работы над созданием автономных мобильных роботов и получил название *реактивной архитектуры* {*reactive architecture*}¹. При построении интеллектуального агента с реактивной архитектурой предполагается, что большинство его действий могут рассматриваться как рутинные, т. е. после обучения интеллектуальный агент выполняет их с минимальными изменениями. Типичными представителями, реализующими данный подход, являются нейросетевые интеллектуальные агенты.

В настоящее время для создания наиболее эффективно функционирующих агентов, решающих слабоформализуемые задачи, применяется *гибридная архитектура*, объединяющая преимущества как делиберативной, так и реактивной архитектур.

На первый взгляд, работы по созданию робототехнических агентов все еще находятся в некоторой тени ажиотажа вокруг разработки и использования программных агентов, которые уже стали одним из основополагающих инструментов создания информационно-поисковых систем, распределенных систем управления и обучения, систем электронной коммерции. Однако более внимательный анализ публикаций в области создания робототехнических агентов позволяет сделать вывод о том, что разработчики уже реализовали различные теоретические концепции в виде опытных образцов и приступили к непосредственному их испытанию [7, 8]. По результатам этих испытаний ожидается широкомасштабное внедрение и эксплуатация робототехнических агентов и многоагентных систем для решения реальных задач. Ожидается, что уже к 2010 году первые автономные микророботы будут ре-

¹ Брукс назвал данную архитектуру *subsumption architecture*.

ализованы в виде коммерческих продуктов и заменят человека там, где работа или опасна для здоровья, или человек не может ее осуществлять по каким-либо причинам.

Использование робототехнических агентов будет наиболее перспективным в следующих областях.

♦ **Техническая диагностика и ремонтные операции в труднодоступных местах.** Так, японские ученые сконструировали робот длиной 1 см и массой в 0,5 г. Он предназначен для обслуживания АЭС и ТЭС и восстановления поврежденных участков электростанций. Робот способен проникать в поврежденные зоны, проползать по тончайшим трубкам и осуществлять ремонтные работы [7].

♦ **Медицина.** На выставке роботов Robodex—2000 в Иокогаме проявился особый интерес со стороны медицинских учреждений к использованию робототехнических агентов для решения своих задач. По прогнозам специалистов, доля кардиологических операций, выполняемых микророботами, возрастет с 5 % в 1999 году до 30 % в 2005 году. При этом роботы позволяют проводить подобные операции без вскрытия грудной клетки и использования аппаратов искусственного кровообращения, т. е. намного быстрее и с меньшим риском для пациента. Единственным ограничением для широкого применения микророботов в медицине остается их стоимость — около 1 млн долл. [9].

♦ **Освоение космического пространства.** Национальное агентство по авионавтике и исследованию космического пространства (НАСА) разработало несколько различных модификаций роботов, в частности:

- робот "Snakebot", имеющий форму змеи и имитирующий ее движение;
- робот "K9", выполненный в виде небольшой собаки.

Оба робота сейчас проходят тестовые испытания и предназначены для передвижения и осуществления действий в условиях местности со сложным рельефом [10].

♦ **Военные и разведывательные операции.** Инициатором большинства программ по развитию программных и робототехнических агентов, многоагентных систем было министерство обороны США, активно финансировавшее перспективное направление и разрабатывавшее концепцию использования интеллектуальных агентов на поле боя и в разведывательных целях [11]. В начале 1999 года исследователи Калифорнийского университета (г. Беркли) в рамках работ, поддерживаемых управлением перспективных исследований, и разработок министерства обороны США (ДАРПА) выполнили по программе "Умная пыль" (Smart Dust) функционально сложный датчик в виде таблетки диаметром около 5 мкм. Помимо чувствительного элемента этот датчик содержит аналого-цифровой преобразователь, процессор, запоминающее устройство совместно с устройством оптической дуплексной внешней связи и источником возобновляемой энергии. В 2001 году планируется уменьшить габаритные размеры этого датчика до 1—2 мкм [12]. Подобные устройства будут использованы для создания распределенной многоагентной робототехнической системы, которая может использоваться в военных, разведывательных целях, а также для мониторинга загрязнения окружающей среды, навигации и т. п.

Другой разработкой широкого назначения является миниатюрный робот-микровездеход длиной менее 40 см, который сможет действовать в условиях "неструктурированной" местности. Это устройство будет настолько мало, что его сможет переносить и использовать один человек, при этом данный робот будет достаточно

прочным, чтобы выдерживать различные удары (например, в случае перебрасывания через забор или при столкновении с каким-либо препятствием). В конструкции робота были использованы технологии, которые НАСА разработало по программе исследования космического пространства (в частности, для взятия проб с поверхности Марса) [7].

Кроме того, для военных и разведывательных целей разрабатываются интеллектуальные агенты в виде беспилотных (летающих, плавающих, подводных, ползающих) устройств. Наилучшие результаты получены при создании летающих мини- и микророботов, представленных аппаратами с фиксированным крылом. Размах крыла этих аппаратов не превышает 20 см, радиус действия составляет от 30 до 60 км.

Вместе с тем ДАРПА финансирует разработку летающих микророботов, имеющих машущие крылья и предназначенных для выполнения различных задач на малых скоростях полета (например, в случае ограниченного воздушного пространства в условиях города) [7].

В настоящее время можно выделить два основных направления исследований в области создания робототехнических интеллектуальных агентов.

1. **Совершенствование микроэлектромеханической части робототехнического агента.** Для этого наиболее перспективным представляется использование достижений нанотехнологии и биотехнологии для разработки новых видов робототехнических агентов и "гибридных" (комбинированных) агентов¹. Как представляется, в качестве такого агента может ис-

¹ Согласно одной из классификаций [1], такие агенты называются *биологическими агентами*. Однако под биологическими агентами традиционно также понимаются компоненты биологического оружия, поэтому во избежании путаницы далее будет использоваться термин "гибридные" (комбинированные) агенты.

пользоваться биодатчик (биосенсор), перемещаемый в пространстве с помощью робототехнического агента (агента-координатора) и осуществляющий определенные функции, например, обнаружение радиационного, биологического, химического загрязнения и т. п. Таким образом, под "гибридным" агентом понимается синтезированное или природное вещество, которое ведет себя в конкретных условиях заранее известным образом. Результатом взаимодействия такого агента со средой может быть электрический сигнал, изменение цвета реагента или конфигурации белка.

Полученная от "гибридного" агента (агента-исполнителя) информация передается агентом-координатором (робототехническим агентом) в многоагентную систему для принятия решения на основе анализа всех имеющихся данных, поступивших от агентов, задействованных в операции. В перспективе, учитывая значительные успехи в области синтеза органических и неорганических веществ, конструирования белков (protein design), создания принципиально новых биомолекулярных материалов, можно предположить возможность использования в качестве "гибридного агента" клетки животных, бактерии, специально созданные вирусы, фрагменты ДНК. Возможно также использование живых организмов (пчел, мотыльков, тараканов), оснащенных дополнительными сенсорными, управляющими, радиопередающими и навигационными устройствами, в качестве "гибридных агентов" [8].

2. **Разработка программных средств и протоколов обмена данными для объединения различных робототехнических агентов в единую многоагентную систему.** Интеллектуальные системы управления и принятия решений каждого агента могут решать только свои локальные задачи в области "ответственности", не обладая доста-

точными энергетическими ресурсами и знаниями для решения всей задачи в целом. Поэтому необходимо объединять такие робототехнические агенты в многоагентную систему.

Для разработки протоколов связи между робототехническими агентами применяются те же подходы, которые широко используются при разработке многоагентных систем, состоящих из программных агентов. К числу таких эффективных программных средств относятся *Java*, *CORBA* (*Common Object Request Broker Architecture*), *модифицированные диалекты языков программирования Лисп* и *Пролог*, а также *протокол взаимодействия интеллектуальных агентов — KQML (Knowledge Query and Manipulation Language)*¹ [1].

В ближайшем будущем ожидается существенное расширение областей применения интеллектуальных агентов. Кроме того, в повседневной деятельности будет возрастать значимость таких областей, как:

- электронная коммерция;
- виртуальные предприятия;

¹Протокол KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) был разработан в 1994 году при поддержке ДАРПА для интеллектуальной системы управления, сбора информации и связи между мобильными транспортными средствами.

- обработка информации в базах данных и знаний;
- системы совмещенного проектирования;
- тренажеры;
- диагностика и устранение неисправностей;
- распределенные системы управления.

В разработке этих областей интеллектуальным агентам принадлежит доминирующая роль. В этой связи, как справедливо отмечено в [12], агентно-ориентированный подход может сыграть важнейшую роль в становлении информационного общества, интеллектуализации различных видов деятельности.

* * *

Активная разработка интеллектуальных агентов и многоагентных систем, полученные в данной области результаты, их проникновение в различные сферы нашей жизнедеятельности позволяют предположить, что самыми удивительными применениями интеллектуальных агентов будут те, которые нам не достает еще мудрости предсказать.

Список литературы

1. **Software Agents**. Ed. Bradshaw J., AAAI Press / The MIT Press. 1997. P. 10—292, 294, 308—313, 368, 378, 434.
2. **Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. С. 317—323, 338—340.
3. **Kotz D., Gray R.** Mobile agents and the Future of the Internet // ACM Operating Systems Review. 33(3). August 1999. P. 7—13.
4. **Завгородний В. И.** Комплексная защита информации. М.: Лотос, 2001. С. 8—12, 202—205.
5. **Гриняев С. Н.** Интеллектуальное противодействие информационному оружию. М.: Синтег. 1999. С. 10—11.
6. **Тимофеев А. В.** Мультиагентное и интеллектуальное управление сложными робототехническими системами // Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий. СПб.: СПИИ РАН. 1999. С. 71—81.
7. **Мальцев П. П., Пономарев К. М., Толчеев В. О., Чистяков В. М.** Интеллектуальные робототехнические агенты и многоагентные системы // Мехатроника. 2001. № 5. С. 37—41.
8. **Рубцов И. В., Нестеров В. Е., Рубцов В. И.** Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника // Микросистемная техника. 2000. № 3. С. 36—42.
9. **Конноли П.** Роботы уменьшают риск хирургических операций // Computer-World (Россия), 26 декабря. 2000. С. 36.
10. **Information Technologies and the Future of Land Warfare.** Rand Arroyo Center, 1995. P. 23, 69.
11. **Башилов Г.** Пыль веков // Компьютерра, 12 июня 2001. С. 1.
12. **Тарасов В. Б.** Нетрадиционные и гибридные логики в моделировании интеллектуальных агентов (Часть 1) // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2000. № 5. С. 5—17.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 537.226.33

А. В. Шильников, д-р физ.-мат. наук, **Р. А. Лалетин**,
А. И. Бурханов, канд. физ.-мат. наук,
А. С. Сигов, д-р физ.-мат. наук,
К. А. Воротилов, д-р физ.-мат. наук,
Волгоградская государственная архитектурно-строительная
академия, Московский государственный институт радиотехники,
электроники и автоматики (технический университет)

ОСОБЕННОСТИ НИЗКО- И ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ТОНКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ ЦТС

Представлены результаты исследования диэлектрических свойств тонких сегнетоэлектрических пленок цирконата титаната свинца (ЦТС) с избыточным содержанием свинца. По кривым первоначальной поляризации $P_0(E_0)$ проанализированы их нелинейные свойства. В качестве параметра, характеризующего эти свойства, использовалось оценочное значение коэрцитивного поля E_c' , соответствующее полю наиболее быстрого роста объемной поляризации образца. Проведен анализ температурных и частотных зависимостей данного параметра в целях выяснения природы механизмов, ответственных за особенности переполяризации исследуемых материалов.

Введение

Известно [1], что метод низкочастотной (НЧ-ИНЧ) спектроскопии позволяет получить наиболее полную картину поляризационных и переполяризационных процессов в обычных сегнетоэлектрических (СЭ) материалах. Это объясняется, в частности, тем, что при столь низких частотах в этих материалах в процессе переполяризации участвует наибольшая часть объема образца. В [2] была показана возможность применения данного метода и к исследованию переполяризационных характеристик СЭ пленок. В то же время особенности СЭ материалов, приготовлен-

ных в виде тонких пленок, где принципиальную роль играют подложка и электроды образца (ячейки), ставят определенные ограничения при изучении переполяризационных процессов в ИНЧ диапазоне. Это, в частности, относится к определению коэрцитивного поля E_c . При толщине пленки порядка 1 мкм поля насыщения становятся сравнимыми с пробивными полями. Кроме того, для такой сложной (многослойной) структуры, которая имеет место при получении СЭ пленок, сильные поля инжектируют значительный заряд из электродов, что также вносит погрешность в оценку характера процессов, связанных главным образом с СЭ доменной структурой материала.

Чтобы обойти данные ограничения в оценке величины E_c в настоящей работе анализируются кривые первоначальной поляризации $P_0(E_0)$, при получении которых максимальные амплитуды измерительного поля (E_0) были значительно меньше полей насыщения в петлях поляризации. Обычно в модельных СЭ (в частности, в монокристаллах ТГС) поле, которое соответствует наиболее быстрому росту поляризации объема образца (точка максимума зависимости $\epsilon'(E_0) = \frac{dP_0(E_0)}{\epsilon_0 dE_0}$), практически совпадает с E_c .

В то же время для СЭ материалов, приготовленных в виде жесткой керамики или тонких пленок, у которых петли поляризации (ПП) существенно униполярны, поле, соответствующее максимуму $\epsilon'(E_0)$, может лежать как ниже, так и выше E_c , что обусловлено значительным распределением доменов по коэрцитивным (E_{ci}) и внутренним E_i (локальным) полям переключения доменов.

В [3] описывается способ изучения нелинейных свойств пленок по поведению полей E_1 и E_2 (рис. 1), которые ограничивают

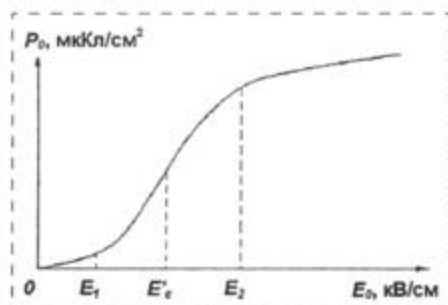


Рис. 1. Модель кривой первоначальной поляризации сегнетоэлектрика

The research was supported by U.S. CRDE
Ministry of Education Award VZ-010-0.

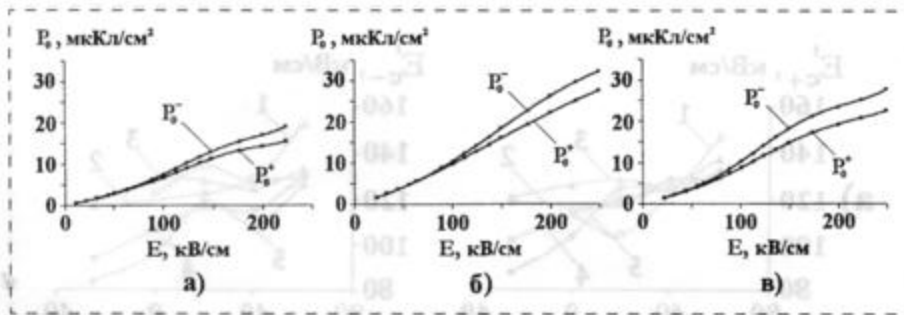


Рис. 2. Кривые первоначальной поляризации $P_0(E_0)$, полученные при $T = 25^\circ\text{C}$ на частоте 100 Гц для образцов с различным избытком свинца (x):

$a - x = 0$ мол.%; $b - x = 10$ мол.%; $v - x = 30$ мол.%. (P_0^+ — кривая, полученная из верхних частей петель, P_0^- — кривая, полученная из нижних частей петель)

область, где происходит крутой рост поляризации, обусловленный доменными процессами. Однако в случае тонких пленок из-за сильной сглаженности кривых первоначальной поляризации $P_0(E_0)$ (рис. 2) определение полей E_1 и E_2 затруднено. Этим объясняется выбор параметра E'_c (см. рис. 1), как более достоверной характеристики нелинейности исследуемых образцов.

Таким образом, целью настоящей работы был анализ температурных и частотных зависимостей параметра E'_c в пленках типа Ni/PZT/SiO₂/Pt и определение на его основе природы механизмов, ответственных за особенности переполяризации данных материалов. Проводилось также сравнение характеристик пленок, полученных из растворов с различным избыточным содержанием свинца [4].

Методика измерений и образцы

Изучение переполяризационных характеристик проводилось на пленках $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3$, полученных золь-гель методом. Более подробно технологические особенности изготовления этих образцов описаны в [4]. В настоящем исследовании были использованы образцы, при получении которых было введено различное избыточное количество свинца (x) в исходный пленкообразующий раствор ($x = 10, 30$ и 50 мол. %).

Для сравнения их свойств в работе был также использован образец со стехиометрическим составом ($x = 0$ мол. %). Толщина всех пленок составляла $0,2$ мкм. В качестве нижнего электрода при измерениях использовался слой платины. Верхние электроды (контактные площадки) площадью $0,03$ мм² были изготовлены из никеля (Ni).

Для наблюдения петель поляризации при различных амплитудах переменного поля E_0 (от 1 до 250 кВ/см) в диапазоне частот от 0,1 Гц до 1 кГц была использована модифицированная установка Сойера—Тауэра. Измерения ПП проводились в квазистатическом режиме охлаждения от $T = +50^\circ\text{C}$ (323 К) до $T = -90^\circ\text{C}$ (183 К) при фиксации температуры в промежуточных точках с точностью поддержания не хуже $\pm 0,1$ К.

В результате обработки таких петель (рис. 3) были получены амплитудные зависимости ряда характеристик (остаточная поляризация, максимальная поляризация и полуширина петли). С использованием анализа кривых первоначальной поляризации $P_0(E_0)$ были построены полевые и температурные зависимости параметра E'_c .

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены ПП, полученные на модифицирован-

ной установке Сойера—Тауэра на частотах 0,1—1000 Гц для образцов с различным сверхстехиометрическим содержанием свинца x в пленкообразующем растворе. На рис. 3 хорошо видно, что все изображенные ПП униполярны и смещены по оси E . Поэтому в настоящей работе отдельно оценивались кривые первоначальной поляризации, полученные как из верхних, так и нижних частей ПП (рис. 2, 4). В последующем для каждой из них была получена своя зависимость $\varepsilon'(E_0)$. В то же время, как видно на рис. 2, который иллюстрирует зависимости $P_0(E_0)$ при $T = 25^\circ\text{C}$ для образцов с различным содержанием свинца, значения параметра E'_c для верхней (E'_{c+}) и нижней (E'_{c-})

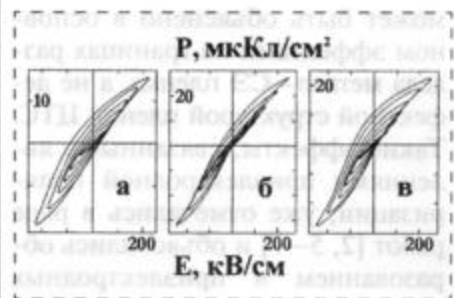


Рис. 3. Петли поляризации, полученные при $T = 25^\circ\text{C}$ для образцов с различным избытком свинца (x) на частоте 100 Гц: $a - x = 0$ мол.%; $b - x = 10$ мол.%; $v - x = 30$ мол.%

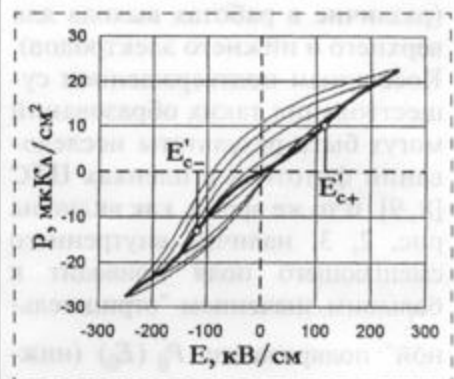


Рис. 4. Петли поляризации для образца с $x = 30$ мол.%, снятые при температуре 25°C на частоте 100 Гц, и кривые первоначальной поляризации $P_0(E_0)$, полученные из нижних и верхних частей этих петель

частей петель практически равны. Следовательно, несмотря на ярко выраженное смещение ПП по оси E и некоторую униполярность, точки перегиба (наибольшей скорости роста поляризации) для обеих ветвей $P_0(E_0)$ приходится практически на одну и ту же величину E_0 , т. е. сдвига E'_c , наблюдаемого обычно при смещенных ПП, при сильных E_0 не наблюдается. Такое поведение E'_c может свидетельствовать о том, что механизм, ответственный за реполяризацию образца, имеет сегнетоэлектрическую природу, а смещающее поле "выступает в роли" внешнего, не связанного с внутренней структурой пленки. Наличие "внешнего" смещающего поля E_j , фиксируемого по смещению ПП по оси E при достаточно больших E_0 (рис. 3, 4), может быть объяснено в основном эффектами на границах раздела металл—СЭ пленка, а не дефектной структурой пленок ЦТС. Такие эффекты, связанные с явлениями приэлектродной поляризации, уже отмечались в ряде работ [2, 5—7] и объяснялись образованием в приэлектродных областях пленок ионного объемного заряда (вакансии кислорода и свинца) и/или наличием барьеров Шоттки в объеме СЭ материала и на границах раздела (различие в работах выхода для верхнего и нижнего электродов). Косвенным подтверждением существования таких образований могут быть результаты исследований фототока в пленках ЦТС [8, 9]. В то же время, как видно на рис. 2, 3, наличие внутреннего смещающего поля приводит к большим значениям "отрицательной" поляризации $P_0^-(E_0)$ (нижняя часть петель) по сравнению с "положительной" поляризацией $P_0^+(E_0)$ (верхняя часть петель) при равных E_0 .

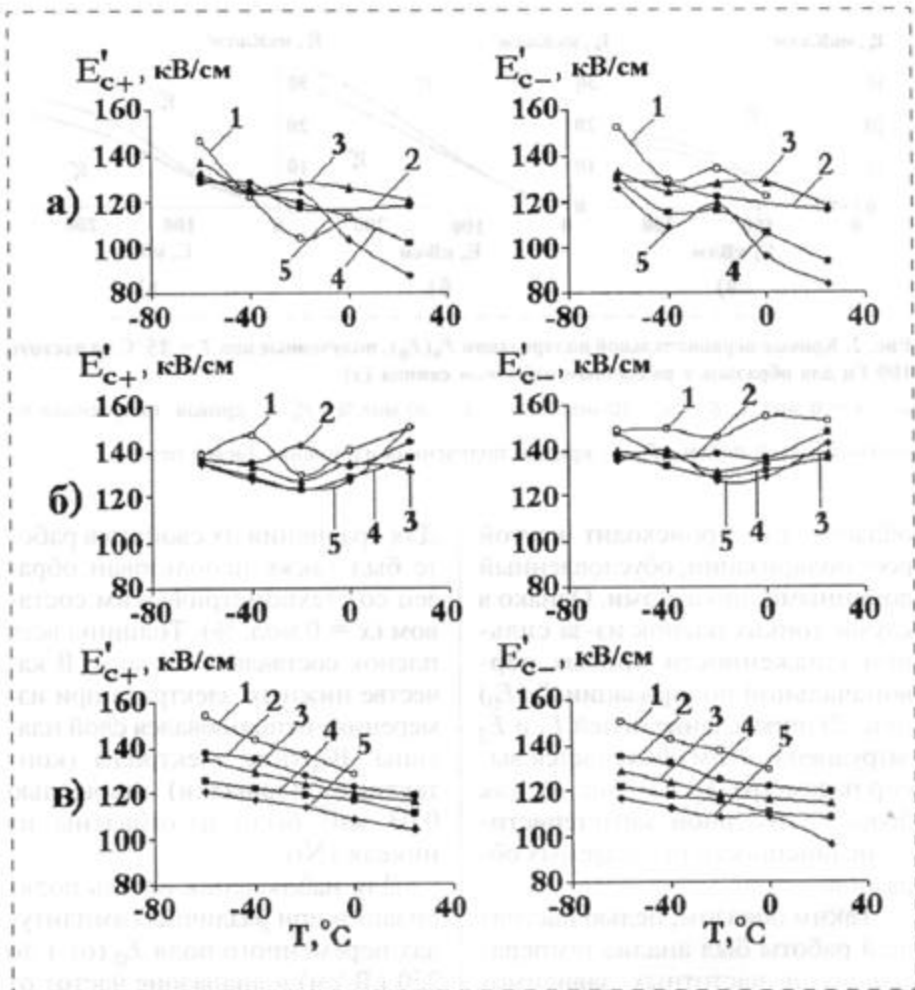


Рис. 5. Температурные зависимости параметра E'_c , полученные при различных частотах (Γ) измерительного поля: 1000 (1); 100 (2); 10 (3); 1 (4); 0,1 (5) для образцов с различным избытком свинца (x мол. %): а — 0; б — 10; в — 30; E'_c+ — оценка коэрцитивного поля по верхним частям ПП; E'_c- — оценка коэрцитивного поля по нижним частям ПП

На основе анализа полученных кривых $\epsilon'(E_0)$ были построены частотные и температурные зависимости параметра E'_c . На рис. 5 показаны зависимости $E'_c(T)$ для образцов с $x = 0, 10$ и 30 мол. % при различных частотах измерительного поля. Видно, что для пленок с $x = 0$ и 30 мол. % E'_c в основном уменьшается с ростом температуры. Такое поведение, как правило, характерно для температурных зависимостей коэрцитивного поля в объемных СЭ материалах и обычно связывается с тем, что при увеличении темпе-

ратуры облегчается процесс реполяризации доменов в объеме образца. Это говорит о том, что и в указанных пленках происходят аналогичные процессы. Однако ход $E'_c(T)$ в 10%-ном образце указывает на слабую зависимость E'_c от температуры (рис. 5, б). С температурными зависимостями E'_c в определенной степени коррелирует и поведение частотных зависимостей $E'_c(\nu)$, представленных на рис. 6. Здесь для ряда случаев характер поведения параметра E'_c схож с поведением

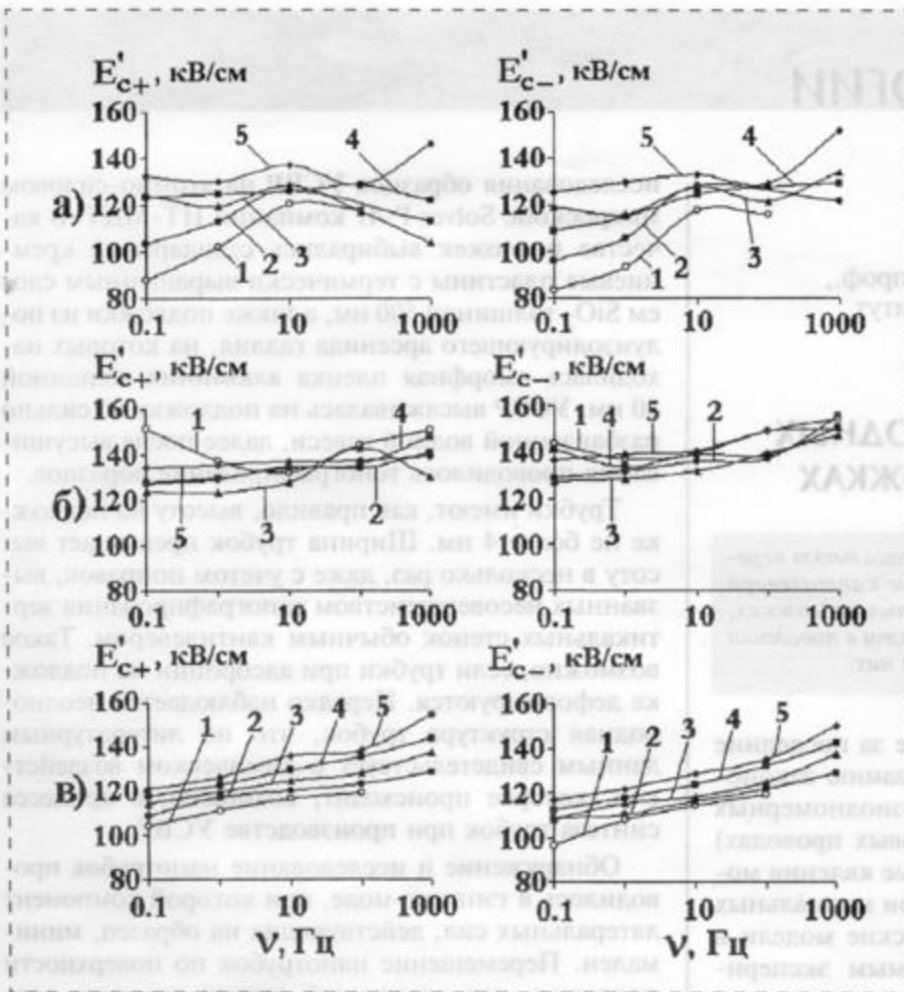


Рис. 6. Частотные зависимости параметра E'_c , полученные при различных температурах ($^{\circ}\text{C}$): 25 (1); 0 (2); -20 (3); -40 (4); -60 (5) для образцов с различным избытком свинца (x , мол. %): 0 (а); 10 (б); 30 (в); E'_{c+} — оценка коэцизитивного поля по верхним частям ПП; E'_{c-} — оценка коэцизитивного поля по нижним частям ПП

коэцизитивного поля в объемных СЭ материалах, когда E'_c увеличивается с ростом частоты измерительного поля. Поведение $E'_c(\nu)$ для образца с $x = 0$ мол. % (рис. 6, а) имеет явно релаксационную природу (см., например [10]).

Ранее в [4] было отмечено, что при высокотемпературной обработке пленок происходит потеря свинца (улетучивание паров PbO). Там же указывается на то, что введение в исходный пленкообразующий раствор 10 мол. % избытка свинца обеспечивает компенсацию возникающих потерь. Следовательно, образец с

$x = 10$ мол. % после отжига представляет собой систему, близкую к стехиометрической. Пленки же с $x = 0$ и 30 мол. % скорее всего будут структурами, содержащими достаточное число дефектов, которые могут влиять на процессы переполяризации в этих материалах, например, являясь центрами, взаимодействующими с доменными границами.

Сравнивая вид ПП для образцов с различными x (см. рис. 3) и кривые, представленные на рис. 5, 6, можно с достаточной степенью вероятности утверждать, что механизм доменной переполяризации образцов с $x = 0$ и 30 мол. % в основном ре-

лаксационный, а у образца с $x = 10$ мол. % — гистерезисный.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- приэлектродные поля в тонких пленках Ni/PZT/SiO₂/Pt могут играть роль "внешних" смещающих полей, не влияющих на механизмы переполяризации;
- избыток или недостаток свинца в пленкообразующем растворе приводит к образованию в сегнетоэлектрической пленке дефектов, которые, взаимодействуя с доменными границами, определяют преимущественный механизм переполяризации (либо гистерезисный, либо релаксационный).

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 02-02-16232).

Список литературы

1. Шильников А. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1987. 51. С. 1726.
2. Шильников А. В., Озарев И. В., Бурханов А. И., Нестеров В. Н., Сигов А. С., Воротилов К. А. // Изв. АН РАН Сер. физ. 2000. 64. С. 1239.
3. Дудкевич В. П., Фесенко Е. Г. Физика сегнетоэлектрических пленок. Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета. 1979.
4. Yanovskaya M. I., Obvintseva I. E., Solovyova L. I., Kovsman E. P., Vorotilov K. A. and Vasilyev V. A. // Integrated Ferroelectrics. 1998. 19. P. 193.
5. Ямаркин В. К., Зайцева Н. В., Штельмах С. В., Моторный А. В. // ФТТ. 1995. 37. С. 324.
6. Sungwon Jung, Jae Gab Lee and Jiyoung Kim // Journal of the Korean Physical Society. 1998. 32. P. 1710.
7. Афанасьев В. П., Мосина Г. Н., Петров А. А., Проини И. П., Сорокин Л. М., Тараканов Е. А. // Письма в ЖТФ. 2001. 27. С. 56.
8. Ямаркин В. К., Гольцман Б. М., Казанин М. М., Леманов В. В. // ФТТ. 2000. 42. С. 511.
9. Yang Y. S., Lee S. J., Yi S., Chae B. G., Lee S. H., Joo H. J., Jang M. S. // Appl. Phys. Lett. 2000. 76. P. 774.
10. Unruh H.-G., Mäser H. E. // Z. Angew. Phys. 1962. 14. P. 121.

НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.317

И. И. Бобринецкий,
В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
 Московский государственный институт
 электронной техники
 (технический университет)

МИКРОМЕХАНИКА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ПОДЛОЖКАХ

Продemonстрирована возможность локального перемещения нанотрубок с использованием кантилевера атомно-силового микроскопа на различных подложках, а также исследованы основные особенности в поведении нанотрубок при силовом воздействии на них.

Научные результаты, полученные за последние годы в разных странах, по исследованию закономерностей прохождения тока в квазиодномерных структурах (так называемых квантовых проводках) свидетельствуют о том, что квантовые явления могут вполне уверенно наблюдаться при нормальных температурах и развитые теоретические модели в основном соответствуют наблюдаемым экспериментальным данным. По существу подготовлена научная база для создания действующих макетов элементов и приборов нанoeлектроники [1].

Одно из направлений в создании элементной базы нанoeлектроники связывают с использованием синтетических нанотрубок как достаточно совершенных квантовых проводников. Для создания нанотранзисторов с углеродными нанотрубками необходимы владение технологией осаждения и перемещения нанотрубок по поверхности подложки к заданной паре электродов и умение создавать электрический контакт между электродами и нанотрубкой. Важно также овладеть технологией разрезания нанотрубок, их выпрямления и изгибания. По-видимому, одними из первых эти технологические приемы освоили специалисты компании IBM, которые в 1998 году продемонстрировали нанотранзистор с золотыми электродами и углеродной нанотрубкой [2]. Принцип работы такого транзистора напоминает работу классического триода, когда баллистический поток электронов управляется сеткой. При низких температурах такое устройство работает как одноэлектронный транзистор.

Нами исследуются нанотрубки, получаемые из углеродной смеси высокой реакционной способности (УСВР) [3]. Проводились топографические

исследования образцов УСВР на атомно-силовом микроскопе Solver P-47 компании НТ-МДТ. В качестве подложек выбирались стандартные кремниевые пластины с термически выращенным слоем SiO_2 толщиной 500 нм, а также подложки из полуизолирующего арсенида галлия, на которых находилась аморфная пленка алюминия толщиной 10 нм. УСВР высаживалась на подложку из сильно разбавленной водной взвеси, далее после высушивания проводилось топографирование образцов.

Трубки имеют, как правило, высоту на подложке не более 4 нм. Ширина трубок превышает высоту в несколько раз, даже с учетом поправок, вызванных несовершенством топографирования вертикальных стенок обычным кантилевером. Такое возможно, если трубки при адсорбции на подложке деформируются. Нередко наблюдается неоднородная структура трубок, что по литературным данным свидетельствует о химическом воздействии, которое происходит, возможно, в процессе синтеза трубок при производстве УСВР.

Обнаружение и исследование нанотрубок проводилось в тэппинг-моду, при которой компонент латеральных сил, действующих на образец, минимален. Перемещение нанотрубок по поверхности подложки, как следующей стадии создания элементной базы нанoeлектроники, осуществлялось в контактной моде. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) показаны последовательные стадии локального изгиба участка нанотрубки. При этом необходимо отметить достаточно высокую прочность углеродных нанотрубок при многократном их перемещении по поверхности подложки.

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) показана топография нанотрубки при вторичном изгибании. При возникновении больших внутренних механических напряжений в результате многократных изгибов нанотрубки могут закручиваться и прогибаться вертикально к подложке (на рис. 2, б показано образование "колена" нанотрубки, которое можно объяснить ее вертикальным изгибом).

Сила, которую нужно приложить к нанотрубке при ее перемещении, зависит от энергии связи углеродной решетки с подложкой. Адгезия между нанотрубкой и подложкой определяется короткодействующими химическими силами и дальнедействующими силами Ван-дер-Ваальса. Расчеты [4] показывают, что сила, необходимая для локального изгиба нанотрубок, имеет порядок нескольких десятков наноньютонов. Такие силы возникают между сверхострым зондом кантилевера и образ-

цом в контактном режиме. Однако в ряде случаев энергия связи атомов углерода с поверхностью подложки может превышать энергию связи в самой структуре, и при попытке перемещения трубки, может возникнуть разрыв углеродной трубки (рис. 3, см. третью сторону обложки). Для увеличения "подвижности" нанотрубок по поверхности подложек приходится повышать их температуру до 100 °С. Такая процедура необходима и для возможного испарения адсорбированного растворителя из полости трубок.

В целом, пока только удается сформулировать условия для микромеханического перемещения углеродных нанотрубок по поверхности подложек из конкретных материалов.

Работа ведется при поддержке НТП "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники" (проект ГР № 01200106723) и гранта по разделу "Электроника и информатика" № 270-ГБ-53-Гр-ЗМНТ.

Список литературы

1. Goldhaber-Gordon D., Montemerlo M. S., Love J. C. et al. Overview of nanoelectronic Devices // Proceedings of the IEEE. 1997, April.
2. Martel R., Schmit T., Shea H. R., Avouris Ph. Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors // Applied Physics Letters. 1998. Vol. 73. P. 2447–2452.
3. Минаев В. В., Неволин В. К., Петрик В. К. Нанотрубки из углеродной смеси высокой реакционной способности // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 41–42.
4. Hertel T., Martel R., Avouris Ph. Manipulation of individual carbon nanotubes and their interaction with surfaces // J. Phys. Chem. B. 1998. Vol. 102. P. 910–915.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 577.32

Н. Г. Рамбиди, д-р хим. наук, проф.,
Международный научно-исследовательский
институт проблем управления,
Физический факультет
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЭФФЕКТИВНОГО ВОПЛОЩЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ. КВАЗИБИОЛОГИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА

Рассмотрены основные принципы, определяющие обработку информации химическими (биомолекулярными) системами. Эти принципы включают в себя высокий параллелизм обработки информации, высокую сложность поведения системы, дополненность информационных характеристик, самоорганизацию и многоуровневую архитектуру. Химические устройства обработки информации, использующие эти принципы, могут эффективно решать задачи высокой вычислительной сложности.

1. Несколько исходных замечаний — парадигма фон Неймана и подход Мак Каллоха и Питтса

Нет, по-видимому, такой второй проблемы, которая была и остается до сих пор удивительно при-

влекательной для человека как реализация основных принципов обработки информации человеческим мозгом и воспроизведение его фантастических информационно-логических возможностей.

Первые реальные и, вообще говоря, достаточно робкие шаги в понимании и реализации "человекоподобных" информационно-логических систем были сделаны не так уж давно, когда в 1943 г. Мак Каллох и Питтс [1] сформулировали нейросетевые принципы обработки информации.

Сороковые годы были переломными в истории развития средств обработки информации. Именно тогда человечество столкнулось с необходимостью решения грандиозных технических и технологических проблем, которые были связаны с колоссальными потребностями в вычислениях. Предложенная в эти годы Джоном фон Нейманом парадигма, которая была заложена в основу конструирования цифровых ЭВМ, позволила создать в те годы эффективные вычислительные средства для решения наиболее насущных инженерных задач и бурно совершенствоваться их вплоть до настоящего времени. В основе успеха парадигмы фон Неймана лежало то, что она оказалась естественной для решения массовых вычислительных задач достаточно низкой вычислительной сложности, к которым сводились наиболее важные инженерные проблемы. Обсуждавшийся в те же сороковые годы "человекоподобный" стиль обработки информации — нейросетевой подход Мак Каллоха и Питтса [1] — оказался, в сущности, преждевременным, поскольку основ-

цом в контактном режиме. Однако в ряде случаев энергия связи атомов углерода с поверхностью подложки может превышать энергию связи в самой структуре, и при попытке перемещения трубки, может возникнуть разрыв углеродной трубки (рис. 3, см. третью сторону обложки). Для увеличения "подвижности" нанотрубок по поверхности подложек приходится повышать их температуру до 100 °С. Такая процедура необходима и для возможного испарения адсорбированного растворителя из полости трубок.

В целом, пока только удается сформулировать условия для микромеханического перемещения углеродных нанотрубок по поверхности подложек из конкретных материалов.

Работа ведется при поддержке НТП "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники" (проект ГР № 01200106723) и гранта по разделу "Электроника и информатика" № 270-ГБ-53-Гр-ЗМНТ.

Список литературы

1. Goldhaber-Gordon D., Montemerlo M. S., Love J. C. et al. Overview of nanoelectronic Devices // Proceedings of the IEEE. 1997, April.
2. Martel R., Schmit T., Shea H. R., Avouris Ph. Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors // Applied Physics Letters. 1998. Vol. 73. P. 2447–2452.
3. Минаев В. В., Неволли В. К., Петрик В. К. Нанотрубки из углеродной смеси высокой реакционной способности // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 41–42.
4. Hertel T., Martel R., Avouris Ph. Manipulation of individual carbon nanotubes and their interaction with surfaces // J. Phys. Chem. B. 1998. Vol. 102. P. 910–915.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 577.32

Н. Г. Рамбиди, д-р хим. наук, проф.,
Международный научно-исследовательский
институт проблем управления,
Физический факультет
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЭФФЕКТИВНОГО ВОПЛОЩЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ. КВАЗИБИОЛОГИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА

Рассмотрены основные принципы, определяющие обработку информации химическими (биомолекулярными) системами. Эти принципы включают в себя высокий параллелизм обработки информации, высокую сложность поведения системы, дополненность информационных характеристик, самоорганизацию и многоуровневую архитектуру. Химические устройства обработки информации, использующие эти принципы, могут эффективно решать задачи высокой вычислительной сложности.

1. Несколько исходных замечаний — парадигма фон Неймана и подход Мак Каллоха и Питтса

Нет, по-видимому, такой второй проблемы, которая была и остается до сих пор удивительно при-

влекательной для человека как реализация основных принципов обработки информации человеческим мозгом и воспроизведение его фантастических информационно-логических возможностей.

Первые реальные и, вообще говоря, достаточно робкие шаги в понимании и реализации "человекоподобных" информационно-логических систем были сделаны не так уж давно, когда в 1943 г. Мак Каллох и Питтс [1] сформулировали нейросетевые принципы обработки информации.

Сороковые годы были переломными в истории развития средств обработки информации. Именно тогда человечество столкнулось с необходимостью решения грандиозных технических и технологических проблем, которые были связаны с колоссальными потребностями в вычислениях. Предложенная в эти годы Джоном фон Нейманом парадигма, которая была заложена в основу конструирования цифровых ЭВМ, позволила создать в те годы эффективные вычислительные средства для решения наиболее насущных инженерных задач и бурно совершенствоваться их вплоть до настоящего времени. В основе успеха парадигмы фон Неймана лежало то, что она оказалась естественной для решения массовых вычислительных задач достаточно низкой вычислительной сложности, к которым сводились наиболее важные инженерные проблемы. Обсуждавшийся в те же сороковые годы "человекоподобный" стиль обработки информации — нейросетевой подход Мак Каллоха и Питтса [1] — оказался, в сущности, преждевременным, поскольку основ-

ные направления развития информационно-логических средств определялись инженерными и технологическими вычислительными задачами достаточно низкой вычислительной сложности.

Приоритеты развития человеческого общества изменялись на протяжении второй половины прошлого века. И, начиная с 80-х—90-х годов, становится все более и более актуальным понимание динамики больших систем и управления ими. Огромную важность приобрели экономические и социальные задачи, управление транспортными потоками, глобальная связь, предсказание погоды, оценка загрязнения окружающей среды и т. д. Именно они привели к необходимости разработки методов и средств решения задач высокой вычислительной сложности, которые нередко вызывают большие затруднения для современных фон-неймановских ЭВМ. В этом случае увеличение размера задачи приводит к многократному росту вычислительных ресурсов, необходимых для ее решения. Это, в свою очередь, вынуждает разработчиков вычислительных средств все более и более наращивать объем памяти и скорость выполнения элементарных операций.

Альтернативой этой гонки "вычислительная сложность задачи — производительность ЭВМ" явилось дальнейшее развитие идей Мак Каллоха и Питтса.

Исходные принципы подхода Мак Каллоха и Питтса фундаментально отличаются от основных принципов парадигмы фон Неймана. Прежде всего — это высокий параллелизм, многократно повышающий производительность системы обработки информации, и нелинейные механизмы, которые приводят к тому, что система может выполнять весьма сложные логические операции в качестве элементарных.

В силу практической не востребоваемости подход Мак Каллоха и Питтса развивался в 50-х—60-х годах в основном теоретиками, которые анализировали эффективность возможных вариантов построения нейронных сетей (см., например, [2]).

Практическая реализация нейросетевых устройств началась, в сущности, в 80-е годы (история создания нейрокомпьютеров детально изложена в [3]). Естественным было и то, что в силу грандиозных успехов производства цифровых ЭВМ эти устройства создавались на основе зарекомендовавшей себя планарной полупроводниковой схемотехники и технологии. Тем не менее, несмотря на целый ряд интересных и практически важных разработанных в те годы устройств, нейрокомпьютеры не вышли еще на уровень распространения, сходный с цифровыми фон-неймановскими компьютерами. В основе этого лежат, казалось бы, тех-

нические противоречия. Так, вызывают значительные трудности:

- реализация высокого параллелизма, которая наталкивается на "кошмар межсоединений";
- необходимость обучения нейронных сетей, чему мешает сложность реализации варьируемых весов нейронов.

Но, по-видимому, эти трудности носят более глубокий характер. Дискретные фон-неймановские устройства принципиально не способны к структурной адаптации и обучению [4]. В то же время нейросетевые устройства, по своей сущности, должны быть адаптивными, что реализуется переменными весами нейронов в модели Мак Каллоха и Питтса [1]. И эта способность к адаптации должна быть, по-видимому, заложена в принципах материального воплощения нейронных сетей.

Поэтому до сих пор не прекращаются попытки найти принципиально новые схемотехнические подходы, технологические варианты их реализации и материалы, которые позволили бы естественным образом воплотить концепцию нейронных сетей. Одно из направлений таких исследований — моделирование обработки информации молекулярными и простыми биологическими системами.

2. Молекулярные объекты как элементная база вычислительных устройств

Исследования в этой области в начале 70-х годов были вызваны трудностями становления полупроводниковой планарной технологии и надеждами на резкое повышение технических характеристик вычислительных устройств. Можно было предположить, что использование в качестве элементной базы молекулярных объектов, которые, как известно, могут переключаться из одного квантового состояния в другое, приведет к многократному росту степени микроминиатюризации и производительности вычислений (см., например, [5]).

Предполагалось, что по сравнению с полупроводниковой элементной базой молекулярные элементы могут обеспечить:

- более высокую степень интеграции;
- значительно меньшие энергии переключения;
- более высокую стабильность схем по отношению к проникающей радиации, особенно для схем высокой степени интеграции.

В качестве принципиально новых характеристик молекулярных схем рассматривались:

- полная идентичность молекулярных элементов, характеристики которых не подвержены разбросу из-за неминуемых технологических погрешностей;
- свободные от шумов одноэлектронные процессы;

- специфические молекулярные процессы передачи сигнала, которые могут позволить создавать логически более сложные исходные элементы.

Первая работа, в которой предлагалось использовать отдельные молекулы в качестве элементной базы электронных устройств, называлась "Молекулярный выпрямитель" [6]. Ее авторы Авирам и Ратнер предложили молекулярную систему, состоящую из двух фрагментов — акцептора электронов (тетрацианохинодиметана) и донора электронов (тетратиофульвалена), помещенных между двумя электродами. Для того чтобы такая молекула была устойчивой, необходимо было отделить донорную и акцепторную группировки друг от друга — ввести между ними углеводородную цепочку, соединяющую фрагменты. В результате электрон должен был переходить за счет однонаправленного туннелирования сквозь барьер-цепочку в направлении катод—акцептор—донор—анод.

Активность в этой новой области исследований была велика в 80-е годы и начале 90-х. Представление об этом могут дать материалы двух Международных конференций по молекулярным электронным устройствам, организованных Форрестом Картером — сотрудником Военно-морской исследовательской лаборатории США [7, 8], и последовавшей за ними (после смерти Картера) конференции, которая состоялась в июле 1988 г. [9]. Они оказались основой для объединения ученых, искавших пути использования молекулярных объектов для создания электронных устройств.

Тем не менее до сих пор реальные результаты этого направления сводятся скорее к теоретическому анализу возможностей использования тех или иных молекулярных объектов, чем к попыткам практической реализации устройств на их основе [10—14].

В то же время в ходе этих работ сделались понятными два принципиальных обстоятельства.

Во-первых, трудно ожидать, что малые молекулы, построенные из сравнительно небольшого числа атомов, окажутся в силу своей квантовой природы однозначно действующими переключателями, такими как аналогичные полупроводниковые устройства (см. [5] и ссылки к этой статье).

Во-вторых, стало очевидным, что трудности создания (синтеза) устройства, состоящего из десятков и даже сотен молекулярных фрагментов, оказываются фантастически велики. Более того, не были понятны даже подходы к тому, как определять работоспособность синтезированной системы.

В связи с этим отдельные молекулы, как исходные элементы для электронных устройств, до сих пор остаются скорее прекрасной мечтой, а не реальностью.

Но ансамбли молекул, обладающих определенными характеристиками, оказались привлекательными объектами для разработки устройств обработки и хранения информации. Впечатляющими примерами могут служить создание молекулярного постоянного запоминающего устройства [15] с емкостью памяти несколько сотен гигабитов на основе эффекта выжигания провалов в оптических спектрах органических соединений и разработка оперативных запоминающих устройств на основе белка бактериородопсина [16]. Эти работы показали, что химические среды могут быть использованы в вычислительных или запоминающих устройствах. В сущности это был переход от идеологии молекулярных устройств (т. е. систем, в которых элементной базой служат отдельные молекулы) к устройствам, построенным на основе химических сред, т. е. макрообъектов, сохраняющих в то же самое время преимущества молекулярных объектов.

3. Биомолекулярные среды как средство решения логически сложных задач

Практически одновременно с работой Авирама и Ратнера [6], Майкл Конрад [17] предложил в 1974 г. оригинальный вариант обработки информации молекулярными системами. Его концепция ферментативного нейрона была основана на непрерывных распределенных средах, обрабатывающих информацию. В отличие от фон-неймановских ЭВМ, в которых информация трансформируется последовательно отдельными элементарными устройствами компьютера, распределенные вычислительные (информационно-логические) среды являются высокопараллельными системами, выполняющими одни и те же операции в каждой точке среды одновременно (более точно — в малых объемах среды, размеры которых определяются ее динамикой (см. ниже)). Дальнейшее развитие и практическое воплощение идей Конрада [18—20] показало, что распределенные среды с нелинейной динамикой открывают новые возможности разработки информационно-логических устройств.

Этому способствовало и то, что за несколько последних десятилетий нейросетевой подход Мак Каллоха и Питтса превратился в развитую систему представлений, определяющих обработку информации биомолекулярными и простыми биологическими объектами — квазибиологическую парадигму [21]. Она основана на исходных принципах, развивающих и дополняющих представления Мак Каллоха и Питтса [1]. К ним относятся:

- гигантский параллелизм обработки информации молекулярными и простыми биологическими системами, который многократно превышает степень параллелизма, достигнутую при разработке современных вычислительных устройств;

- процессы распознавания на молекулярном уровне, обеспечивающие направленную передачу информации и исключают ее случайный поиск;
- сложные отклики системы на внешние стимулы, которые приводят к возможности резко увеличить логическую сложность элементарных операций, выполняющихся системой;
- уникальный характер хранения наследственной информации на молекулярном уровне, обеспечивающий ее сохранность и возможность ее воспроизведения и в то же время позволяющий модифицировать эту информацию в процессе эволюции системы, что приводит к ее адаптации к меняющимся внешним стимулам (т. е. к возможности обучения);
- и, наконец, естественная иерархическая организация процессов, на которых основана обработка информации и которая обеспечивает их высокую эффективность.

Эти принципы создают реальную основу для создания устройств, способных эффективно решать задачи высокой вычислительной сложности.

Рассмотренные выше основные этапы развития вычислительных устройств показывают, насколько важным фактором этого развития была вычислительная сложность задач, наиболее актуальных во второй половине XX века. Для того чтобы сделать более ясными отдельные аспекты создания биомолекулярных информационно-логических устройств, сделаем несколько замечаний по поводу современного понимания понятия "сложность".

Используются в основном три аспекта понятия "сложность":

- структурная сложность (статическая), т. е. сложность построения системы;
- поведенческая сложность (динамическая), которая определяет пространственно-временную эволюцию системы, выполняющей операции обработки информации;
- вычислительная сложность используемой системой алгоритма (сложность управления), описывающего последовательно выполняемые операции обработки информации.

В настоящее время используются различные подходы [22] к количественному определению структурной и поведенческой сложности. Понятие алгоритмической сложности оказывается, по-видимому, наиболее адекватным описанию этих характеристик.

Вычислительная сложность алгоритма, представляющего поведение системы (сложность проблемы), характеризует практическую возможность понять детально поведение системы [22]. Она может быть сведена к зависимости вычислительных возможностей (ресурсов вычислительной системы), необходимых для моделирования поведения системы, от специфической характеристики задачи — размера проблемы.

Говоря о структурной и поведенческой сложности системы обработки информации и вычислительной

сложности решаемых этой системой задач, следует подчеркнуть, что в настоящее время не удается установить достаточно строгой корреляции между этими характеристиками.

Нередко принимается (в основном в связи с практикой создания радиотехнических устройств), что повышение структурной сложности ведет к усложнению ее поведения. Тем не менее сегодня известно большое число объектов, в которых простая структура сосуществует с очень сложным поведением. Наиболее известный пример — задача Хенона [23], т. е. динамика двух гармонических осцилляторов с нелинейной связью. Эта система демонстрирует целую совокупность различных режимов, начиная с тривиальных гармонических колебаний и кончая состоянием хаоса.

Еще более неопределенной оказывается связь между вычислительной сложностью задач и структурой используемого для ее решения устройства.

Поэтому конструирование систем, способных эффективно решать задачи высокой вычислительной сложности, наталкивается на отсутствие теоретических основ, позволяющих очертить пути их решения.

По-видимому, одна из наиболее перспективных возможностей найти конструктивные принципы создания биомолекулярных устройств — эвристические подходы. В частности, можно исходить из того, что биомолекулярные и биологические объекты, способные эффективно выполнять операции высокой вычислительной сложности, как правило, обладают высокой сложностью поведения. В качестве примеров можно назвать феномен человеческого зрения [26] или же процесс репликации РНК [25] (см. ниже).

Определим, исходя из этого, в качестве основного постулата, на котором будет основан поиск конструктивных принципов создания биомолекулярных устройств для эффективного решения логически сложных задач, необходимость высокой поведенческой сложности устройства.

Оставаясь на позициях введенного основного постулата, проблема конструирования эффективных устройств для решения задач высокой вычислительной сложности переходит в проблему поиска принципов построения систем, в которых проявляется высокая поведенческая сложность. Не претендуя на окончательное решение этой новой проблемы и исходя из эвристических соображений, выберем в качестве основных принципов следующие:

- распределенный характер системы;
- сложность ее динамики;
- многоуровневая архитектура системы.

Ниже будет сделана попытка показать, что последовательное использование этих принципов приводит к новой совокупности представлений, принципиально отличной от парадигмы фон Неймана и оптимальной для решения задач высокой вычислительной сложности.

4. Основные принципы построения биомолекулярных устройств обработки информации

4.1. Распределенные биомолекулярные системы

Очень высокая (гигантская) степень параллелизма характерна для процессов, протекающих в биомолекулярных и биологических распределенных системах. Так, например, лимфоциты, охраняющие кровеносную систему от чужеродных, опасных для организма объектов, действуют по сложной программе, выполняющейся всеми лимфоцитами организма одновременно. Эта программа включает в себя распознавание чужеродного объекта (операция "свой—чужой"), принятие решения на его уничтожение и ликвидация, если необходимо, объекта совокупностью лимфоцитов в соответствии с заложенными в систему критериями.

В однородных распределенных биомолекулярных (химических и биохимических) системах характерные для системы процессы протекают одновременно во всех точках системы.

Как известно [26], динамика большого класса распределенных систем описывается так называемыми реакционно-диффузионными уравнениями

$$\dot{U}_i(r, t) = F[U_1(r, t), U_2(r, t), \dots, U_N(r, t)] + \sum_{j=1}^N \Delta [D_{ij} U_j(r, t)]. \quad (1)$$

Здесь $F[U_1(r, t), U_2(r, t), \dots, U_N(r, t)]$ описывает кинетику протекающих в системе пространственно-временных процессов; D_{ij} — коэффициенты диффузии компонентов системы.

Динамика фрагментов системы существенно изменяется, когда линейные размеры фрагмента сравнимы с диффузионной длиной l_D . Эта величина определяется как

$$l_D = (DT)^{1/2},$$

где T — характеристическое время процесса, протекающего в системе; D — средний коэффициент диффузии.

Если размеры фрагмента меньше, чем диффузионная длина, внутри него происходит полное перемешивание компонентов и динамика внутри фрагмента определяется системой уравнений

$$\dot{U}_i(r, t) = F[U_1(r, t), U_2(r, t), \dots, U_N(r, t)]. \quad (2)$$

Таким образом, под "точкой" в однородной распределенной системе следует понимать ее фрагменты, сравнимые по своим линейным размерам с диффузионной длиной.

Даже простейшие распределенные химические системы демонстрируют высокую степень параллелизма. Рассмотрим только один наиболее примитивный, но достаточно впечатляющий пример.

Пусть имеется плоский тонкий слой химического реагента, превращения компонентов которо-

го могут быть адекватны выбранной информационной задаче. Эти химические процессы будут протекать во всех точках среды одновременно.

Предположим, что размеры слоя реагента — 10×10 см и разрешение среды составляет 0,1 мм. Нетрудно видеть, что в этом случае степень параллелизма составляет 10^6 .

Степень параллелизма многократно увеличивается, если химическая или биохимическая система содержит несколько компонентов, на основе которых в системе могут одновременно протекать различные химические реакции.

4.2. Сложная динамика системы

Говоря о сложности биомолекулярной информационно-логической системы, обычно подразумевают ее поведенческую сложность, т. е. разнообразие динамических режимов, адекватных операциям обработки информации. В свою очередь, в основе этих режимов лежат определенные физические механизмы.

В настоящее время известны по крайней мере два типа механизмов, которые приводят к высокой сложности поведения системы: распознавание на молекулярном уровне и нелинейная кинетика протекающих в системе процессов.

Распознавание на молекулярном уровне. Это свойство характерно для белков-ферментов, катализирующих биохимические реакции [25]. В основе его лежит структурная нежесткость молекулярного остова фермента, т. е. легкость его структурной перестройки, в сочетании с принципом "ключ—замок", когда молекула фермента захватывает из своего окружения наиболее совпадающую по форме с активным участком фермента молекулу.

В качестве более конкретного примера можно привести процесс передачи генетической информации от молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) к молекуле рибонуклеиновой кислоты (РНК) [25]. Этот процесс катализируется ферментом ДНК зависима РНК полимеразы. Фермент присоединяется к цепи ДНК и после определения начала транскрипции выполняет последовательно, шаг за шагом, следующие операции:

- распознавание, какое основание (аденин, цитозин, гуанин или тимин) отвечает выбранному местоположению фермента на цепи ДНК;
- поиск в окружении фермента (растворе) и захват аналогичного основания;
- присоединение этого основания к синтезируемой цепи РНК;
- переход фермента к следующему в цепи ДНК основанию.

Отметим некоторые специфические особенности этого процесса. Присоединение очередного основания к цепи РНК следует, по-видимому, рас-

смаивать как элементарную операцию фермента. Конечно, эту операцию можно искусственно разбить на некоторые предполагаемые стадии, рассмотренные выше. Тем не менее на практике в процессе присоединения очередного основания к цепи РНК не представляется возможным разделить каким-либо образом этот процесс на стадии.

Время этой элементарной операции оказывается достаточно большим (порядка 0,1 мс). Но при этом нужно иметь в виду, что эта элементарная операция эквивалентна сотням элементарных операций цифрового фон-неймановского компьютера.

Нелинейные механизмы химических реакций.

Вторым физическим механизмом, который приводит к сложному поведению распределенной химической или биохимической системы является нелинейная кинетика протекающих в системе реакций.

Вернемся к реакционно-диффузионным уравнениям (1), описывающим динамику распределенной системы, и будем рассматривать простейший пример — плоский квазидвумерный слой такой среды.

Можно показать [27], что качественно эту систему можно рассматривать как реализацию нейронной сети, которая характеризуется следующим:

- каждый элементарный объем среды (с линейными размерами, меньшими диффузионной длины) можно рассматривать как элементарный процессор;
- динамика этих процессоров и выполняемые операции определяются нелинейной кинетикой протекающих в микрообъеме реакций (2);
- процессы, протекающие в микрообъемах, связаны короткодействующими (диффузионными) взаимодействиями, что приводит к сложному поведению системы, описываемому уравнением (1). Точнее, каждый микрообъем связан диффузией с любым другим микрообъемом среды. Но, в силу малой скорости диффузии, взаимодействие объемов происходит с задержкой и ослаблением, пропорциональными расстоянию между ними.

В зависимости от состояния среды (концентрации компонентов реакции и температуры) и внешнего возбуждения система, описываемая реакционно-диффузионными уравнениями (1), может функционировать в различных динамических режимах.

В общем случае однородные распределенные нейронные сети описываются системой интегродифференциальных уравнений [28]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_i(r, t) &= -\frac{U_i(r, t)}{t_i} + G[-T_i - A + Z_i] = \\ &= -\frac{U_i(r, t)}{t_i} + G\left\{-T_i - A + \right. \\ &\left. + \sum_{m=1}^N \int \Phi_m[r, x, t, U_1, U_2, \dots, U_N] U_m(r, t) dx \right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

где $U_i(r, t)$ — концентрация i -го компонента реакции, протекающей в системе; A — управляющий параметр; $G[-T_i - A + Z_i]$ — функция отклика j -го элемента на возбуждение Z_j ; T_i — сдвиг функции G ; Φ_m — функция пространственной связи между активными элементами.

Эти уравнения в общем случае не могут быть сведены к реакционно-диффузионным уравнениям (1). Тем не менее при некоторых, не очень жестких предположениях модели (1) и (3) оказываются адекватными [34].

Сложное поведение, которое определяется нелинейными динамическими механизмами, характерно для биомолекулярных и простых биологических систем на разных уровнях организации.

Динамические режимы проявляются в процессах роста колоний одноклеточных микроорганизмов, приводя к возникновению концентрических круговых и спиральных образований (например, в случае *DICTYOSTELLUM DISCOIDEUM* [29] и *SALMONELLA TYPHIMURIUM* [30]).

На уровне тканей организма известны, например, волновые процессы, протекающие в коре головного мозга. Нарушение сердечных ритмов и феномен "внезапной смерти" возникают в результате патологических волновых режимов в миокарде [31].

Широко известны режимы концентрационных колебаний в химических и биохимических системах, в биологических мембранах и клетках, т. е. на супермолекулярном уровне [32].

И, наконец, нелинейная динамика может приводить к коллективным возбуждениям в биомолекулах (солитоноподобным волнам), т. е. на молекулярном уровне [33].

Замечательным свойством нелинейных процессов, протекающих в химических, биохимических и простых биологических системах, является то, что независимо от физического воплощения для всех нелинейных систем характерны одни и те же динамические режимы:

- концентрационные колебания;
- распространение концентрационных импульсов;
- триггерные режимы пространственного распространения переключения одного состояния системы в другое;
- образование устойчивых, стабильных во времени диссипативных структур с неоднородным распределением концентраций компонентов.

Схожесть динамических режимов систем, различных по своему физическому воплощению, открывает широкие возможности их моделирования, например, моделирования процессов, протекающих в биологических системах, с использованием существенно более простых и удобных для экспериментального изучения химических сред.

Процессы самоорганизации. Процессы самоорганизации на молекулярном уровне — один из эффективных и, по-видимому, наиболее важных ме-

ханизмов формирования биомолекулярных систем с высокой поведенческой сложностью [23]. Более того, это не только средство формирования системы, но и один из нетрадиционных механизмов обработки информации.

Рассматривая связь процессов обработки информации и самоорганизации в биологических системах, Конрад [34] указал три аспекта процессов самоорганизации: алгоритмический, эволюционный и динамический.

Он отмечал, что в сущности процессы цифровой обработки информации и направленной эволюции информационной системы являются, вообще говоря, двумя формами решения задач. Первая из них может быть определена как алгоритмическая, а вторая — как эволюционная адаптация. Термин "алгоритмическая" подчеркивает, что система использует для решения задачи некоторый набор правил. Термин "эволюционное" означает, что в процессе решения задачи система претерпевает структурные изменения, достаточно существенные для того, чтобы изменить правила, по которым она действует. Эти формы не являются в корне противоположными друг другу. Они представляют собой скорее две основные альтернативы, отвечающие фон-неймановскому компьютеру и биологическому объекту. На практике эти формы нередко сосуществуют, что позволяет создавать рукотворные системы обработки информации, способные к адаптации и обучению.

Говоря о процессах самоорганизации, необходимо более точно определить, что же следует понимать под ними и какова их роль в обработке информации.

Нередко в современной литературе можно столкнуться с мнением о том, что синтез молекулярных фрагментов, способных самопроизвольно объединяться друг с другом, — это путь создания устройства, который исключает колоссально сложные и трудоемкие процессы его традиционного химического синтеза. Иными словами, процесс самоорганизации сводится как бы к процессу "кристаллизации" молекулярных фрагментов. И основная задача заключается в том, чтобы понять, какова должна быть структура этих фрагментов и найти методики их синтеза.

Действительно, хорошо известны процессы самопроизвольного образования таких крупных молекулярных агрегатов, как мицеллы, везикулы, бислои. Более того, известно также, что ассоциация молекул белка тубулина приводит к динамическим процессам формирования и функционирования микротрубочек, играющих важную роль в архитектуре живой клетки. Можно привести и ряд других примеров.

Тем не менее всем этим молекулярным формированиям присуща достаточно высокая степень пространственной симметрии, хотя бы на локальном уровне. В то же время, биологические системы, способные выполнять операции высокой вычислительной сложности, как известно, не обладают существенной пространственной симметрией. Это подчеркивал еще Шредингер в своей широко известной книге "Что такое жизнь с точки зрения физики?", вводя понятие аperiodического твердого тела применительно к архитектуре хромосомы.

Все, что здесь сказано, можно проиллюстрировать одним очевидным примером. Невозможно ожидать, что будет сформирована колония живых микроорганизмов, если просто смешать в реакционном сосуде все молекулярные компоненты живой клетки в соотношениях, точно соответствующих этим клеткам.

В чем же тогда заключаются пути использования принципов самоорганизации?

Прежде всего, в их динамических аспектах. Ниже будет показано, что в химических системах с нелинейной кинетикой динамическая самоорганизация нарушает пространственную симметрию и превращает пространственно однородные системы в стационарные пространственно неоднородные, способные выполнять операции обработки информации.

В общем случае реальное использование процессов самоорганизации для формирования биомолекулярных устройств должно, по-видимому, включать в себя разработку лабораторной техники, сходной с процессами естественного отбора. Именно отбор в процессе эволюции привел к существующим сегодня сложным биологическим объектам, эффективно решающим задачи высокой вычислительной сложности. И, несмотря на это, осознанное понимание необходимости разработки таких путей формирования биомолекулярных устройств находится в настоящее время на зачаточном уровне.

Дополнительность информационных характеристик, концепция индивидуальной вычислительной машины. Одна из наиболее важных особенностей сложных систем, необходимая для понимания их поведения, заключается в проявлении дополнительности характеристик системы.

М. Конрад [35], рассматривая общие принципы обработки информации биомолекулярными системами, пришел к выводу о существовании некоторых ограничивающих связей, которые впервые были определены им следующим образом: "Система не может быть в одно и то же время эффективно программируемой, способной к эволюции за счет ее изменчивости и селекции и вычислительно эффективной."

Позже Конрад [36] дополнил это аксиоматическое утверждение следующими соображениями:

- универсальная программируемая система не может быть способной решать любую проблему так же эффективно, как система, сконструированная специально для ее решения;
- жесткая программа подразумевает последовательное выполнение операций, т. е. не эффективное использование вычислительных ресурсов;
- программа разрушается, если в нее ввести извне случайные изменения; поэтому программируемая система не позволяет вносить в нее шаг за шагом малые изменения и постепенно менять ее структуру.

Дальнейшим развитием этих представлений была концепция индивидуальной вычислительной машины, предложенная Заунером и Конрадом [37], т. е. вычислительного устройства, сконструированного специально для наиболее эффективного решения определенной конкретной задачи. В некоторой степени индивидуальная машина является обобщением специализированных цифровых и аналоговых процессоров, широко применяемых в системах управления. Но при этом концепция Заунера и Конрада [37] рассматривает общие принципы построения устройств обработки информации, не связанные с выбором физической реализации устройства.

Согласно Заунеру и Конраду [37], индивидуальная машина является противоположностью универсальному компьютеру, т. е. устройством, в котором решение конкретной проблемы закодировано в его структуре, а не определяется программой, вводимой извне. В отличие от аналогового вычислителя, понятие индивидуальной машины распространяется и на устройства, которые формально не являются моделью изучаемой системы, но в то же время выполняют присущие этой системе функции. Так, например, распределенные химические нелинейные системы, не являясь формально моделями зрительного процесса, выполняют операции обработки изображений.

Для индивидуальной машины характерны две основные особенности:

- физическая структура машины определяет решение конкретной задачи;
- временная эволюция машины после ввода управляющих стимулов ведет к состоянию или структуре, которые могут быть интерпретированы как решение искомой задачи.

Химические, биохимические и простые биологические распределенные системы являются индивидуальными машинами. Решение выбранной задачи определяется в этом случае состоянием среды (относительные концентрации компонен-

тов, температура) и совокупностью управляющих воздействий.

Нужно все же отметить, что, вообще говоря, граница между универсальным компьютером и индивидуальной машиной может быть достаточно размытой.

Можно сконструировать, например, индивидуальную машину, в которой после завершения процесса решения задачи будет воспроизводиться ее начальное состояние и которая может быть использована поэтому для повторного решения аналогичной задачи. Более того, изменяя состояние среды и(или) ее температуру, можно перепрограммировать индивидуальную машину, сконструированную для решения некоторой конкретной задачи, на решение другой задачи. Тем не менее во всех таких случаях остается неизменным основное отличие индивидуальной машины от универсального компьютера. Универсальный компьютер после перепрограммирования (ввода новой программы) остается самим собой, т. е. его структура не меняется. Индивидуальная машина в результате перепрограммирования на решение новой задачи становится другой машиной с новой структурой.

4.3. Иерархический характер обработки информации

Замечательной особенностью биомолекулярных и биологических систем является высокая эффективность обработки ими информации. Один из наиболее важных факторов, определяющих высокую эффективность, заключается в естественной иерархической организации динамики системы, которая нередко приводит к структурной многоуровневой архитектуре.

Системы с иерархической организацией можно условно разделить на два основных класса:

- пространственно разделенные;
- пространственно совмещенные.

Живая клетка представляет собой яркий пример пространственно разделенной системы. Ее отдельные фрагменты — органеллы — выполняют свои специфические функции, связанные друг с другом в процессе жизнедеятельности клетки.

Примером пространственно совмещенной системы может служить, в частности, биохимический процесс гликолиза, когда в одном пространственном объеме протекают сложные совокупности связанных друг с другом групп реакций.

Теоретические основы понимания многоуровневого характера обработки информации были заложены Николисом с сотрудниками (см., например, [38]). Не останавливаясь подробно на их изложении, отметим только, что эффективная обработка информации должна быть основана на некоторых "правилах" (т. е. механизмах динамики

систем), которые генерируют информацию на некотором иерархическом уровне системы и сжимают ее при передаче на следующий уровень. Иными словами, аттракторы некоторого уровня являются исходной информацией для следующего. Для того чтобы это было возможно, система на рассматриваемом уровне должна обладать способностью изменяться под воздействием управляющих и случайных факторов и в то же время находить и исправлять ошибки, возникающие в процессе эволюции системы. Для этого система должна обладать памятью.

Николис отмечал [38], что динамические системы, описываемые по меньшей мере тремя дифференциальными уравнениями первого порядка, удовлетворяют этим требованиям. К ним принадлежит значительное число химических, биохимических и простых биологических реакционно-диффузионных систем.

5. Квазибиологическая парадигма обработки информации — что же дальше?

Предыдущие параграфы являются попыткой сформулировать современное понимание квазибиологической парадигмы обработки информации, т. е. основных принципов обработки информации биомолекулярными системами и путей реализации этих принципов в информационно-логических системах.

Следует отметить, что это понимание во многом обязано ряду экспериментальных работ, в результате которых было показано, что модельные устройства на основе химических реакционно-диффузионных сред способны эффективно выполнять операции обработки изображений [27, 39], находить кратчайший путь в лабиринте [40, 41], распознавать последовательности чисел [42].

Однако нужно подчеркнуть, что сравнивая принципы и, главное, реальные возможности фоннеймановской и квазибиологической парадигм, необходимо принимать во внимание историческое различие между ними.

Парадигма фон Неймана является основой создания и развития подавляющего большинства современных средств обработки информации. Она, несомненно, оптимальна, когда речь идет о решении массовых задач достаточно низкой вычислительной сложности. Более того, возможности совершенствования средств обработки информации на основе этой парадигмы далеко еще не исчерпаны.

Квазибиологическая парадигма как бы проснулась недавно после долгой спячки. После многих лет постепенного развития теоретических основ в последние годы резко возросло число удачных практических реализаций нейросетевых устройств.

Квазибиологическая парадигма сегодня по своему содержанию и возможным приложениям зна-

чительно богаче, чем первоначальный подход Мак Каллоха и Питтса [1]. Она находится в процессе интенсивного развития и изучения возможностей создания на ее основе эффективных средств обработки информации.

Детальный анализ созданных в последние годы реакционно-диффузионных средств обработки информации позволяет оценить их реальную практическую ценность, которая, к сожалению, пока еще не очень высока. Но в то же время изучение этих работ показывает, насколько робко используются до сих пор принципы квазибиологической парадигмы.

Несмотря на то, что совокупность этих принципов известна, не было еще ни одной экспериментальной работы, в которой все они совместно использовались бы для создания хотя бы лабораторного информационно-логического устройства. По-видимому, это объясняется двумя основными причинами.

Во-первых, необходимо некоторое время для того, чтобы абстрактные принципы сделались бы реальным руководством к действию. Обычно все новые идеи проходят через период привыкания к ним. И только после этого они становятся естественным инструментом для разработчиков.

Во-вторых, практическое использование этих принципов связано с преодолением значительных экспериментальных трудностей. Так, например, на протяжении десятков лет ежегодно публикуется большое число работ, посвященных экспериментальному изучению различных динамических режимов нелинейных химических сред (химических осцилляторов). Но только сравнительно недавно была разработана техника, позволяющая однозначно возбудить заранее заданный динамический режим и достоверно зарегистрировать эволюцию введенных в среду данных.

Рассмотренные соображения приводят к выводу о том, что дальнейшее совершенствование теоретических основ и экспериментальной техники квазибиологической парадигмы может привести к появлению новой ветви информационно-логических устройств, способных эффективно решать задачи высокой вычислительной сложности. Они будут не конкурировать с цифровыми ЭВМ, а скорее дополнять их, существенно расширяя границы "индустрии информации".

Хотелось бы отметить и еще один путь возможного использования рассматриваемых представлений. В конце 2001 г. на Международном симпозиуме по нелинейной теории и ее применениям (NOLTA 2001) [43] был представлен доклад Нишимия, Синаяма, Асаи и Амеция "Реакционно-диффузионный чип с функциями клеточного автомата". Доклад был посвящен разработке интегральной схемы, имитирующей режимы химических ре-

акционно-диффузионных сред. Это направление может привести, по-видимому, к созданию полупроводниковых специализированных процессоров, способных эффективно решать индивидуальные логически сложные задачи.

Список литературы

1. McCulloch W. J., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // *Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1943. N 5. P. 115—133.
2. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей // ИПРЖР, 2000.
3. Галушкин А. И., Цыпкин Я. З. История развития нейрокомпьютеров // ИПРЖР, 2000.
4. Рамбиди Н. Г. Перспективы развития нейросетевых парадигм на основе молекулярных объектов // *Микросистемная техника*. 2002. № 3.
5. Rambidi N. G., Chernavskii D. S., Krinsky V. I. Information processing and computing devices based on biomolecular nonlinear dynamic systems, in *Molecular Electronics and Molecular Electronic Devices* / K. Sienicki, Ed. // CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, 1993. P. 85—153.
6. Aviram A., Ratner M. A. *Molecular rectifiers* // *Chem. Phys. Lett.* 1974. 29. P. 277—283.
7. *Molecular Electronic Devices* / Forrest L. Carter (Ed.), Marcel Dekker, Inc., New York and Basel. 1982.
8. *Molecular Electronic Devices II* / Forrest L. Carter, (Ed.), Marcel Dekker, Inc., New York and Basel. 1987.
9. *Molecular Electronics, Biosensors and Biocomputers* // Plenum Press, New York and London. 1989.
10. Mirkin Ch. A., Ratner M. A. Molecular electronics // *Ann. Rev. Phys. Chem.* 1992. 43. P. 719—754.
11. Metzger R. M. Electrical Rectification by a Molecule: The Advent of Unimolecular Electronic Devices // *Acc. Chem. Res.* 1999. 32. P. 950—957.
12. Pease A. R., Jeppesen J. O., Stoddart J. F., Yi Luo, Collier C. P., Heath J. R. Switching Devices Based on Interlocked Molecules // *Acc. Chem. Res.* 2001. 34. P. 433—444.
13. Fabbrizzi L., Licchelli M., Pallavicini P. Transition Metals as Switches // *Acc. Chem. Res.* 1999. 32. P. 846—853.
14. Feringa B. L. In Control of Motion: From Molecular Switches to Molecular Motors // *Acc. Chem. Res.* 2001. 34. P. 504—513.
15. Moerner W. E. Molecular electronics for frequency domain optical storage: persistent spectral hole burning — a review // *J. Molec. Electron.* 1985. 1. P. 55.
16. Birge R. R. Protein-Based Optical Computing and Memories // *Computer*. 1992. 25. P. 56—67.
17. Conrad M. Molecular information processing in the central nervous system. Part I. Selection circuits in the brain // *Lecture Notes in Biomathematics, Physics and Mathematics of Nervous System*, Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York, 1974. P. 82—127.
18. Conrad M., Kampfner R. R., Kirby K. G., Rizki E. N., Schleis G., Smalz R., Trenary R. Towards an artificial brain // *BioSystems*. 23. 1989. P. 175—218.
19. Chen Jong-Chen, Conrad M. Learning synergy in a multilevel neuronal architecture // *BioSystems*. 1994. 32. P. 111—142.
20. Chen Jong-Chen, Conrad M. A multilevel neuromolecular architecture that uses the extradimensional bypass principle to facilitate evolutionary learning // *Physica D*, 1994. 75. P. 417—437.
21. Rambidi N. G. Biomolecular computer: roots and promises // *BioSystems*. 1997. 44. P. 1—15.
22. Юдин Д. Б., Юдин А. Д. Число и мысль. М.: Знание, 1985. С. 26—35.
23. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988.
24. Мэпп Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. М.: Радио и связь, 1987.
25. Bennett Ch. H. The thermodynamics of computations — a review, *Int // J. Theor. Phys.* 1982. 21. P. 905—940.
26. Филд Р., Бургрер М. Колебания и бегущие волны в химических системах М.: Мир. 1988.
27. Rambidi N. G., Maximychev A. V. Towards a biomolecular computer. Information processing capabilities of biomolecular nonlinear dynamic media // *BioSystems*. 1997. 41. P. 195—211.
28. Мастеров А. В., Рабинович М. И., Толков В. Н., Яхню В. Г. Исследование режимов взаимодействия автоволн и автоструктур в нейроподобных средах // *Коллективная динамика возмущений и структурообразование в биологических тканях*. Горький: ИПФ АН СССР, 1988.
29. Newell P. C. Aggregation and Cell Surface Receptors in cellular Slime Molds in *Microbial Interaction. Receptors and Recognition*, Series B. / Reissing J. L., (Ed.), Chapman and Hall. 1977.
30. Woodward D. E., Tyson R., Myerscough M. R., Murry J. D., Budrene E. O. and Berg H. C. SpatioTemporal Patterns Generated by Salmonella Typhimurium // *Biophys. J.* 1995. 68. P. 2181—2189.
31. Winfree A. T. Electrical turbulence in three-dimensional heart muscle // *Science*. 1994. 266. P. 1003—1006.
32. Goldbeter A. *Biochemical Oscillations and Cellular Rhythms*. Cambridge: Cambridge University Press. 1997.
33. Давыдов А. С. Солитоны в молекулярных системах. Киев: Наукова Думка. 1984.
34. Conrad M. Speedup of Self-Organization Through Quantum Mechanical Parallelism // *Springer Series in Synergetics*. V. 63. On Self-Organization, Mishra R. K., Maass D., Zwirolein E., (Eds.), Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg. 1994.
35. Conrad M. On design principles for a molecular computer // *Communication of ACM*. 1985. 28. P. 464—480.
36. Conrad M. The price of Programmability. The Universal Turing Machine. A Half-Century Survey, Verlag Kammerer and Unverzagt, Hamburg-Berlin. 1988.
37. Zauner K. P., Conrad M. Parallel computing with DNA: toward the anti-universal machine // *4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*. Berlin, Germany. 1996.
38. Николис Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. М.: Мир. 1989.
39. Kuhnert L., Agladze K. I., Krinsky V. I. Image processing using light-sensitive chemical waves // *Nature*. 337. 1989. P. 244—247.
40. Steinbock O., Toth A., Showalter K. Navigation complex labyrinths: optimal paths from chemical waves // *Science*. 1995. 267. P. 868—871.
41. Rambidi N. G., Yakovenchuk D. Chemical reaction — diffusion implementation of finding the shortest paths in a labyrinth // *Phys. Rev. E* 63, 026607. 2001.
42. Laplante J.-P., Pemberton M., Hjelmfelt A., Ross J. Experiments on pattern recognition by chemical kinetics // *J. Phys. Chem.* 1995. 99. P. 10063—10065.
43. http://www.nakajima.riec.tohoku.ac.jp/nolta2001/nolta2001_home.html

УДК 577.113.3

В. В. Власов, акад. РАН,
В. Ф. Зарыгова, д-р хим. наук,
А. С. Левина, канд. хим. наук,
 Институт биоорганической химии СО РАН,
 Новосибирск,
В. Н. Федоринин, канд. техн. наук,
 Конструкторский технологический институт
 прикладной микроэлектроники СО РАН,
 Новосибирск

РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ГИБРИДИЗАЦИИ КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ОЛИГОНУКЛЕОТИДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ДНК-ЧИПА

Приведены результаты исследований кинетики гибридизации комплементарных олигонуклеотидов на поверхности ДНК-чипа с использованием эллипсометрического метода измерения. Представлена физико-химическая модель структуры чипа и процесса, происходящего на его поверхности.

Одно из перспективных направлений в медицинской диагностике инфекционных и генетических заболеваний связано с созданием тест-систем на основе твердотельных ДНК-чипов и с разработкой ДНК-сенсоров.

Работа ДНК-чипа основана на фундаментальном свойстве цепей ДНК образовывать прочные комплементарные комплексы. Детектируемая ДНК, находящаяся в растворе, может связываться с комплементарным ей фрагментом ДНК, иммобилизованным на поверхности (рис. 1).

Проводимые в данной работе исследования кинетики процесса гибридизации и образования комплементарных дуплексов на поверхности ДНК-чипа преследуют цель построения физико-химической модели структуры и процесса, происходящего на поверхности ДНК-чипа. Решение данной задачи создает предпосылки к разработке математических методов определения количественных параметров и характеристик гибридизационного анализа.

Исследование кинетики процессов гибридизации на поверхности ДНК-чипа осуществлялось путем измерения рефрактометрической характеристики и параметров чувствительного слоя ДНК-чипа эллипсометрическим методом.

Физическими параметрами, описывающими состояние чувствительного слоя, являются показатель преломления n и толщина слоя l . Показатель преломления слоя определяется через соотноше-

ние Лоренц—Лорентца и связан с молекулярной поляризуемостью λ , количеством типов молекул и связей r в единице объема N :

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} \sum_r N_r \lambda_r. \quad (1)$$

В общем случае процесс гибридизации Q -олигонуклеотидов связан с образованием на поверхности Q -комплементарных дуплексов и характеризуется изменением молекулярной поляризуемости λ_q вновь образованного комплекса. Данный процесс может быть представлен соотношением Лоренц—Лорентца в следующей форме:

$$\frac{n_1^2 - 1}{n_1^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} \sum_{r=1} N_{r-1} \lambda_{r-1} + (N_r - Q) \lambda_r + Q \lambda_q. \quad (2)$$

Изменение показателя преломления $n - n_1 = \delta n$, обусловленного процессами гибридизации, определяется уравнением

$$\frac{6n}{(n^2 + 2)^2} \delta n = \frac{4\pi}{3} Q (\lambda_r - \lambda_q). \quad (3)$$

Априори предложена следующая физическая модель структуры ДНК-чипа (рис. 2). Реальная структура чувствительного слоя, приведенная на рис. 2, *а*, рассматривалась в виде двухслойной системы (рис. 2, *б*), где нижний слой, граничащий с подложкой, имеет показатель преломления N_n и толщину t_1 , верхний переходный слой обладает некоторой эффективной толщиной $t_{эф}$ и показателем преломления $N_{эф}$, $N_b < N_{эф} < N_n$.

Предполагается, что процесс гибридизации фрагментов ДНК на поверхности реальной струк-

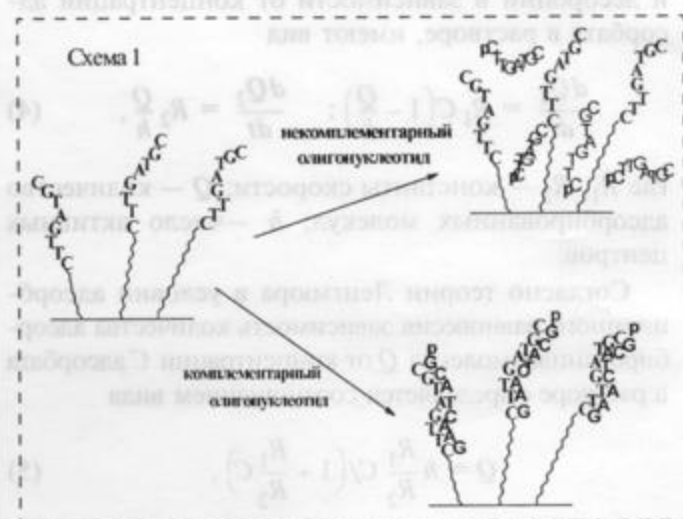


Рис. 1. Схема гибридизации ДНК с комплементарным фрагментом, иммобилизованным на поверхности

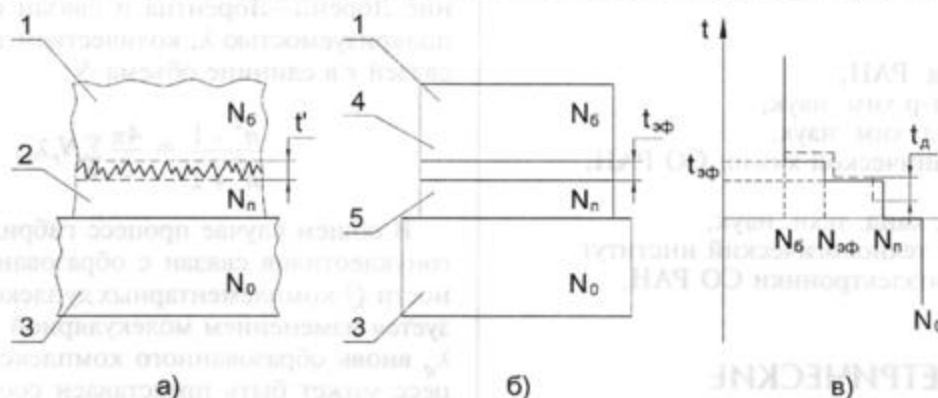


Рис. 2. Физическая модель структуры ДНК-чипа:

а — реальная структура ДНК-чипа; б — физическая модель структуры; в — распределение показателя преломления по глубине слоя

туры приведет к изменению эффективного показателя преломления и толщины переходного слоя, а также к образованию диффузионного слоя толщиной t_d с показателем преломления N_d (рис. 2, в).

Практические результаты эксперимента интерпретировались в рамках данной модели.

Кинетика процессов гибридизации, происходящих на активной поверхности ДНК-чипов, рассматривается в рамках основных положений теории адсорбции Ленгмюра. Согласно данной теории процесс адсорбции связан с наличием на поверхности активных центров, на которых происходит адсорбция молекул из жидкой фазы. Условие адсорбционного равновесия характеризуется равенством

скоростей адсорбции $\frac{dQ_1}{dt}$ и десорбции $\frac{dQ_2}{dt}$.

Уравнения, определяющие скорости адсорбции и десорбции в зависимости от концентрации адсорбата в растворе, имеют вид

$$\frac{dQ_1}{dt} = R_1 C \left(1 - \frac{Q}{h}\right); \quad \frac{dQ_2}{dt} = R_2 \frac{Q}{h}, \quad (4)$$

где R_1, R_2 — константы скорости; Q — количество адсорбированных молекул; h — число активных центров.

Согласно теории Ленгмюра в условии адсорбционного равновесия зависимость количества адсорбированных молекул Q от концентрации C адсорбата в растворе определяется соотношением вида

$$Q = h \frac{R_1}{R_2} C / \left(1 + \frac{R_1}{R_2} C\right). \quad (5)$$

В случаях, когда скорость десорбции $dQ_2/dt \rightarrow 0$, количество адсорбированных молекул не зависит

от концентрации, а определяется числом активных центров

$$Q = h;$$

в дальнейшем определим число активных центров как емкость ДНК-чипа.

Кинетика адсорбционного процесса характеризуется функцией $Q(t)$ и имеет вид

$$Q(t) = h \frac{R_1 C}{R_1 C + R_2} \left(1 - \exp\left(-\left(R_1 C + R_2\right)t/h\right)\right). \quad (6)$$

В условиях отсутствия десорбции молекул с поверхности ($R_2 = 0$) кинетическое уравнение (6) принимает вид

$$Q(t) = h \left(1 - \exp\left(-\frac{R_1 C t}{h}\right)\right). \quad (7)$$

Кинетические кривые адсорбции при разных концентрациях представлены на рис. 3.

Концентрацию адсорбата в растворе можно определять путем измерения времени процесса ад-

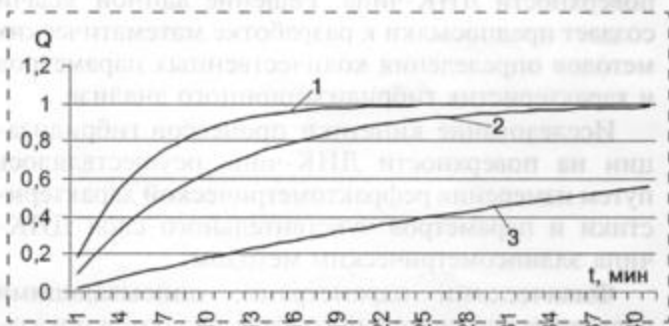


Рис. 3. Кинетические кривые адсорбции при разных концентрациях: 1 — C ; 2 — $0,5C$; 3 — $0,1C$

сорбции до заполнения фиксированного уровня активных центров Q^1 .

Соотношение между концентрацией и временем регистрации имеет вид

$$C = At^{-1}, \quad (8)$$

где A — калибровочная константа.

Предел обнаружения в случае отсутствия десорбционных процессов будет определяться числом активных центров (емкостью ДНК-чипа) и ограничивается реальным временем измерения.

Методика эксперимента

Регистрация изменений оптических констант и параметров чувствительного слоя ДНК-чипа осуществлялась путем измерения состояния поляризации отраженной световой волны от границы раздела фаз *иммобилизованный слой—буферный раствор* в условии полного внутреннего отражения (ПВО).

Конструкция ДНК-чипа представляет собой призму, выполненную из стекла. На основание призмы методом электронно-лучевого напыления наносился защитный слой SiO_2 толщиной 400 нм, на поверхности которого был иммобилизован слой олигонуклеотидов. Измерение осуществлялось эллипсометрическим датчиком.

Амплитуда коэффициентов отражения от границы раздела фаз при условии полного внутреннего отражения равна 1. Состояние поляризации излучения отраженной волны характеризуется разностью фаз между двумя ортогональными компонентами

$$\Delta = \delta_p - \delta_s.$$

Эллипсометрический датчик имеет следующие технические характеристики:

- чувствительность к изменению фазы $\Delta = 0,002^\circ$
- линейный диапазон измерений $\Delta = \pm 10^\circ$
- длина волны 650 нм

Датчик обеспечивает регистрацию изменений показателя преломления $\delta_p = 5 \cdot 10^{-6}$, изменение толщины переходного и диффузионных слоев на уровне 0,5 нм.

В экспериментах использовался способ иммобилизации олигонуклеотидов, разработанный в НИИХ СО РАН, который позволяет достигать плотности иммобилизации олигонуклеотидов 70 пмоль/мм² на поверхности SiO_2 .

На рис. 4 представлена зависимость изменения показаний датчика во времени в случае чистого буфера (участки *a*, *c*) при добавлении некомплементарного (участок *b*) и комплементарного олигонуклеотида к октануклеотиду, иммобилизованному на поверхности SiO_2 .

Значительные изменения показаний датчика происходят лишь при добавлении комплементар-

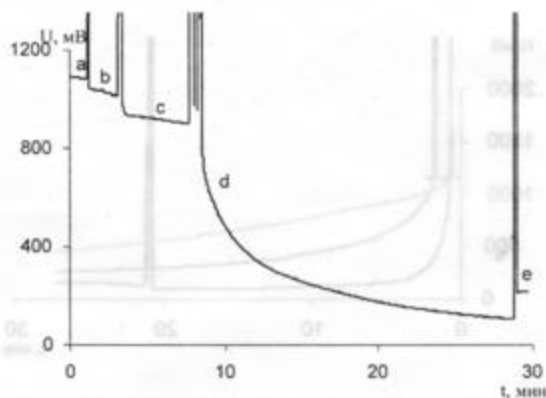


Рис. 4. Изменение показаний сенсора при добавлении некомплементарного и комплементарного олигонуклеотидов к октануклеотиду, иммобилизованному на поверхность стеклянной призмы: *a* — буфер; *b* — некомплементарный олигонуклеотид, $1 \cdot 10^{-4}$ М; *c* — буфер; *d* — комплементарный олигонуклеотид, $1 \cdot 10^{-4}$ М; *e* — буфер; (концентрация иммобилизуемого олигонуклеотида в растворе = 0,1 мМ)

ного октаметра, способного связываться с исходным олигонуклеотидом с образованием дуплекса. Концентрация олигонуклеотидов в буфере составляла $1 \cdot 10^{-4}$ М. Масштаб показаний датчика U при изменении на 1000 мВ соответствует изменению поляризации на 2° .

Дуплекс разрушался горячей водой и олигонуклеотид, не связанный с поверхностью, удалялся. После чего проводилась повторная гибридизация.

На рис. 5 приведены результаты многократной гибридизации на поверхности ДНК-чипа; существенных отличий в сигналах не наблюдалось.

В приведенных результатах зависимость показаний датчика от времени соответствует характеру экспоненциальной кривой.

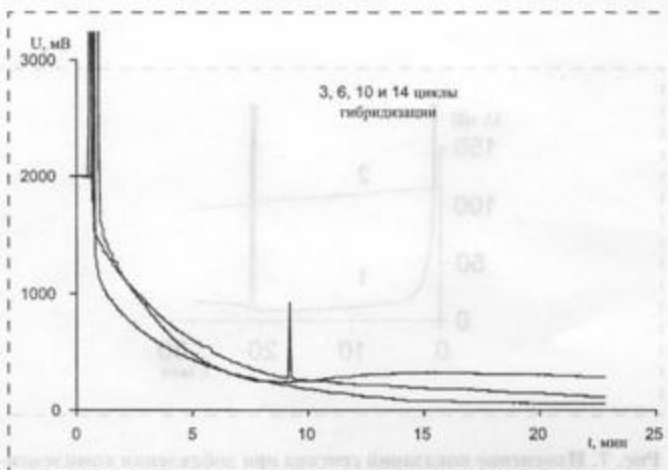


Рис. 5. Изменение показаний сенсора при повторении гибридизации несколько раз на одной призме с иммобилизованным олигонуклеотидом

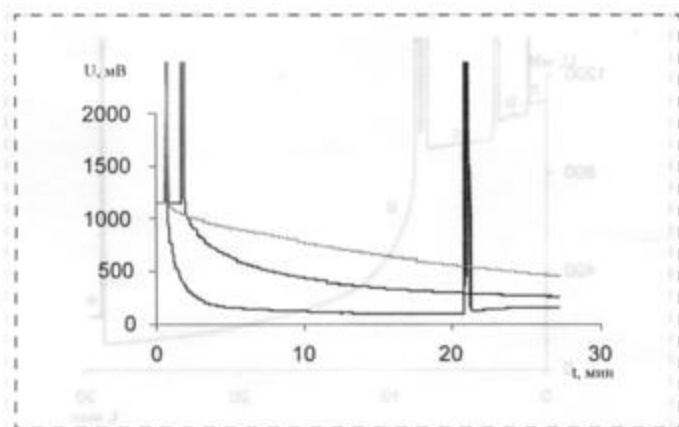


Рис. 6. Изменение показаний сенсора при добавлении комплементарного олигонуклеотида различной концентрации к октануклеотиду, иммобилизованному на поверхность стеклянной призмы: [комплемтарный олигонуклеотид] 1 — $C = 6 \cdot 10^{-5}$ М; 2 — $C = 3 \cdot 10^{-5}$ М; 3 — $C = 0,6 \cdot 10^{-5}$ М; [иммобилизуемый октануклеотид] $C = 0,1$ мМ

Исследованы зависимости кинетики протекания процесса гибридизации при различных концентрациях комплементарных олигонуклеотидов в растворе. Результаты исследований представлены на рис. 6.

Результаты данного эксперимента показывают, что при уменьшении концентрации комплементарного олигонуклеотида время для достижения постоянного уровня сигнала увеличивается: если при концентрации $C = 6 \cdot 10^{-5}$ М насыщение достигается за 4–5 мин, то при концентрации $6 \cdot 10^{-6}$ М — уже более часа. Очевидно, что обнаружение меньших концентраций требует еще большего времени. Результаты эксперимента согласуются с результатами теоретических расчетов (см. рис. 3).

Проведены исследования кинетики процесса гибридизации в зависимости от количества иммо-

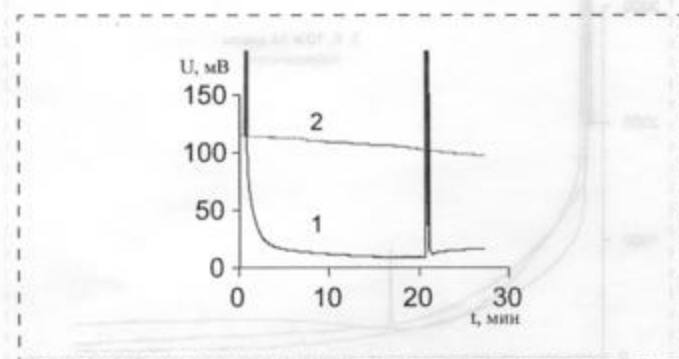


Рис. 7. Изменение показаний сенсора при добавлении комплементарного олигонуклеотида к октануклеотиду, иммобилизованному на поверхность стеклянной призмы: [иммобилизуемый октануклеотид] 1 — $C = 0,1$ мМ, 2 — $C = 0,01$ мМ; [комплемтарный олигонуклеотид] $C = 6 \cdot 10^{-5}$ М

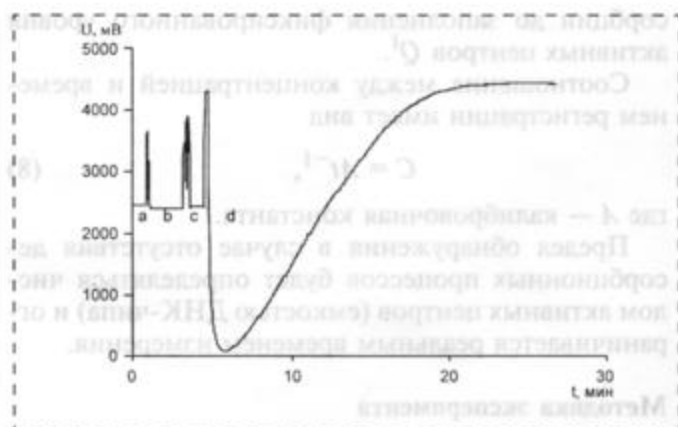


Рис. 8. Изменение показаний сенсора при добавлении некомплементарного и комплементарного олигонуклеотидов к октануклеотиду, иммобилизованному на поверхность стеклянной призмы: a — буфер; b — некомплементарный олигонуклеотид, $C = 1 \cdot 10^{-4}$ М; c — буфер; d — комплементарный олигонуклеотид, $C = 1 \cdot 10^{-4}$ М; иммобилизуемый октануклеотид, $C = 1$ мМ

билизованного олигонуклеотида. Результаты исследований приведены на рис. 7.

Кривая 1 соответствует случаю, когда концентрация олигонуклеотида в растворе составляла 0,1 мМ; кривая 2 — 0,01 мМ. Поверхностная плотность иммобилизованных октануклеотидов составляла соответственно 7 и 0,7 пмоль/мм². В обоих случаях концентрация комплементарного олигонуклеотида была $6 \cdot 10^{-5}$ М. На рис. 8 приведена кривая кинетики гибридизации для случая, когда концентрация иммобилизуемого олигонуклеотида в растворе составляла 1 мМ, что соответствовало поверхностной плотности ~ 70 пмоль/мм², кривая гибридизации имеет S-образный характер.

Анализ данного эксперимента в рамках предложенной физической модели структуры поверхности ДНК-чипа (см. рис. 2) позволяет сделать следующие выводы.

При плотности иммобилизованного олигонуклеотида 7 пмоль/мм² структура поверхности может быть представлена одним слоем, характеристика которого соответствует параметрам переходного слоя; процесс образования комплементарных дуплексов приводит к изменению показателя преломления переходного слоя, при толщине слоя ~ 100 нм изменение показателя преломления составляет $\Delta n \approx 0,03$.

При плотности олигонуклеотида 70 пмоль/мм² иммобилизованный слой представляется двухслойной структурой (см. рис. 2), кривая имеет сложный характер, где выделяются два параллельно протекающих процесса. Характер изменений на начальном участке кривой соответствует начальному участку кривой 1 на рис. 7, что говорит о наличии переходного слоя на поверхности. Дальнейший ход кривой соответствует более медленному

процессу диффузии олигонуклеотида и образованию дуплексов внутри второго слоя. Наблюдаемый процесс диффузии связан с уменьшением показателя преломления во втором слое.

При снижении плотности иммобилизованного олигонуклеотида ниже уровня 1 пмоль/мм² характер структуры поверхности изменяется и не может быть представлен однородным переходным слоем.

В проведенном эксперименте оптимальная плотность иммобилизованного олигонуклеотида составляла 7 пмоль/мм². Данная плотность обеспечивает значительное изменение детектируемого сигнала и наиболее быстрое протекание процесса гибридизации, что позволяет использовать простое соотношение (7) для определения концентрации

комплементарного олигонуклеотида в исходном растворе.

В общем, изменение показаний датчика зависит от различных факторов: поверхностной плотности иммобилизованного олигонуклеотида, от концентрации детектируемого ДНК фрагмента, от структуры пленки и условий формирования ее на поверхности SiO₂.

Предполагается продолжить работу и исследовать возможность использования эллипсометрического датчика для гибридизационного анализа протяженных фрагментов ДНК, а также для детекции образований мисматчей. Разрабатывается следующая модель сенсора, позволяющая проводить измерения на линейке ДНК-чипов.

РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1–12, 2001 г., № 3, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Особенности фазовых переходов в интерметаллидах с эффектом памяти формы: нейтронографическое и теоретическое исследование

Номер проекта: 97-02-16520-а
Год предоставления отчета: 1997

В задачи проекта входили: разработка априорных теоретических моделей структур мартенситных фаз никелида титана, экспериментальное получение дифрактограмм и их расшифровка на основе созданных моделей — для установления точных структур фаз.

В первый год проекта сделано в теоретическом плане: на основе разработанной авторами ранее концепции кооперативных колебаний созданы расчетные модели структур тригональной и моноклинной фаз никелида титана (определены их элементарные ячейки, их вложение в исходную кубическую B2 структуру, запись координат всех атомов в ячейке, пространственные группы, числовые значения параметров решетки и атомных координат).

Результаты отражены в статье в журнале ФММ и в трудах двух конференций.

В экспериментальном плане:

- получены поликристаллические образцы состава Ti(50)Ni(47)Fe(3) с развитыми R и моноклинной фазами для нейтронографических съемок, проведена необходимая их термообработка;
- получены кривые температурной зависимости электросопротивления и дилатометрические кривые для образцов Ti(50)Ni(47)Fe(3), доказывающие наличие тригональной и моноклинной фаз;
- проведена расшифровка рентгеновских дифрактограмм образца Ti(50)Ni(48,7)Co(1,3) с использованием расчетной модели R фазы и получено очень хорошее соответствие (R фактор 0,63 %). Результаты направлены в журнал в начале 1998 г.;
- выполнена переналадка системы регистрации нейтронов и программного обеспечения на нейтронном дифрактометре Д7Б, получены предварительные нейтронограммы для Ti(50)Ni(47)Fe(3).

процессу диффузии олигонуклеотида и образованию дуплексов внутри второго слоя. Наблюдаемый процесс диффузии связан с уменьшением показателя преломления во втором слое.

При снижении плотности иммобилизованного олигонуклеотида ниже уровня 1 пмоль/мм² характер структуры поверхности изменяется и не может быть представлен однородным переходным слоем.

В проведенном эксперименте оптимальная плотность иммобилизованного олигонуклеотида составляла 7 пмоль/мм². Данная плотность обеспечивает значительное изменение детектируемого сигнала и наиболее быстрое протекание процесса гибридизации, что позволяет использовать простое соотношение (7) для определения концентрации

комплементарного олигонуклеотида в исходном растворе.

В общем, изменение показаний датчика зависит от различных факторов: поверхностной плотности иммобилизованного олигонуклеотида, от концентрации детектируемого ДНК фрагмента, от структуры пленки и условий формирования ее на поверхности SiO₂.

Предполагается продолжить работу и исследовать возможность использования эллипсометрического датчика для гибридизационного анализа протяженных фрагментов ДНК, а также для детекции образований мисматчей. Разрабатывается следующая модель сенсора, позволяющая проводить измерения на линейке ДНК-чипов.

РФФИ и Страницка РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1–12, 2001 г., № 3, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Особенности фазовых переходов в интерметаллидах с эффектом памяти формы: нейтронографическое и теоретическое исследование

Номер проекта: 97-02-16520-а
Год предоставления отчета: 1997

В задачи проекта входили: разработка априорных теоретических моделей структур мартенситных фаз никелида титана, экспериментальное получение дифрактограмм и их расшифровка на основе созданных моделей — для установления точных структур фаз.

В первый год проекта сделано в теоретическом плане: на основе разработанной авторами ранее концепции кооперативных колебаний созданы расчетные модели структур тригональной и моноклинной фаз никелида титана (определены их элементарные ячейки, их вложение в исходную кубическую B2 структуру, запись координат всех атомов в ячейке, пространственные группы, числовые значения параметров решетки и атомных координат).

Результаты отражены в статье в журнале ФММ и в трудах двух конференций.

В экспериментальном плане:

- получены поликристаллические образцы состава Ti(50)Ni(47)Fe(3) с развитыми R и моноклинной фазами для нейтронографических съемок, проведена необходимая их термообработка;
- получены кривые температурной зависимости электросопротивления и дилатометрические кривые для образцов Ti(50)Ni(47)Fe(3), доказывающие наличие тригональной и моноклинной фаз;
- проведена расшифровка рентгеновских дифрактограмм образца Ti(50)Ni(48,7)Co(1,3) с использованием расчетной модели R фазы и получено очень хорошее соответствие (R фактор 0,63 %). Результаты направлены в журнал в начале 1998 г.;
- выполнена переналадка системы регистрации нейтронов и программного обеспечения на нейтронном дифрактометре Д7Б, получены предварительные нейтронограммы для Ti(50)Ni(47)Fe(3).

Изучение природы объемных компенсаторов заряда никелевых центров в алмазе

Номер проекта: 97-02-18503-а

Год предоставления отчета: 1997

Проведены комплексные исследования методами ЭПР и оптической спектроскопии синтетических алмазов до и после *P*, *T*-обработки, выращенных на затравку методом температурного градиента при 55 кбар и 1400 К на ростовых установках БАРС. Для ростового никелевого центра в замещающей позиции с тетраэдрическим окружением наблюдаемое электронное состояние с $S = 3/2$ предполагает наличие в объеме кристалла донора электрона, отдающего электрон на внешнюю оболочку иона никеля с достраиванием ее до $3d^7$ -состояния.

Облучение рентгеном ростовых кристаллов при нормальной температуре привело к увеличению спектра ЭПР от замещающего никеля при одновременном уменьшении интенсивности спектра ЭПР от донорного азота. Восстановление спектров ЭПР от ростовых никелевых и азотных центров до "равновесного" исходного состояния происходит при облучении светом длиной волны, меньшей 650 нм. При этом кинетики изменения спектров от замещающего никеля и замещающего азота имеют симметрично зеркальный характер.

Полученные данные дают основание утверждать, что объемным компенсатором заряда иона никеля для этого дефекта является донорный азот. Одновременно эти данные объясняют наличие в этих кристаллах азота в состоянии $N(+)$, регистрируемого по ИК спектрам, и говорят о наличии части замещающего никеля в состоянии $3d^6$. Кроме того, эти данные позволяют объяснить наблюдаемые ранее в ОДМР эффекты одновременной регистрации спектров от замещающего никеля и замещающего азота образованием донорно-акцепторной пары с более коротким расстоянием в паре $Ns-Nis$. Причем для таких пар электрон донорного азота локализован на ионе никеля.

Из никельсодержащих дефектов, образующихся при отжиге ростового никелевого центра, рентгеночувствительными оказались центры $NE4$ и $NE1$, имеющие в структуре четное число нескомпенсированных углеродных связей. Исследование изменений интенсивности регистрируемых спектров ЭПР в этих кристаллах показало, что уменьшение интенсивности спектров ЭПР $NE1$ и $NE4$ центров при рентгеновском возбуждении приводит к увеличению концентрации донорного азота. Равновесная концентрация исследуемых центров достигается фотовозбуждением в УФ области. Это доказывает, что компенсатором заряда, определяющим электронный спин $S = 1/2$ для центров $NE1$ и $NE4$, является донорный азот в объеме кристалла.

Построение оптимальной вращающейся координатной системы для небесных тел, обладающих внутренними движениями

Номер проекта: 97-02-18361-а

Год предоставления отчета: 1997

В отчетный период разрабатывалась теория оптимальных вращающихся координатных систем (ОВКС) для нетвердых тел. Оптимизация произвольно вращающейся твердотельной координатной системы достигалась минимизацией инвариантов энергетической матрицы остаточных движений. Для некоторых типов остаточных движений (базовых) значения соответствующих инвариантов суть нули. Это позволяет ввести три типа ОВКС: ОВКС-1, ОВКС-2 и ОВКС-3. Система ОВКС-1 известна давно под названием "Тиссерановы оси"; она получается минимизацией первого инварианта (следа энергетической матрицы): ее базовые движения являются нулевыми. Системы ОВКС-2 и ОВКС-3 в известной автору литературе не встречались. В работе получены следующие результаты.

1. В ОВКС-2 и ОВКС-3 проведено понижение порядка определяющей системы дифференциальных уравнений на три единицы по сравнению с общим случаем.

2. В ОВКС-2 и ОВКС-3 построены и изучены базовые движения. Первые представляют собой потоки вещества в теле от центра к периферии и обратно, вторые — установившиеся перемещения слоев внутри тела.

3. Построена общая теория ОВКС, соответствующая достаточно широкому классу полиномиальных комбинаций от основных инвариантов энергетической матрицы остаточных движений.

4. Расширен класс базовых движений, которые могут послужить основой для применения метода малого параметра при решении конкретных задач теории планет.

Исследование структурных и химических превращений на поверхности природных и синтетических оксидов, индуцированных лазерным излучением инфракрасного диапазона

Номер проекта: 97-02-17967-а

Год предоставления отчета: 1997

Было проведено исследование воздействия непрерывного и импульсного инфракрасного CO_2 лазера на поверхность кристаллических и аморфных си-

ликатов. В результате проведенных исследований установлено, что обнаруженные нами ранее явления селективной возгонки оксидов кремния с поверхности силикатов и избирательного обогащения поверхности силиката металлообразующими элементами имеют место при действии излучения CO_2 лазера не только на поверхность алюминий-, железо-, медь- и марганецсодержащих силикатов, но и при лазерном воздействии на поверхность широкого круга силикатов, имеющих полосу поглощения в области частоты лазерного воздействия.

Было обнаружено также, что воздействие инфракрасного лазерного излучения на поверхность монокристалла циркона (ZrSiO_4), наряду с явлениями селективной возгонки оксидов кремния и обогащения поверхности цирконием, приводит к изменению электронного состояния атомов циркония, входящих в состав силикатной матрицы. На основе рентгеноэмиссионного исследования циркона, облученного лазером, показано, что в процессе фотохимических превращений на поверхности циркона возникают дефектные циркониевые кластеры, в которых атомы циркония могут находиться в неравновесных электронных состояниях, наличие которых обнаруживается по перераспределению интенсивностей K и L компонент в рентгеноэмиссионных спектрах облученного лазером циркона.

С помощью фотолюминесцентного анализа образцов аморфного и кристаллического кварца и других силикатов, облученных излучением импульсного CO_2 лазера (длительность импульса 100 нс, энергия в импульсе 2,3 Дж), было проведено исследование дефектных центров, образующихся в матрице силикатов под действием этого излучения. Было установлено образование центров типа дважды координированного иона кремния Si_2^+ с неподеленной электронной парой, возникновение которого обусловлено разрывом кремнекислородных связей силикатной матрицы. Обнаружена также суперлюминесценция на этих дефектных центрах во всех указанных силикатах на длинах волн 360 и 370 нм, имеющая узкую полосу в спектре возбуждения на длинах волн соответственно 340 и 360 нм. Полученные результаты подтверждают сделанный нами ранее вывод, что при действии лазерного излучения на силикаты происходит селективный разрыв прочных ковалентных кремнекислородных связей, вызываемый резонансным лазерным воздействием.

Результаты проведенных исследований могут найти применение в микроэлектронике, интегральной оптике, новых способах записи и считывания информации.

Роль кластеров в формировании наноструктурных люминесцирующих пленок полупроводников методом лазерной абляции

Номер проекта: 97-02-18469-а

Год предоставления отчета: 1997

Методом лазерного напыления были получены наноструктурные пленки кремния, которые обладают люминесценцией в видимой части спектра. В спектрах фотолюминесценции пленок были выделены три характерных полосы люминесценции (синяя, желтая и красная).

Показано, что условия напыления пленок (параметры лазерного излучения, давление и сорт буферного газа) различным образом влияют на интенсивность каждой из полос в спектрах фотолюминесценции.

Исследование микроструктуры пленок показало, что пленки, обладающие люминесценцией, имеют гранулы нанометрового масштаба (20 нм).

С помощью метода времяпролетной масс-спектрометрии изучались временная и пространственная структуры лазерного факела, образующегося при абляции кремния в условиях, при которых напылялись пленки. Обнаружено, что при абляции кремния образуется очень большое число ионов с высокой энергией до 2 кэВ. Эксперименты показали, что вероятно существуют два механизма абляции кремния — "тепловой" и "электронный".

Установлено, что при увеличении давления буферного газа в процессе напыления количество вещества, переносимого в виде кластеров, резко возрастает, а в кислороде кроме этого протекают газофазные реакции окисления. Наблюдается предполагаемая корреляция между увеличением количества кластеров, осаждаемых на подложку, и возрастанием интенсивности фотолюминесценции желтой и красной полос.

Создание нано- и атомно-размерных объектов и исследование квантового транспорта в них

Номер проекта: 97-02-18479-а

Год предоставления отчета: 1997

Созданы и исследованы методом ВРЭМ проводящие и диэлектрические полимерные и фуллеритовые нанопроволоки ($2 \times 30 \text{ нм}^2$), а также двумерные и одномерные ансамбли наночастиц, в частности суперпарамагнитных частиц.

Процедура создания таких нанообъектов включает:

а) создание в GaAs пленке сверхтонких щелей с атомно-гладкими краями;

б) капиллярное заполнение созданных щелей раствором или расплавом.

Исследованы особенности процессов туннелирования в GaAs и InAs структурах с подвижными электродами.

Созданы основы нового направления в технологии изготовления перспективных нанообъектов: монокристаллических нанотрубок, спиралевидных нанопроволок и т. п.

Изготовлены InGaAs/GaAs квантовые ямы, свернутые в однослойные и многослойные трубки. Получены трубки-свитки радиусом 200 нм, толщиной стенок 10 нм и длиной до 2 см.

Методами ВРЭМ показана монокристаллическость трубок и отсутствие в них дислокаций.

Основные закономерности формирования и возможности применения гетероструктур на основе нитрида галлия

Номер проекта: 97-02-18017-а

Год предоставления отчета: 1997

Установлены конкретные механизмы возникновения дефектов в эпитаксиальных слоях, вызванных различием симметрий слоя и подложки. Проведенный анализ влияния технологических параметров процесса роста (степень гладкости поверхности, плотность зародышеобразования) на плотность таких дефектов позволил впервые адекватно интерпретировать экспериментальные данные по эпитаксиальному росту гетероструктур, имеющих большое практическое значение, таких как слои высокотемпературных сверхпроводников на перовскитоподобных подложках с различными типами искажения структуры подложки от идеальной перовскитной, а также эпитаксиальные гетероструктуры "III-V нитриды на сапфире".

В результате предпринятого нами обширного, систематического, теоретического и экспериментального исследований ориентационных соотношений, возникающих в эпитаксиальной системе "нитрид галлия (нитрид алюминия, нитрид индия, их бинарные твердые растворы) на сапфировых подложках различных кристаллографических ориентациях":

- сформулирован и развит подход, впервые позволивший проанализировать все многообразие (зачастую не лишённое внутренних противоречий) экспериментально наблюдавшихся ориентационных соотношений в рассматриваемой системе и естественным образом классифицировать их в ограниченное число типов;
- понимание нами того факта, что зависимость ориентационных соотношений от ориентации сапфировой подложки и состава слоя (т. е. GaN или AlN или InN) не может быть объяснена в

рамках общепринятой концепции Решетки Совпадающих Узлов (PCU), позволило нам предложить принципиально иной подход к проблеме с использованием симметричного анализа, развитого нами ранее, и компьютерного Монте-Карло моделирования начальных стадий процесса эпитаксии;

- предложенная модель позволила впервые успешно интерпретировать зависимость ориентационного соотношения от состава слоя;
- впервые определены ориентационные соотношения (с учетом направления полярной "с"-оси слоя) слоев нитрида галлия на всех плотноупакованных срезах сапфира, описан новый, ранее в литературе не упоминавшийся тип ориентационного соотношения для системы "AlN на сапфире".

Эффекты пространственной дисперсии в оптике магнитных кристаллов

Номер проекта: 97-02-18299-а

Год предоставления отчета: 1997

За отчетный период проведена следующая работа.

- При отражении света от нецентросимметричного кристалла $\text{Li}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ обнаружен круговой дихроизм, изменяющий знак при перемагничивании и обладающий 120-градусной периодичностью.
- Экспериментально обнаружен новый нелинейно-оптический эффект в тонких пленках магнитных гранатов. Был предложен новый метод для того, чтобы разделить два вклада в нелинейную восприимчивость.
- Показано, что в пленках магнитных гранатов кристаллографический и магнитоиндуцированный вклады в нелинейную восприимчивость могут сосуществовать при одновременном нарушении временной и пространственной инверсии. Спектроскопические исследования показывают различное поведение этих вкладов с изменением энергии.
- Был разработан новый метод наблюдения антиферромагнитных доменов с использованием нелинейной оптической спектроскопии.
- Обнаружен и исследован в магнитных полупроводниках $\text{Cd}(1-x)\text{Mn}(x)\text{Te}$ большой по величине эффект невязанного магнитного двуупреломления света, связанного с билинейным по магнитному полю и волновому вектору вкладом в тензор диэлектрической проницаемости.
- Антиферромагнетик Cr_2O_3 был исследован методом нелинейной двухфотонной спектроскопии. Была обнаружена сильная анизотропия двухфотонного спектра в зависимости от поляризации падающих фотонов.

Атомно-силовая микроскопия и сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия полупроводниковых наноструктур на основе соединений III—V и II—VI

Номер проекта: 97-02-18291-а
Год предоставления отчета: 1997

Проект направлен на развитие технологий получения, методов исследования с нанометровым пространственным разрешением и непосредственное изучение этими методами современных полупроводниковых наноструктур. В 1997 г. с привлечением методов атомно-силовой микроскопии (AFM) и сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии (STM/S) велись исследования:

- особенностей MBE роста и испарения в UHV квантовых точек InAs на вицинальной поверхности GaAs(001), разориентированной в направлении [010];
- морфологии поверхностей и свойств интерфейсов для слоев ZnSe, выращиваемых методом MBE на точно ориентированной поверхности GaAs (001);
- закономерностей формирования и последующей трансформации при нормальной температуре наноструктур CdSe, получаемых на вышеупомянутых поверхностях ZnSe;
- морфологии поверхности кристаллов GaN и объемной структуры пористых кристаллов GaN.

По каждому из направлений работ были получены новые результаты, расширяющие понимание свойств изучаемых полупроводниковых наноструктур и одновременно способствующие совершенствованию технологий их получения.

Исследование спектров электронных состояний квантовых точек Ge в структурах Si/Ge/Si и GaAs/Ge/GaAs

Номер проекта: 97-02-18498-а
Год предоставления отчета: 1997

С помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) были получены Si/Ge/Si структуры с квантовыми точками (QD) германия. Слой QD Ge наносился при низкой температуре подложки ($T = 200^\circ\text{C}$), что обеспечивало начало трехмерного роста при эффективной толщине Ge в пять монослоев. В результате характерный размер QD составлял от 100 до 70 Å.

В полученных структурах было исследовано комбинационное рассеяние света (КРС) на оптических фононах QD Ge при разных температурах (300—4 К). Обнаружено изменение формы и ин-

тенсивности резонансных зависимостей в области E0 (Г25—Г2) переходов QD Ge при понижении температуры до 77 К. Показано, что наблюдаемые особенности обусловлены уменьшением параметра затухания Г Г2 электронного состояния QD, а также выполнением для части QD условия двойного резонанса. Показано, что из-за симметрии огибающих волновых функций основного электронного и дырочных состояний значительный вклад в КРС на оптических фононах QD Ge дают прямые переходы между двумя ближайшими к полтору валентной зоны дырочными состояниями и Г2 электронным уровнем. Наблюдаемое усиление интенсивности КРС в условиях двойного резонанса позволило определить параметр затухания Г2 состояния QD Ge ($\Gamma = 8+4$ мэВ). Анализ наблюдаемого квазистационарного состояния (Г2) QD Ge, проведенный в сферически-симметричной модели QD с учетом особенностей электронного спектра Si матрицы, позволил установить характер локализации состояния данного типа. Оно оказывается сильно локализованным, поскольку его распад на Г15 состояния Si матрицы затруднен в силу значительной разницы эффективных масс в Г15 и Г2 зонах Si и Ge соответственно. Значение параметра затухания, полученное в рассмотренной модели, хорошо согласуется с результатами эксперимента.

Была исследована возможность получения QD Ge при МЛЭ на поверхности GaAs. Установлено, что в результате оптимизации условий роста и подготовки поверхности удается обеспечить трехмерный рост Ge на начальных стадиях. Получены первые образцы структур GaAs/Ge/ZnSe с QD Ge.

Исследование дифракции света в гофрированных многослойных структурах и влияния волноводности слоев на этот процесс

Номер проекта: 97-02-16857-а
Год предоставления отчета: 1997

Теоретически проанализированы свойства длиннопребжных плазмонов (ДПП) в симметричных гофрированных структурах металл—диэлектрик. Получены зависимости констант распространения ДПП от толщины металлических пленок и параметров их гофрировки, т. е. от периода гофра и его глубины. Показана возможность обнаружения ДПП в этих структурах благодаря эффекту аномального отражения света от поверхности металлической пленки. Проведены эксперименты по возбуждению ДПП в гофрированных (период 0,37 мкм, длина волны 0,63 мкм) пленках меди толщиной 90 Å, погруженных в диэлектрик ($n = 1,512$). Теоретически проанализирована возможность существования ДПП в асимметричных структурах металл—диэлектрик, содержащих тон-

кий слой металла, слой диэлектрика и две прилегающие к ним среды с сильно различающимися показателями преломления. Показано, что ДПП появляется в этих структурах, если толщина слоя диэлектрика превышает некоторое критическое значение. Путем численного эксперимента изучены угловые зависимости коэффициента отражения пучка света, падающего на поверхность гофрированной асимметричной структуры, и показано, что эффект аномального отражения света и в этих структурах имеет место. Выполнена экспериментальная проверка выводов теоретического анализа и показана перспективность использования асимметричных гофрированных структур металл—диэлектрик в высокочувствительных сенсорных устройствах.

Поиск новых сегнетоэлектрических материалов, выращивание монокристаллов, исследование их физических свойств

Номер проекта: 97-02-18205-а
Год предоставления отчета: 1997

Исследованы условия выращивания монокристаллов $PbBi_2Nb_2O_9$ и $Pb_2Bi_4Ti_5O_{18}$ методом Чохральского и изучены их некоторые физические свойства.

Синтезированы новые соединения типа $ABi_2M_2O_9$, где А — 3d элементы (Ni, Co, Fe); М = Nb, Ta, со слоистой перовскитоподобной структурой: $NiBi_2Nb_2O_9$, $CoBi_2Nb_2O_9$, $FeBi_2Nb_2O_9$ и $NiBi_2Ta_2O_9$. Оработана технология получения, проведены рентгеноструктурные исследования и определены параметры их элементарных ячеек. Полученные результаты позволяют расширить интервал значений толеранц-фактора Гольдшмидта, при которых возможно существование соединений этого типа. Выполнены диэлектрические измерения вышеуказанных соединений при нормальной температуре, на частоте 1 кГц. Диэлектрическая проницаемость имеет значение порядка 100—200, аналогичное другим соединениям этого типа, являющихся сегнетоэлектриками. Исследованы условия образования и получены керамические образцы изовалентных твердых растворов $KTaO_3-KVO_3$ в широком диапазоне процентных соотношений. Для некоторых твердых растворов этой системы выращены монокристаллы. Аналогичные исследования выполнены на гетеровалентных твердых растворах в системах $KTaO_3-PbTiO_3$ и $KTaO_3-MnTiO_3$. Предложен оригинальный метод выращивания монокристаллов фуллеренов и фуллеренсодержащих соединений, позволяющий получать монокристаллы из незначительного количества исходного материала. Этим методом выращены монокристаллы С60, С70 и новое фуллеренсодержащее

соединение С70*6S8. Выполнены рентгеноструктурные, диэлектрические, магнитные и оптические измерения.

Нелинейная динамика локомоторного ритма

Номер проекта: 97-02-17526-а
Год предоставления отчета: 1997

Создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать вызванные вибрацией мышц движения ноги человека в горизонтальной плоскости при минимальной мышечной активности. В ходе экспериментов установлено, что при вибрации мышц возникают циклические движения, кинематические и электромиографические (ЭМГ) характеристики которых не отличаются от соответствующих характеристик шагательных движений, совершаемых испытуемым в тех же условиях произвольно. В движение вовлекаются суставы бедра и голени с реципрокной (взаимной) ЭМГ активностью в соответствующих флексорных (сгибательных) и экстензорных (разгибательных) мышцах.

Установившиеся ритмические движения не зависели от функционального назначения вибрируемых мышц и их участия в движении ноги — в зависимости от вибрируемой мышцы мог изменяться только начальный период тонического вибрационного эффекта. Шагательные движения вызывались также при вибрации мышц контралатеральной (противоположной) ноги. Шагание "в воздухе", вызванное вибрацией, не отличалось от произвольного шагания при тех же условиях.

Фазовый сдвиг между вызванными движениями бедра и голени мог быть как положительным, так и отрицательным, что соответствовало локомоции "вперед" и "назад". У части испытуемых самопроизвольно происходила смена направления движения при неизменных условиях эксперимента. Данные выполненных экспериментов свидетельствуют, что в вызове циклических движений при вибрации принимают участие центральные механизмы генерации шагания.

Предложена и рассмотрена феноменологическая модель центрального генератора ритма, управляющего движением тазобедренного и коленного суставов. Показано, что в рамках традиционных представлений о мотонейронной и скелетно-мышечной системе ноги человека такая модель обеспечивает качественное описание динамики произвольных шагательных движений, в частности, бистабильности режимов шагания "вперед" и "назад" и хаотических переключений между ними, когда такие режимы становятся неустойчивыми.

Модель представляет собой два автогенератора, управляющих тазобедренным и коленным суставами, с нелинейной связью, действие которой качест-

венно похоже на действие комбинации эксайторной (возбуждающей) и ингибиторной (подавляющей) связей, характерных для нейронных систем.

Конкретный анализ выполнен на примере взаимодействия двух идентичных генераторов Ван-дер-Поля-Дюффинга и включает в себя построение границ областей устойчивости режимов синхронизации двух подсистем, бифуркаций соответствующих периодических движений и установление сценариев перехода к режиму хаотических переключений.

Радиационная интенсификация спекания порошковых неорганических материалов

Номер проекта: 97-02-16674-а

Год предоставления отчета: 1997

В проекте исследовано обнаруженное авторами явление интенсификации процесса спекания порошковых неорганических материалов в условиях совместного воздействия высоких температур и мощного пучка ускоренных электронов. Установлены закономерности и механизм уплотнения диэлектрических материалов при радиационно-термическом спекании.

Исследование взаимодействия рентгеновского излучения с кристаллической решеткой в условиях распространения акустических колебаний

Номер проекта: 97-02-17966-а

Год предоставления отчета: 1997

В условиях существования в кристалле кремния акустической волны исследовано влияние на дифракцию рентгеновских лучей деформаций, вызванных присоединением пьезопреобразователя к образцу. Также изучено влияние акустического возбуждения на интенсивность проходящего рентгеновского пучка в условиях Лауэ-дифракции.

Рассмотрен процесс образования дифракционного контраста стоячих ПАВ, когда расходимость падающего пучка того же порядка или больше, чем разориентация в отражающей плоскости, обусловленная создаваемой ПАВ упругой деформацией. Показано, что подобно случаю рентгеновской стробоскопической топографии имеет место фокусировка дифрагированного излучения на определенном расстоянии от кристалла.

Изучено образование контраста бегущих и стоячих ПАВ при различных условиях однокристалльной и двухкристалльной методик — случаев расхо-

дящегося падающего излучения и плоской (псевдоплоской) волны.

Впервые в колеблющемся кристалле ниобата лития измерена кривая выхода NbKa-флуоресценции, возбужденной стоячей рентгеновской волной. Продемонстрировано влияние акустического возбуждения (в кристалле ниобата лития возбуждалась поверхностная бегущая акустическая волна) на форму аномальной угловой зависимости выхода флуоресцентного излучения и показана возможность применения метода стоячих рентгеновских волн для определения амплитуды колебаний атомов в кристаллической решетке.

Показано, что для достижения максимального контраста в общем случае желательно: выбирать геометрию, при которой направление распространения ПАВ лежит в плоскости дифракции; использовать источники рентгеновского излучения с большой длиной волны; иметь достаточно большую амплитуду колебаний ПАВ; учитывать расходимость падающего пучка и наличие расстояния фокусировки рентгеновских лучей после их отражения от поверхности образца.

Туннельные исследования сверхпроводящих оксидов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{4+2n}$ ($n = 1$ и 3)

Номер проекта: 97-02-17593-а

Год предоставления отчета: 1997

Изучена возможность выращивания монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223 фаза), $T_c = 110$ К с линейными размерами $> 0,5$ мм методом свободного роста в замкнутых кавернах, сформированных в растворе-расплаве исходной шихты в KCl. С этой целью проведены процессы выращивания кристаллов из предварительно синтезированных шихт разных катионных составов, для ряда составов найдены оптимальные температурные режимы для формирования каверн и роста в них кристаллов.

Впервые получены свободно выросшие, ограниченные, сверхпроводящие кристаллы с размерами до 1×1 мм² Bi-2223 фазы. Исследовано качество полученных кристаллов по температурным зависимостям магнитной восприимчивости $\chi(T)$, сопротивления в "b" плоскости $r_{ab}(T)$ и рентгеноструктурным измерениям. В лучших кристаллах, имеющих форму почти правильных квадратов, Bi-2212 фаза не обнаруживалась по зависимостям $\chi(T)$ и $r_{ab}(T)$.

Критическая температура, измеренная по этим зависимостям, совпадает и равна $T_c \approx 110$ К. Ширина перехода в сверхпроводящее состояние по уровню 10—90 % зависимости $\chi(T) \Delta T_c \approx 1$ К.

Структурные исследования полученных кристаллов показали, что на дифрактограммах лучших

образцов присутствуют только рефлексы (001) от Bi-2223 фазы. Кривые качания позволяют утверждать, что разориентация блоков в кристалле не превышает $0,5^\circ$, что примерно соответствует степени совершенства полученных этим методом ранее кристаллов Bi-2201 и Bi-2212. Параметры элементарной ячейки: $a = b = 5,39 \pm 5,40 \text{ \AA}$, $c = 36,97 \pm 37,01 \text{ \AA}$.

Однако большинство рефлексов от фазы Bi-2223 уширено и сдвинуто с расчетных позиций. Это может быть следствием влияния периодически

расположенных прослоек со структурой Bi-2212 толщиной в одну—две элементарные ячейки.

В менее совершенных образцах наряду с рефлексами от фазы Bi-2223 наблюдались также рефлексы от фаз Bi-2212 и Bi-4435. Зависимость $r_{ab}(T)$ при $T > T_c$ имеет необычный характер: при $125 < T < 200 \text{ К}$ сопротивление падает быстрее, чем в диапазоне температур 300—200 К.

Переход по $r_{ab}(T)$ размыт значительно сильнее, чем по $\chi(T)$. С чем связана такая зависимость $r_{ab}(T)$, пока не ясно.

ИНФОРМАЦИЯ

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
главный редактор журнала
"Микросистемная техника"

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Специализированный сайт журнала "Микросистемная техника" в Интернете (<http://www.microssystems.ru>) поддерживает, пополняет информацией и стимулирует создание устойчивого сообщества читателей этого журнала.

Внешний вид главной страницы сайта журнала "Микросистемная техника" (МСТ) приведен на рисунке. В состав управляющих кнопок сайта включены:

- **Новости** в области МСТ
- **Поиск.** Аннотация статей журнала МСТ
- **Редколлегия** журнала МСТ
- **Учредители** журнала МСТ
- **Рубрики** статей журнала МСТ
- **Подписка** на журнал МСТ
- **Авторам** — правила оформления статей для публикации в журнале МСТ
- **Конференции** по МСТ
- **Страничка РФФИ**
- **Литература** по специальности 201901
- **E-mail:** — отправка писем гл. редактору МСТ
- **Специальность 201900** — о новой специальности МСТ

Жирным шрифтом выделены слова, которые видны на кнопке, а светлым — расширения, которые видны на кнопке только при подведении курсора.

На сайте приведены только аннотации, а не сами статьи журнала, они систематизированы по

следующим основным рубрикам и расположены в алфавитном порядке:

- В мире молекулярной электроники
- Информация
- Материаловедческие и технологические основы МСТ
- Моделирование объектов МСТ
- Новости нанотехнологии
- Применение объектов МСТ
- Страничка РФФИ
- Элементы МСТ и микросистемы

Выбор аннотаций статей возможен в нескольких режимах.

1. Для поиска по годам установите годы издания.
2. Для поиска по рубрикам выберите рубрики.
3. Для поиска по авторам выберите автора.
4. Для поиска аннотации по статьям наберите название статьи.
5. Возможна любая комбинация поиска. Для этого наберите любую комбинацию из этих режимов.

Затем нажмите кнопку "Найти". В окне появится аннотация статьи на русском и английском языках, а также номера страниц. Прежде чем перейти к новой аннотации, закройте окно с предыдущей аннотацией.

При поиске по авторам необходимо набрать фамилию автора, затем пробел и инициалы автора (через точки) без пробела.

После завершения каждой операции поиска аннотаций статей по заданной рубрике нажмите кнопку "Очистить запрос", а затем в меню — "Back".

Система готова снова к поиску новых аннотаций. За полтора года существования сайта журнала "Микросистемная техника" (с октября 2000 г.) на один-два порядка возросло число запросов и про-

образцов присутствуют только рефлексы (001) от Bi-2223 фазы. Кривые качания позволяют утверждать, что разориентация блоков в кристалле не превышает $0,5^\circ$, что примерно соответствует степени совершенства полученных этим методом ранее кристаллов Bi-2201 и Bi-2212. Параметры элементарной ячейки: $a = b = 5,39 \pm 5,40 \text{ \AA}$, $c = 36,97 \pm 37,01 \text{ \AA}$.

Однако большинство рефлексов от фазы Bi-2223 уширено и сдвинуто с расчетных позиций. Это может быть следствием влияния периодически

расположенных прослоек со структурой Bi-2212 толщиной в одну—две элементарные ячейки.

В менее совершенных образцах наряду с рефлексами от фазы Bi-2223 наблюдались также рефлексы от фаз Bi-2212 и Bi-4435. Зависимость $r_{ab}(T)$ при $T > T_c$ имеет необычный характер: при $125 < T < 200 \text{ K}$ сопротивление падает быстрее, чем в диапазоне температур 300—200 K.

Переход по $r_{ab}(T)$ размыт значительно сильнее, чем по $\chi(T)$. С чем связана такая зависимость $r_{ab}(T)$, пока не ясно.

ИНФОРМАЦИЯ

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
главный редактор журнала
"Микросистемная техника"

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Специализированный сайт журнала "Микросистемная техника" в Интернете (<http://www.microssystems.ru>) поддерживает, пополняет информацией и стимулирует создание устойчивого сообщества читателей этого журнала.

Внешний вид главной страницы сайта журнала "Микросистемная техника" (МСТ) приведен на рисунке. В состав управляющих кнопок сайта включены:

- **Новости** в области МСТ
- **Поиск.** Аннотация статей журнала МСТ
- **Редколлегия** журнала МСТ
- **Учредители** журнала МСТ
- **Рубрики** статей журнала МСТ
- **Подписка** на журнал МСТ
- **Авторам** — правила оформления статей для публикации в журнале МСТ
- **Конференции** по МСТ
- **Страничка РФФИ**
- **Литература** по специальности 201901
- **E-mail:** — отправка писем гл. редактору МСТ
- **Специальность 201900** — о новой специальности МСТ

Жирным шрифтом выделены слова, которые видны на кнопке, а светлым — расширения, которые видны на кнопке только при подведении курсора.

На сайте приведены только аннотации, а не сами статьи журнала, они систематизированы по

следующим основным рубрикам и расположены в алфавитном порядке:

- В мире молекулярной электроники
- Информация
- Материаловедческие и технологические основы МСТ
- Моделирование объектов МСТ
- Новости нанотехнологии
- Применение объектов МСТ
- Страничка РФФИ
- Элементы МСТ и микросистемы

Выбор аннотаций статей возможен в нескольких режимах.

1. Для поиска по годам установите годы издания.
2. Для поиска по рубрикам выберите рубрики.
3. Для поиска по авторам выберите автора.
4. Для поиска аннотации по статьям наберите название статьи.
5. Возможна любая комбинация поиска. Для этого наберите любую комбинацию из этих режимов.

Затем нажмите кнопку "Найти". В окне появится аннотация статьи на русском и английском языках, а также номера страниц. Прежде чем перейти к новой аннотации, закройте окно с предыдущей аннотацией.

При поиске по авторам необходимо набрать фамилию автора, затем пробел и инициалы автора (через точки) без пробела.

После завершения каждой операции поиска аннотаций статей по заданной рубрике нажмите кнопку "Очистить запрос", а затем в меню — "Back".

Система готова снова к поиску новых аннотаций.

За полтора года существования сайта журнала "Микросистемная техника" (с октября 2000 г.) на один-два порядка возросло число запросов и про-

microsystem engineering - Microsoft Internet Explorer

File Edit View Favorites Tools Help

Back Forward Stop Refresh Home Search Favorites History Mail Print Edit Discuss

Address <http://www.microsystems.ru/>

МСТ

Микросистемная техника
Международный научно-технический и научно-производственный журнал

ЧИТАТЕЛЮ О ЖУРНАЛЕ

Анализ современного состояния в области техники новых поколений и «критических» технологий в ряде наиболее развитых стран позволяет сделать заключение о том, что с начала 90-х годов наиболее динамично развивающейся является «технология микросистем» («microsystem technology» - MST), направленной на создание нового научно-технического направления - «микросистемной техники» («microsystem engineering» - MSE).

Микросистемная техника (МСТ) определяет новую революцию в области систем, реализуемых на микроуровне и обеспечивающих функционирование не только в условиях стационарного твердого тела, но и когда объект (часть объекта) микросистемной техники или контактирующая с ним среда находится во взаимной пространственно-временной динамике.

Новым в этом понятие, является привнесение современной технологии массового производства, свойственной микроэлектронике, в производство традиционных устройств и механизмов повышенной сложности, характерной для радиотехники, оптики, машиностроения, приборостроения и биомедицины. Это сочетание позволяет изготавливать уникальные многофункциональные устройства с микроными размерами и низкой стоимостью.

Развитие микросистемной техники для научно-технического прогресса может иметь такие же последствия, какие оказало появление микроэлектроники на становление и современное состояние ведущих областей науки и техники.

Задачей журнала является освещение современного состояния, перспектив и тенденций развития микросистемной техники, рассмотрение вопросов разработки и внедрения микросистем в различные

Новости
Губрики
Ред. Коллегия
Учредители
Поиск
Подписка
Авторы
Конференция
Странички РФФИ
Литература
E-Mail
Спец-ть 201900

смотренных страниц сайта о журнале (см. таблицу и диаграмму на второй стороне обложки).

Проводя поиск по перечню Интернет-ресурсов [1], содержащих информацию по проблемам микросистемной техники, находим в поисковых системах Yandex, Rambler, Alta Vista и каталоге ListRu — на первом месте сайт журнала «Микросистемная техника».

Первый номер журнала вышел в 1999 году. Задачей журнала является освещение современного состояния и перспектив развития микросистемной техники, рассмотрение вопросов разработки и внедрения микросистем в различные области науки, технологии и производства.

В первом номере за 1999 г. основное внимание было уделено обзорным материалам о состоянии МСТ, ее важнейших направлениях, перспективах развития. В 2000 г. было издано четыре номера журнала. Кроме статей о последних научно-технических достижениях в области микросистемной техники каждый номер имеет некоторую прикладную тематическую окраску: № 1 — летательные микроаппараты; № 2 — наземные и космические микроаппараты, проблемы разработки

и применения сенсоров и элементной базы микросистемной техники; № 3 — микро- и наноинструменты, биочипы; № 4 — надводные и подводные микроаппараты.

В ноябре 2001 года издательством «Новые технологии» совместно с Институтом проблемных исследований Российской академии естественных наук выпущено электронное издание архива журналов «Микросистемная техника» за 1999—2000 гг. на компакт-диске (CD-R производства фирмы BASF в удобном пластиковом конверте). Электронные версии оптимизированы для просмотра в Internet Explorer версии 5.0 (или выше).

На диске также размещены электронные цветные версии печатных статей в формате PDF. Для просмотра печатных версий статей требуется программа Adobe Acrobat Reader версии 3.0 или выше. Электронный архив журналов снабжен единым интерфейсом по разделам и статьям, позволяющим легко осуществлять навигацию по номерам и разделам журнала. Кроме того, в конце содержания каждого номера имеется кнопка с издательским вариантом журнала.

Минимальные системные требования: Pentium 100 МГц; 16 Мбайт ОЗУ; видеосистема, поддерживающая разрешение при отображении не менее 256 цветов; 6X-дисковод CD-ROM; Windows 9x/2000; Internet Explorer версии 4.0, Adobe Acrobat Reader 3.0.

Для заказа компакт-диска (CD-R) с электронными версиями журналов "MCT" необходимо заполнить и отправить заявку.

Способы отправки заявки:

- почтой по адресу: 142210, г. Серпухов Московской области, а/я 348. Институт проблемных исследований РАЕН, Коммерческий отдел;
- по электронной почте:
- e-mail: ipraes@online.stack.net;
- по факсу для Москвы и Московской области (8-27) 35-36-56, для других регионов (8-0967) 35-36-56.

После получения средств на наш расчетный счет в течение двух дней заказчику будет отправлен

компакт-диск ценной бандеролью с уведомлением (возможна доставка курьером в пределах МКАД г. Москвы).

Справки по телефону: для Москвы и Московской области (8-27) 72-06-77, для других регионов (8-0967) 72-06-77.

Дополнительные сведения по компакт-дису (CD-R) можно получить при обращении по электронной почте (e-mail: ipraes@online.stack.net).

С аннотацией статей журнала на русском и английском языках можно ознакомиться в Интернете по адресу www.microsystems.ru.

Литература

1. Мальцева С. В. Маркетинг и реклама в Интернет // Приложение к журналу "Информационные технологии". 2002, № 1. 24 с.

3—5 апреля 2002 года в Нижнем Новгороде состоялась Международная специализированная выставка-конференция "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ И СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ"

На выставке были представлены достижения предприятий, НИИ, КБ в областях радиосвязи, радиолокации, радиоизмерительного приборостроения, оптики, квантовой оптики, оптоэлектроники, специальной микроэлектроники. Эта выставка призвана содействовать привлечению технического потенциала и научных достижений России к решению важнейших проблем внедрения новых прогрессивных разработок и технологий в современные виды вооружения и военной техники.

В работе Международной специализированной выставки-конференции "Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления" приняли участие члены Правительства Российской Федерации, представители Федеральных министерств и ведомств, члены Совета Федерации и депутаты Государственной Думы Российской Федерации, представители научных и промышленных предприятий военно-промышленного комплекса России, представители деловых кругов, ученые и общественные деятели из России, стран ближнего и дальнего зарубежья.

Тематические направления выставки-конференции:

- Радиосвязь и системы управления
- Радиолокация
- Вопросы проектирования узлов СВЧ, КВЧ и оптического диапазона

- Микроэлектронные технологии и специальная микроэлектроника
- Оптика в системах измерений и телекоммуникаций
- Информационные системы и распознавание образов
- Электронные измерения и телекоммуникация

Российское агентство по системам управления (<http://www.rasu.gov.ru>) провело открытый конкурс на выполнение в 2002 г. научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по следующим разделам федеральной целевой программы "Национальная технологическая база" на 2002—2006 гг.:

- микроэлектронные технологии;
- технологии телекоммуникаций;
- технологии вычислительных систем;
- радиоэлектронные, микроволновые и акустоэлектронные технологии.

Заказанные работы должны быть выполнены исполнителем в срок, не превышающий 3 лет. Участники конкурса должны обладать достаточным научно-производственным, технологическим и кадровым потенциалом, обеспечивающим выполнение собственными силами не менее 50 % заказанных работ, а также иметь устойчивое финансовое положение.

**Перечень конкурсных проектов РАСУ по ФЦП "Национальная технологическая база"
по разделу "Микроэлектронные технологии" (в части микросистемной техники — наноэлектроники)**

№ п/п	Наименование работы	Цель работы, назначение и основные требования к результатам работы
15	Разработка технологии производства микромеханических элементов для микросистемной техники по кремниевой технологии	<p>Должны быть разработаны на основе планарной технологии базовые технологические процессы изготовления микромеханических элементов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • измерения ускорений для микросистемных акселерометров с параметрами: <ul style="list-style-type: none"> диапазон ускорений — 0—50 g; частотный диапазон — до 1 кГц; нелинейность — менее 0,1 %; чувствительность — 10^{-4}—10^{-5} g/Гц^{1/2}; динамический диапазон — 100—120 дБ/Гц^{1/2}; диапазон рабочих температур — минус 40—60 °С • газового сенсора индикатора взрывоопасных газов с параметрами: <ul style="list-style-type: none"> быстродействие — 10 мс—1 с; диапазон — 0,01—10 объемных % • измерителя расхода газа с параметрами: <ul style="list-style-type: none"> диапазон измерения — 0—35 норм. л/мин; температура газа — 10—45 °С; давление газа — 0,4—1,0 атм; влажность — до 80 %; точность измерения расхода — 0,07 норм. л/мин
16	Разработка базовой технологии производства микромеханических элементов для микросистемной техники по стекловолоконной технологии	<p>Должны быть разработаны на основе стекловолоконной технологии базовые технологические процессы изготовления микромеханических элементов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • синхронных микродвигателей размером менее 1 мм; • акселерометров инерциальных объемов от 0,2 до 5 см³ с потребляемой мощностью 0,2—1 Вт; • датчиков давления и температуры с габаритными размерами менее 1 мм
17	Разработка приборно-технологического базиса производства интеллектуальных нанотехнологических комплексов для создания наноэлементов и терабитных микромеханических запоминающих устройств	<p>Должен быть разработан технологический базис, позволяющий развить производство электронной компонентной базы нового поколения с низкой энерго- и материалоемкостью, в том числе накопителей информации емкостью до 10¹² бит/кристалл</p>
18	Разработка приборно-технологического базиса зондовых и ионных нанотехнологий формирования элементов с размерами менее 10 нм	<p>Должен быть разработан приборно-технологический базис, направленный на создание терагерцовых наноэлементов (в том числе аналогов вакуумных ламп), и наноэлементов для устройств хранения, обработки и передачи информации, которые будут использоваться в микроробототехнике, автономных миниатюрных космических, летательных и наземных аппаратах, системах и устройствах связи, разведки, сбора информации, медицинских устройствах и пр., и в первую очередь, на разработку:</p> <ul style="list-style-type: none"> • прецизионного широкопольного зондового микроскопа-литографа, обеспечивающего критический размер менее 10 нм на поле 100—300 мм и проведение технологических операций в средах контролируемого состава (в этом числе с ионами нейтральных и реактивных элементов); • технологических методов создания наноэлементов с размерами менее 10 нм; • активного элемента многозондового микроскопа-литографа и наноструктурированных материалов для новой наноэлементной базы
19	Разработка приборно-технологического базиса формирования нанотехнологических элементов на основе нанотрубных углеродных структур	<p>Должен быть разработан технологический базис, позволяющий создавать элементную базу наноэлектроники на основе нанотрубных углеродных структур, в том числе нанодиодов, нанотранзисторов, на основе углеродных нанотрубок, которые выполняют роль квантовопроводных элементов. Электронные приборы с нанометровыми размерами активных областей должны быть ориентированы на уровень интеграции до 10⁹ элементов на квадратный сантиметр и обладать возможностью создания сверхбыстродействующих электронных устройств с рабочими частотами 100 ГГц и более</p>