

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 544.6.018.42-16:544.636:544.72.023

А. Л. Деспотули, канд. физ.-мат. наук,
А. В. Андреева, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Институт проблем технологии микроэлектроники
и особо чистых материалов РАН,
п. Черноголовка, Московская обл.
E-mail: despot@ipmt-hpm.ac.ru
andreeva@ipmt-hpm.ac.ru

СОЗДАНИЕ НОВЫХ ТИПОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТВЕРДОЭЛЕКТРОЛИТНЫХ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ И МИКРО(НАНО)ЭЛЕКТРОНИКИ.

Часть 1

Критически рассмотрено современное состояние разработок пленочных суперконденсаторов. С целью создания суперконденсаторов для МСТ, микро- и наноэлектроники предложена концепция совершенных (когерентных) границ электрод/твердый электролит. Разработаны и исследованы тонкопленочные емкостные гетероструктуры разных типов

Введение

Емкостные накопители и преобразователи энергии и информации с высокими удельными характеристиками необходимы для развития "критических технологий" — наноэлектроники и микросистемной техники (МСТ). Область применения рассматриваемых компонентов широка: интегрированные с полупроводниковыми структурами наноконденсаторы, емкостная матричная память высокой плотности, резервные источники питания чипов, автономные источники для микроэлектромеханических систем (МЭМС) и других изделий МСТ (*arranged on the chip*), которые должны функционировать в условиях жестких динамических воздействий со стороны конденсированных сред, а также в полях проникающих ионизирующих излучений [1].

Источники энергии и мощности микроскопических размеров необходимы для реализации многих научно-технических задач. Однако темпы развития этого важного направления не соответствуют настоящим, а тем более прогнозируемым потребностям. Сложившееся положение нашло отраже-

ние в программной работе [2], где представлены общие тенденции миниатюризации систем и элементов МСТ, но данные по миниатюрным автономным источникам отсутствуют. Высокие удельные характеристики (Ф/г, Дж/г, Вт/г) микроисточников не могут быть достигнуты посредством традиционных подходов, опирающихся на рациональное использование объема, поскольку в микроприборах отношение поверхность/объем в 10^3 — 10^5 раз больше, чем у таблеточных аналогов. Поэтому поиск концептуально новых решений необходимо вести на основе современных фундаментальных знаний об атомном строении и свойствах междоузлистных поверхностей раздела — неотъемлемых элементов МСТ.

В работах Т. Ватанабе [3, 4] впервые сформулирована и развивается концепция граничного дизайна и инженерии междоузлистных границ (*interface engineering approach*) для создания перспективных материалов с новыми свойствами. Современный уровень развития технологии позволяет сделать следующий шаг и путем инженерии междоузлистных границ создавать перспективные новые приборы (*Interface engineering approach: from advanced materials to advanced devices*) [5—7]. Отсюда следует актуальность вопроса о влиянии степени совершенства структуры границ (интерфейсов) на удельные характеристики и функциональные возможности микроисточников.

Суперконденсаторы

Для МСТ требуются конденсаторы различных типов с высокой удельной емкостью [8]. Повышение емкости, энергии и мощности в конденсаторах таблеточного типа достигается за счет применения электродов с развитой поверхностью, уменьшения расстояний между обкладками и заполнения промежутка между ними изоляторами с большой диэлектрической проницаемостью ϵ (сегнетоэлектрики), увеличения рабочих напряжений. В качестве базовых материалов в конденсаторах используют электронные проводники, диэлектрики и ионные проводники различных типов (жидкие и твердые электролиты, в том числе литийпроводящие полимеры). Конденсаторы на основе пленок оксидов имеют удельную емкость $\sim 0,5$ мкФ/см² [9], что недостаточно для современных приложений.

В период с 1995 по 2003 г. наибольшую активность в области патентования пленочных конденсаторов проявляли фирмы и организации Японии

и США. Примерно в половине случаев патенты выданы на технические решения в области новых сегнетоэлектрических конденсаторов. Сегнетоэлектрические пленки являются сложными объектами [10]. Для них характерны возникновение в некотором диапазоне температур и давлений спонтанной электрической поляризации и большие значения диэлектрической проницаемости, существенно зависящие от многих факторов — состояния поверхности, толщины пленки (размерный эффект), стехиометрии, кристалличности, плотности, микроструктуры и кристаллографической ориентации [9, 10]. Формирование сегнетоэлектрической фазы часто требует трудоемкой операции поляризации пленки и проводится при высокотемпературном, $\sim 600\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагреве, разрушительном для гетерогенных композиций МСТ [11]. Дополнительные сложности и проблемы возникают при изготовлении сегнетоэлектрических конденсаторов, которые имеют широкие диффузионные границы и подвержены различным видам деградации [9, 12, 13]. Энергонезависимая сегнетоэлектрическая матричная память характеризуется высокой устойчивостью по отношению к воздействиям проникающих излучений (нейтронов, протонов, тяжелых ионов) [14], так как при облучении сохраняется поляризация сегнетоэлектриков. Однако, как и для конденсаторов других типов, ионизирующие излучения создают в сегнетоэлектрических конденсаторах токи утечки, пропорциональные расстоянию между обкладками, поэтому заряд и энергия, запасенные в ячейках памяти, не сохраняются. Из-за указанных недостатков сегнетоэлектрические конденсаторы, по-видимому, не найдут широкого применения в МСТ и нанoeлектронике в ближайшие годы.

Высокие значения диэлектрической проницаемости ϵ сегнетоэлектриков в параэлектрической фазе используются при создании динамической памяти (DRAM). Однако снижение ϵ (зависит от размера зерен кристаллитов) с уменьшением толщины пленки t препятствует достижению гигабитной плотности записи. Например, в тонких пленках параэлектрической фазы $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$, одного из наиболее перспективных материалов микроэлектроники, $\epsilon \approx 200$ и 400 , соответственно, при $t \approx 50$ и 100 нм [9]. Считается, что для нормального функционирования памяти любой плотности отдельные ячейки должны иметь емкость не менее 25 фФ. Тогда для 5 -гигабитной DRAM (площадь ячейки менее $0,1$ мкм²) требуются удельные емкости выше 250 фФ/мкм² (25 мкФ/см²). На момент написания обзора [9] достигнутое в результате многолетних разработок фирм-лидеров электронной промышленности (NEC, SAMSUNG, MITSUBISHI, TOSHIBA) максимальное значение удельной емкости составляло ≈ 150 фФ/мкм². Данные обзоров

[9, 15] показывают отсутствие заметного прогресса в создании высокоплотной сегнетоэлектрической DRAM в период 1995—2000 гг.

В последние годы на рынке объемных компонентов получили распространение конденсаторы с двойным электрическим слоем, называемые суперконденсаторами, ультраконденсаторами или электрохимическими конденсаторами, в которых при приложении внешнего напряжения ниже потенциала разложения электролита (жидкого или твердого) энергия запасается в тонком (молекулярных размеров) слое объемного заряда на границе электрод/электролит [16—18]. Фарадеевские процессы, т. е. выделение на электродах веществ при протекании тока, при работе таких конденсаторов отсутствует, поэтому название "электрохимические конденсаторы" является неудачным. Ряд производителей [19, 20], например, выпускает суперконденсаторы на основе жидких органических электролитов с электродами из активированного наноструктурированного углерода (удельная поверхность до 2000 м²/г), который для увеличения электрической емкости имеет заданное распределение пор по размерам. Оптимизированные по ряду параметров суперконденсаторы показывают высокие технические характеристики: $C \approx 10$ Ф/г, $J \approx 40$ Дж/г, $W \approx 10$ Вт/г ($V_{\text{раб}} \approx 3$ В).

Уступая химическим источникам тока по удельной энергии, суперконденсаторы значительно превосходят последние по удельной мощности и стабильности зарядно-разрядных характеристик в широком температурном интервале, что открывает возможности для создания гибридных источников энергии и мощности. Активная стадия работы гибридного источника, требующая высокой мощности, например, запуск двигателя автомобиля или передача информации в импульсном режиме в сотовых GSM-телефонах, обеспечивается суперконденсатором, после чего он перезаряжается в слаботочном режиме от аккумулятора или батареи гальванических элементов. В случае микроэлектромеханических систем (МЭМС) в качестве автономных миниатюрных слаботочных источников могут использовать пьезоэлементы, пленочные термобатареи, топливные микрореакторы и фотоэлементы. Использование гибридных источников позволяет значительно снизить вес автономных источников, например, в автомобилях (рис. 1, см. вторую сторону обложки). С помощью гибридных источников может быть продлен срок службы химических источников тока и доведен почти до единицы коэффициент их использования.

За период 1995—2003 гг. наибольшее число патентов США на новые технические решения в области твердоелектролитных суперконденсаторов

таблеточного типа получено японскими корпорациями SANYO, MATSUSHITA и NEC.

К суперконденсаторам иногда относят также электрохимические ячейки, в которых энергия запасается при протекании фарадеевских процессов: электроадсорбции (*underpotential deposition*) на электроде водорода, тяжелых металлов или некоторые окислительно-восстановительные реакции, но заряд Q , необходимый для выделения вещества или структурных изменений на электроде, непрерывно изменяется с потенциалом V (производную dQ/dV можно назвать псевдоемкостью). Рассматриваемые ячейки являются разновидностью аккумуляторов, хотя в идеальных аккумуляторах при изменении заряда Q потенциал электрода $V \approx \text{const}$ [21, 22]. Они превосходят суперконденсаторы с двойным электрическим слоем по энергии [22, 23], но уступают по мощности, поскольку в них, как в аккумуляторах, на электродах протекают сравнительно медленные, диффузионные по природе, процессы массопереноса и химических превращений.

Применение твердых электролитов вместо жидких в суперконденсаторах дает ряд преимуществ. Для целей МСТ и нанoeлектроники достаточно указать на два решающих: 1) возможность создания тонкопленочных конденсаторов на кремнии или других полупроводниках с использованием развитых в микроэлектронике технологий; 2) широкий интервал температур функционирования и сохранения годности компонентов. В конденсаторах на основе твердых электролитов, также как в конденсаторах с жидкими электролитами, энергия электрического поля запасается в двойном электрическом слое молекулярной толщины. Вызываемые проникающими ионизирующими излучениями токи утечки конденсаторов повышаются с увеличением объема, занимаемого электрическим полем. Поэтому конденсаторы с двойным электрическим слоем должны значительно превосходить сегнетоэлектрические в отношении сохранности заряда и энергии в условиях облучения. Радиационно устойчивые суперконденсаторы необходимы для создания объектов МСТ, предназначенных действовать в условиях сильных космических излучений и на территориях с высокими концентрациями радионуклидов.

Для решения актуальной и важной проблемы увеличения быстродействия, а также повышения удельных характеристик ($\Phi/\text{г}$, $\text{Дж}/\text{г}$, $\text{Вт}/\text{г}$) тонкопленочных конденсаторов до уровня таблеточных аналогов нами [5–7] предложена концепция когерентных границ электрод/твердый электролит. В настоящей статье представлено дальнейшее развитие этой концепции, показывающей, что путем инженерии межкристаллитных границ на основе высокопроводящих твердых электролитов можно

создавать перспективные новые приборы — тонкопленочные высокочастотные суперконденсаторы.

Структура и динамика высокопроводящих твердых электролитов

Твердые тела с высокой униполярной ионной проводимостью σ_i (уровень электронной проводимости σ_e произвольный), превышающей при 300 К условную границу $\sigma_i \sim 10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, называют суперионными проводниками (СИП), а при выполнении неравенства $\sigma_i \gg \sigma_e$ — твердыми электролитами [24]. Диаграмма $\sigma_i - \sigma_e$, которая показывает пересечение областей существования твердых электролитов и СИП, представлена на рис. 2 (см. вторую сторону обложки).

Кристаллические СИП — полуупорядоченные твердые тела. В них ионы одного сорта образуют жесткую подрешетку, где концентрация вакантных кристаллографических позиций разных типов в несколько раз превышает концентрацию подвижных ионов ($n_i \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$). Для подвижных ионов доступны все вакантные позиции, образующие связанное множество (каналы проводимости). Быстрый ионный транспорт в СИП возникает вследствие малости потенциальных барьеров ($h \sim 0,1 - 0,2 \text{ эВ}$) между соседними кристаллографическими позициями. При частоте колебаний подвижных ионов в потенциальных ямах $f_0 \sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$ (300 К) частота перескоков между соседними позициями $f \sim f_0 e^{-0,1/kT} \sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Определяемая в экспериментах энергия активации ионной проводимости коррелирует со средней высотой потенциальных барьеров h . Рис. 3 иллюстрирует различие энергетических рельефов обычного ионного кристалла и СИП.

К настоящему времени синтезировано множество кристаллических СИП с проводимостью по ионам различных металлов, протонам и ионам фтора. СИП семейства RbAg_4I_5 обнаружены в 1967 г. [25–27]. Среди других СИП они выделяются рекордно высокой проводимостью ионов Ag^+ в широком температурном интервале, что обусловлено особенностями кристаллического строения СИП (рис. 4, см. вторую сторону обложки).

В RbAg_4I_5 ионы Rb и I формируют жесткую кристаллическую подрешетку, а ионы Ag^+ подвижны. Значение $\sigma_i \approx 0,3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ при 300 К, тогда как

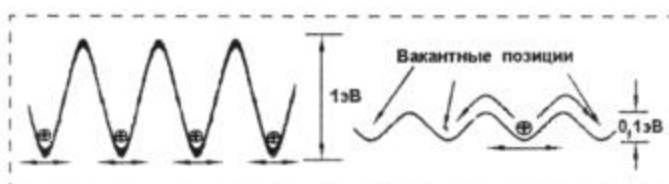


Рис. 3. Энергетический рельеф:

а — в обычном кристалле с ионным типом химической связи; б — в СИП

σ_e обычно не превышает $10^{-10} - 10^{-11} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. Согласно результатам, приведенным в работе [28], в RbAg_4I_5 концентрация подвижных ионов Ag^+ , находящихся в любой момент времени в активированном состоянии (над потенциальными барьерами), — порядка $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 1\%$ от концентрации серебра в кристалле). В отчетах госкомиссий США по перспективным технологиям и материалам (Advancing Materials Research, 1987 г.) [29] соединение RbAg_4I_5 отмечено среди 20 новых важнейших веществ, в которых в предшествующий 20-летний период были открыты принципиально новые явления.

Эффекты на границах твердых ионных проводников

К настоящему времени сформировалось множество научно-технических направлений, объектами которых являются металлические или полупроводниковые наноструктуры и наноматериалы.

Наноконпозиты, создаваемые на основе твердых тел с низкой σ_i , также уже 20 лет являются предметом многочисленных исследований ионники твердого тела [30]. В таких материалах, имеющих связную сетку границ ионный проводник/изолятор, σ_i демонстрирует порог протекания и может превышать объемную проводимость исходного материала в 100—1000 раз. Энергия активации проводимости вдоль межфазных границ оказывается равной $\sim 0,35 \text{ эВ}$ [31]. Это значение характерно также для объемной проводимости "плохих" СИП.

Проблеме обнаружения новых явлений и эффектов в наноразмерных СИП посвящено всего несколько работ [5—7, 32—34]. В [32] предложена концепция "Наноионика", которая является логическим развитием идеи "Микроионика", впервые в мире введенной в 1969 г. одним из первых энтузиастов тонкопленочных технологий в СССР проф. А. А. Василевским. Наноионика — раздел ионники твердого тела, имеющий в качестве предмета исследования новые свойства, явления, эффекты и практические приложения наноразмерных гетероструктур на основе суперионных проводников и твердых электролитов. В [32] описаны впервые для тонких пленок СИП семейства RbAg_4I_5 созданные методом прямой электронно-лучевой литографии [33] матричные наноструктуры — прототип емкостной твердоэлектролитной памяти высокой плотности.

В ионных проводниках на гетерограницах имеются области пространственного заряда с особыми физическими свойствами, шириной порядка дебаевского радиуса экранирования $L_D \sim n_i^{-1/2}$. Важно, что в СИП величина L_D чрезвычайно мала. Например, для СИП семейства RbAg_4I_5 , где концентра-

ция "парящих" над потенциальными барьерами подвижных ионов $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, двойной электрический слой, создаваемый этими ионами, будет иметь толщину $L_D \sim 0,5 \text{ нм}$. Размер иона меньше указанного значения, т. е. имеется основание применять формулу Дебая. Путем контролируемого влияния на области пространственного заряда "Наноионика" предлагает оперировать характеристиками наноструктур и наноприборов, создаваемых на основе СИП. Впервые в наноразмерных гетероструктурах на основе СИП эффект влияния внешнего электрического поля (управляемое воздействие) на процессы прямой электронно-лучевой литографии в тонких пленках RbAg_4I_5 описан в работе [34].

При концентрации "парящих" ионов $n_i \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ двойные электрические слои на границах СИП/электрод с емкостью $C \approx \epsilon S/L_D \sim 20 \text{ мкФ/см}^2$ (диэлектрическая проницаемость ϵ принимается ~ 1) должны формироваться за время $\sim 10^{-12} \text{ с}$. Полная концентрация ионов серебра в $\text{RbAg}_4\text{I}_5 \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$, а частота перескоков $\sim 10 \text{ ГГц}$, что говорит о возможности создания на основе СИП высокочастотных конденсаторов с удельной емкостью $C \gg 20 \text{ мкФ/см}^2$. Полагаем, что значений емкости $\sim 1000 \text{ мкФ/см}^2$ можно достичь созданием на поверхности электродов системы наноразмерных кристаллографических ступенек и/или фасеток, не нарушающих структуру гетерограниц. Энергия, которую смогут запастись суперконденсаторы на основе RbAg_4I_5 $E = CV^2/2 \approx 10^{-3}(0,5)^2/2 \approx 10^{-4} \text{ Дж}$. Если толщина пленки конденсатора $\sim 10^{-5} \text{ см}$, а средняя плотность его вещества 5 г/см^3 , то удельная энергия составит $\sim 2 \text{ Дж/г}$, т. е. в 20 раз меньше, чем у лучших таблеточных суперконденсаторов, использующих электроды из наноструктурированного углерода, жидкие электролиты и рабочее напряжение 3 В. Однако при повышении рабочего напряжения U пленочного конденсатора с 0,5 до 3 В, что возможно при использовании Li^+ -проводящих СИП с высокой σ_i , его удельная энергия должна возрасти более чем в 30 раз. Диаграмма соотношения удельной энергии и удельной мощности различных источников питания и конденсаторов показана на рис. 5 (см. вторую сторону обложки).

Развитие концепции "Наноионика" и пути создания новых типов твердоэлектролитных суперконденсаторов

Выполненные оценки емкости основаны на предположении, что кристаллическая структура в

слоях СИП, прилегающих к электроду, не имеет искажений. Однако на произвольно сформированных границах структура искажается [35, 36]. СИП с высокими значениями σ_i имеют кристаллическую структуру, оптимальную для быстрого ионного транспорта. Даже небольшие искажения структуры СИП должны сопровождаться заметным увеличением потенциальных барьеров для перескоков подвижных ионов, понижением электрической емкости границы, возрастанием времени перестройки двойного электрического слоя при изменении приложенного напряжения. Конденсаторные структуры, производимые без учета особенностей кристалло-химического соответствия на границе СИП/электрод, могут работать только в низкочастотных электрических цепях. В работе [37] обнаружено возрастание энергии активации σ_i в пленках RbAg_4I_5 толщиной менее 50 нм, что может быть связано с искажением кристаллической структуры СИП на границах. Поэтому чрезвычайно важными становятся методы, позволяющие определять эти искажения на атомном уровне, такие как электронная и аналитическая микроскопия высокого разрешения, ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия и спектроскопия характеристических потерь энергий электронов, рентгеновский энергодисперсионный анализ и др. Для практической реализации концепции "Наноионика", сформулированной впервые в работе [32], ее необходимо дополнить условием когерентности гетерограниц СИП/электрод.

В условиях сверхвысокого вакуума ($\sim 10^{-7}$ Па) на плоскости (001) Си методом гетероэпитаксии при скорости осаждения, примерно, один монослой в минуту получены пленки LiCl (001) толщиной 1–5 монослоев, у которых отсутствовали заметные искажения электронной и кристаллической структуры по сравнению с объемными образцами [38]. Создание аналогичных, т. е. совершенных по структуре гетеропереходов на основе СИП, например RbAg_4I_5 , позволит приступить к разработкам новых типов тонкопленочных высокочастотных суперконденсаторов.

Синтез пленок соединений семейств RbAg_4I_5 может быть выполнен в вакууме при температуре 70–100 °C [37], что позволяет формировать суперконденсаторы на заключительных этапах производства кремниевых чипов. Разработка на основе СИП высокочастотных суперконденсаторов с удельной емкостью ~ 100 мкФ/см² (1000 фФ/мкм²) может стать важным шагом на пути создания DRAM с плотностью 10 Гбит.

Инженерия межкристаллитных границ: от создания новых перспективных материалов к созданию новых перспективных приборов. Кристаллография межкристаллитных границ и возможности граничного дизайна

Производство многослойных эпитаксиальных композиций со сверхтонкими слоями требует разработки способов управления их свойствами в процессе изготовления, что предполагает знание взаимосвязи между микро- и макроструктурой. Межкристаллитные границы являются активным элементом эпитаксиальных пленочных композиций, определяя их физические свойства. Исследования в области межкристаллитных границ закладывают основы нового направления в создании материалов и приборов для микро- и нанoeлектроники (*interface engineering*) [3–7].

С макроскопической точки зрения два кристалла, соединенные межкристаллитной поверхностью раздела, могут различаться химической природой, структурой и относительной ориентацией. Эти факторы, действуя совместно или раздельно, формируют межфазные (гетеро-) и межзеренные (гомо-) границы, к которым относятся границы доменов, дефектов упаковки, дислокационные стенки и др.

С микроскопической точки зрения по Фриделю [39], межкристаллитные поверхности раздела можно разделить на два больших класса: 1) "кристаллографически широкие" диффузионные границы, структура которых изменяется непрерывным образом; 2) "кристаллографически узкие" границы, структура которых, если изменяется, то скачком, т. е. некогерентные и когерентные границы. В целом, отнесение межкристаллитных границ к когерентным, полуккогерентным или некогерентным зависит от рассматриваемых условий. Например, внешние воздействия (температура, давление, состав, электрические и магнитные поля и др.) могут при фазовых переходах переводить когерентные границы в некогерентные и наоборот. Поэтому для производства пленочных гетероструктур со стабильными прогнозируемыми характеристиками нужно с помощью внешних полей управлять процессами их формирования, учитывая кристаллохимические свойства сопрягающихся материалов. Межкристаллитные границы раздела (гомо- или гетерофазные) — сложные составные системы. Их симметрия в общем виде определяется принципом Шубникова—Кюри для составных систем [36, 40, 41]:

$$\Phi_c = (\cap \Phi_i) G^c, \quad (1)$$

где Φ_c — пространственная группа симметрии составной системы; Φ_i — пространственные группы симметрии частей; G^c — симметризатор системы.

Приборно-качественные пленки с высокими и стабильными электрическими свойствами должны

обладать совершенной структурой и высокой плотностью. Монокристаллические или крупнозернистые и текстурированные поликристаллические пленки с низкоэнергетическими границами высокой когерентности и плотности могут быть получены эпитаксиальным ростом. Тонкие пленки — сложные неравновесные системы с многовариантным типом поведения в процессе роста. Существуют многочисленные приемы (управляющие параметры) нанесения или выращивания пленок на подложках с различными кристаллохимическими и морфологическими особенностями поверхности, влияющими на процессы зарождения и роста. В зависимости от целей практического использования пленок различают "благоприятные" и "нежелательные" состояния получаемых пленок, а также "типичные" пути эволюции пленок при росте.

Состояние полного равновесия в пленках не достигается на всех временных масштабах роста и тип ростового процесса решающим образом определяется кинетикой, неравновесной термодинамикой и атомной структурой сопрягающихся кристаллов. Все перечисленные факторы и параметры управления ростом взаимозависимы. При таком их разнообразии достаточно разумно предположить, что в неравновесной самоорганизующейся системе пленка — подложка (в соответствии с принципом минимума производства энтропии) кинетически предпочтительны локальные электронно-пассивные, низкоэнергетические атомные конфигурации.

Эпитаксиальный рост монокристаллических слоев на неизоморфных подложках — наиболее общий метод получения многослойных структур в микроэлектронике. При эпитаксии ориентированный рост слоя вызывается анизотропным влиянием подложки, поэтому соотношения между симметрией подложки и эпитаксиального слоя определяются принципом Неймана—Кюри [36, 40]. При многоцентровом зарождении в отсутствие внешних ориентирующих сил, точечные группы симметрии подложки и эпитаксиальной пленки находятся в соотношении группа/подгруппа. Такое приближение не дает данных о взаимной ориентации пленка/подложка, если точечная симметрия подложки, описываемая одной из 10 двумерных точечных групп симметрии, сводится к оси первого порядка. Однако для подложек обычно используют имеющие наивысшую ретикулярную плотность и минимальную свободную энергию высоко-симметричные плоскости кристаллов высших и средних сингоний. Следует учитывать также возможность азимутального разворота и образования межфазных границ совпадения.

Любая межкристаллитная граница по сравнению с "идеальной" решеточной плоскостью внутри кристалла обладает избытком свободного объема

("пористость"), что облегчает встраивание атомов примеси и делает возможным выделение преципитатов. Указанные процессы наиболее характерны для разупорядоченных границ "общего типа". Среди всех гомо- и гетерофазных границ наряду с некогерентными, разупорядоченными границами "общего типа" выделяются низкоэнергетические специальные границы совпадения высокой когерентности [36, 41].

Специальные границы совпадения возникают при определенных углах θ (определяемых матричным оператором поворота $(R|\tau)$) разориентировки зерен (для гомофазных границ зерен) или при определенной взаимной ориентации фаз (для гетерофазных межфазных границ). При таких разориентировках возникают решетки совпадения (РС), образованные атомами, принадлежащими одновременно обеим решеткам. Основная характеристика специальной границы Σ_i — обратная плотность мест совпадения, т. е. отношение числа общих атомов в ячейке совпадения к числу всех атомов решетки 1 или решетки 2 в ячейке совпадения. Специальные ориентации $R|\tau$ и значения Σ_i определяются формулами:

$$\Phi_{PC} = \Phi_1 \cap (R|\tau)\Phi_2(R|\tau)^{-1}; \quad \Phi_i = TG^a; \quad (2)$$

$$T_{PC} = T_1 \cap (R|\tau)T_2(R|\tau)^{-1}; \quad (3)$$

$$\Sigma_i = \text{index}(T_{PC}/T_i), \quad (4)$$

где Φ_i , T_i , G_i ($i = 1, 2$), соответственно, пространственные Федоровские, трансляционные и точечные группы симметрии сопрягающихся кристаллов; Φ_{PC} , T_{PC} — пространственная Федоровская и трансляционная группы решетки совпадения.

Ориентированный рост пленок может осуществляться и для поликристаллических подложек. В этом случае также необходимо удовлетворять соотношению группа/подгруппа, но уже для полных пространственных групп симметрии растущего слоя и подложки. Необходимо также учитывать объемное трансляционное соответствие. Обычно это выполняется для наиболее симметричных кубических кристаллических решеток или для определенных текстур поликристаллических подложек более низкой симметрии.

В работах [42—46] разработан метод выбора сопрягающихся материалов и преимущественных по симметрии границ гетероэпитаксии. Суть метода заключается в определении группы пересечения общих точечных и трансляционных элементов симметрии пространственных групп кристаллов с учетом их взаимной разориентации, поиске на основе общих элементов симметрии граничных ориентаций, отвечающих плотной атомной упаковке и экстремуму свободной энергии. Метод включает: 1) определение преимущественных по сим-

метрии эпитаксиальных ориентационных соотношений пленка/подложка на основе решеточного сопряжения и экстремума энергии, определяемого симметрией [42–44]; 2) термодинамический анализ последовательности возникновения химических соединений и симметричный анализ гомологии преемственности структурных элементов в твердофазных реакциях, протекающих в системе на границе раздела.

Данный метод применяли в настоящей работе для поиска металлического электрода, образующего когерентную границу с СИП семейства RbAg_4I_5 . Наряду со структурным соответствием пространственных групп искали электрод химически индифферентный и идеально поляризуемый по отношению к СИП.

Хорошо известно, что атомная и электронная структура границ раздела тесно взаимосвязаны. При контакте двух материалов происходит перенос электронов через границу и искривление зон в приграничной области, обусловленные выравниванием уровней Ферми. Протяженность возникающей области пространственного заряда имеет порядок дебаевской длины экранирования $L_D \sim n^{-1/2}$, которая уменьшается с возрастанием концентрации n носителей тока в кристалле. В [47] рассмотрены особенности энергетических диаграмм для гетеропереходов металл/СИП. Вблизи поверхности раздела наряду с локальными искажениями кристаллической решетки (изменение длины связей и углов между ними) могут появляться ненасыщенные связи и выделение примесей, что может изменять зарядовое состояние границы. Фактически изгиб зон в граничной области оказывается зависимым от структуры и состава гетерограницы, что не учитывается в работе [47]. Манипулируя на атомном уровне межфазными силами, например, создавая совершенные по структуре кристаллографически узкие когерентные границы, или специально вводя на границу атомный слой третьего материала, можно целенаправленно регулировать изгиб зон.

В самом общем виде структура ион-проводящих сред на гетерогранице электрод/электролит может быть двух противоположных типов: 1) разупорядоченной, как в жидких электролитах или в твердых электролитах, контактирующих, например, с нанопористым кремнием или углеродом; 2) совершенной, с малыми нарушениями структуры, т. е. с параметрами, близкими к параметрам объемной кристаллической структуры СИП. Дизайн и исследование совершенных по структуре гетерограниц электрод/СИП — новое важное направление фундаментальных исследований в области ионики твердого тела. Получение гетеропереходов с когерентными границами — ключевой момент при создании новых типов приборов на основе СИП. Экс-

периментальные данные по когерентным границам электрод/СИП в настоящее время отсутствуют.

На практике получение совершенных (когерентных) границ раздела электрод/СИП означает, что емкость гетеропереходов может приближаться к предельно возможной $C \sim L_D^{-1} \sim n^{1/2}$, учитывая, что в СИП $n_i \geq 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Более того, соответствующий конденсатор будет работать на высоких частотах, так как в СИП прыжки подвижных ионов между соседними кристаллографическими позициями происходят за время $\sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$ и следовательно, такого же порядка должно быть время формирования двойного электрического слоя на границе. Тонкопленочные высокочастотные конденсаторы могут найти применение не только как резервные микроисточники энергии, но и как элементы интегральных схем микро- и наноэлектроники.

Состояние двойного электрического слоя на границе электрод/твердый электролит должно влиять на поверхностное натяжение в области границы и следовательно, на ее энергию. В случае жидких электролитов выполняется уравнение [48]:

$$d\gamma/d\phi = -q - dq/d\Omega, \quad (5)$$

где γ — поверхностное натяжение; ϕ — потенциал электрода; q — плотность заряда на электроде; Ω — относительная упругая деформация поверхности; $\gamma = \gamma(\phi, \Omega)$. В общем случае уравнение справедливо для анизотропного твердого тела (монокристалла); при этом γ и Ω — тензоры натяжения и деформации поверхности. При достаточно высокой симметрии, например на поверхности (100) ГЦК металла, а также для поликристаллических объектов, применима скалярная запись. Упругое растяжение металла вдоль поверхности уменьшает перекрытие между его атомными уровнями и, как следствие, усиливает связь поверхности с адсорбированными атомами, что отражается на величине $dq/d\Omega$. Наиболее чувствительны к расстоянию между атомами металла узкие d -зоны переходных металлов [48]. Например, при растяжении платины в условиях постоянного скачка потенциала на ее границе с жидким электролитом возрастает количество атомарного водорода, адсорбированного на единице площади. С ростом заполнения поверхности величина $dG/d\Omega$ при упругом растяжении возрастает (G — расход энергии на адсорбцию водорода). Таким образом, манипулируя внешними полями (например, деформационным) и применяя поверхностно-активные вещества можно изменять энергию, а следовательно, зарядовое состояние и емкость гетерограницы.

Осуществляя дизайн границ различных материалов можно проектировать гетеросопряжения с же-

лаемыми свойствами. Задача создания на базе пленок твердых электролитов-СИП стабильно работающих, быстродействующих микро(нано)конденсаторов высокой емкости несомненно требует особых усилий в области структурного дизайна границ раздела металл (полупроводник, диэлектрик)/СИП на нано- и атомном уровнях.

Создание новых типов конденсаторных структур на основе СИП

Кремний является основным функциональным и конструкционным материалом МСТ и микроэлектроники. Поэтому получаемые по низкотемпературной технологии на заключительных этапах формирования кремниевых чипов твердоэлектролитные конденсаторы с высокими удельными характеристиками найдут широкое применение.

В [49—52] описаны впервые разработанные тонкопленочные неполярные конденсаторы с гетеропереходами n^+Si/SiP семейства $RbAg_4I_5$. Прототип такого конденсатора — пленочная структура с гетеропереходом индифферентный электрод/СИП. При положительных потенциалах электрода прототип работает как полярный конденсатор, т. е. в области гетероперехода возникает двойной электрический слой, запасующий энергию электрического поля. При отрицательных потенциалах электрода на поверхности выделяется металлическое серебро. Выделению серебра в некотором интервале отрицательных потенциалов кремниевого электрода препятствует прослойка естественного оксида (2—3 нм) на гетерогранице n^+Si/SiP , что позволяет использовать такие структуры в цепях переменного тока. В последние годы в Японии на основе твердых электролитов разработаны конденсаторы таблеточного типа, конструкции которых включают тонкие пленки оксидов [53, 54].

Созданию высокеемких конденсаторов традиционного типа с металлическими или полупроводниковыми электродами и тонкими (2—3 нм) прослойками диэлектрика в межэлектродном зазоре препятствуют большие туннельные токи утечки. По своим электронным свойствам высокопроводящие твердые электролиты-СИП являются электронными диэлектриками. При положительном потенциале на электроде на гетерогранице электрод/СИП электрическое поле создается подвижными ионами, а туннельные токи отсутствуют, поскольку электронам валентной зоны СИП соответствуют заполненные изоэнергетические состояния электрода. Таким образом на основе структур электрод/диэлектрик/СИП с когерентными границами диэлектрик/СИП могут быть созданы быстродействующие конденсаторы с высокой удельной емкостью $\sim 10 \text{ мкФ/см}^2$. Рис. 6 (см. вторую сто-

рону обложки) дает представление о принципах работы твердоэлектролитных конденсаторов.

Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3.
2. Лапота В. А., Юревич Е. И. Мехатроника — основа интеллектуальной техники будущего // Микросистемная техника. 2003. № 1. С. 36.
3. Watanabe T. An approach to grain boundary design for strong and ductile polycrystals // Res. Mechanica. 1984. V. 11. P. 47—84.
4. Watanabe T. A new approach to grain boundary engineering for structural and functional materials in the 21st century // Int. Conf., "Interfaces in advanced materials", Book of abstracts, Chernogolovka, 26—30 May, 2003. P. 2.
5. Despotuli A. L., Andreeva A. V. Double-layer thin-film supercapacitors for nano-electro-mechanical systems (NEMS) // Proc. IARP International workshop "Micro Robots, Micro Machines, Micro Systems". Moscow. April 24—25, 2003. P. 129.
6. Andreeva A. V., Despotuli A. L. The interface design of thin film system based on solid state electrolyte ($RbAg_4I_5$) as a way towards supercapacitors // Int. Conf., "Interfaces in advanced materials", Book of abstracts, Chernogolovka, 26—30 May, 2003. P. 32.
7. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Тонкопленочные твердоэлектролитные суперконденсаторы для микро(нано)электроники и микросистемной техники // Материалы Международной научно-практической конференции INTERMATIC-2003, Москва, 9—12 июня 2003. С. 156.
8. Yoon Y. S., Cho W. I., Lim J. H., Choi D. J. Solid-state thin-film supercapacitor with ruthenium oxide and solid electrolyte thin film // J. Power Sources. 2001. V. 101. P. 126.
9. Ezhilvalavan S., Tseng T. Progress in the developments of (Ba, Sr)TiO₃ (BST) thin films for Gigabit era DRAMs // Materials Chemistry and Physics. 2000. V. 65. P. 227.
10. Воротилов К. А., Коханчик Л. С., Сигов А. С. Сегнетоэлектрические пленки титаната бария-стронция: микроструктура и электрофизические свойства // Микросистемная техника. 2002. № 6. С. 2.
11. Maboudian R. Surface process in MEMS technology // Surf. Sci. Rep. 1998. V. 30. P. 208.
12. Kang S., Yoon Jong-Gul, Noh T. W. Polarization dynamics and retention loss in fatigued $Pt/PbZr_{0.4}Ti_{0.6}O_3/Pt$ ferroelectric capacitors // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 248.
13. Пронин И. П., Кантелов Е. Ю., Гольцев А. В., Афанасьев В. П. Электромеханический подход к оптимизации параметра самополяризации в тонких пленках цирконата-титаната свинца // Микросистемная техника. 2003. № 4. С. 29—33.
14. Philpy S. C., Kamp D. A., Meester T. A. et al. Reliability of ferroelectric memory for high-rel and space application // http://www.cel-lis-semi.com/Technology_Papers/Celis_JPL_MRQ_Paper.pdf.
15. Jones R. E., Zurcher P., Chu P. et al. Memory application based on ferroelectric and high-permittivity dielectric thin films // Microelectronic Engineering. 1995. V. 29. P. 11.
16. Шурыгина В. Суперконденсаторы // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технологии, Бизнес. 2003. № 3. С. 20.
17. Астахов А., Карабанов С., Кухмистров Ю. Конденсаторы с двойным электрическим слоем // Радио. 1997. № 3. С. 57.
18. Астахов А., Карабанов С., Кухмистров Ю. Конденсаторы с двойным электрическим слоем // Радио. 1997. № 4. С. 57.
19. <http://www.skeleton-technologies.com>.
20. Nomoto S., Nakata H., Yoshioka K. et al. Advanced capacitor and their applications // J. Power Sources. 2001. V. 97—98. P. 807.
21. Conway B. E., Birss V., Wojtowicz J. The role and utilization of pseudocapacitance for energy storage by supercapacitors // J. Power Sources. 1997. V. 66. P. 1.
22. Conway B. E. Electrochemical supercapacitors. New York: Kluwer Academic. 1999.
23. Lim J. H., Choi D. J., Cho W. I., Yoon Y. S. RuO₂ sputtered thin film supercapacitor's performance as function of oxygen incorporation // J. Korean Phys. Soc. 2001. V. 39. P. S382.
24. Атовмян Л. О., Укше Е. А. Твердые электролиты. Проблемы кристаллохимии суперионных проводников // Физическая химия. Современные проблемы. М.: Химия, 1983. С. 92.
25. Owens B. B., Argue R. G. High-conductivity solid electrolytes: MAg_4I_5 // Science. 1967. V. 157. P. 308.

26. Geller S. Crystal structure of the solid electrolyte: RbAg_4I_5 // Science. 1967. V. 157. P. 310.
27. Bradley J. N., Greene P. D. Solids with high conductivity in group I halide systems // Trans. Faraday Soc. 1967. V. 63. P. 424.
28. Волков А. А., Козлов Г. В., Мирзоев Г. И., Гоффман В. Г. Субмиллиметровые колебательные спектры суперионного проводника RbAg_4I_5 // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. С. 182.
29. Di Salvo F. J. New and artificially structured electronic and magnetic materials // Advancing materials research. National Academy of Engineering and National Academy of Sciences, National Materials Advisory Board and Solid State Sciences Committee, National Research Council, P. A. Psaras, H. D. Langford, editors (1987); www.nap.edu/html/materials_and_man/0309036976/HTML/161-176.HTML/
30. Иванов-Шип А. К., Мури И. В. Ионика твердого тела. Т. 1. С.-Петербург: СПбГУ, 2000.
31. Jamnik J., Maier J. Defect chemistry and chemical transport involving interfaces // Solid State Ionics. 1999. V. 119. P. 191.
32. Despotuli A. L., Nikolaichik V. I. A step towards nanoionics // Solid State Ionics. 1993. V. 60. P. 275.
33. Nikolaichik V. I., Despotuli A. L. Electron beam writing in thin film of highly conducting solid electrolytes RbAg_4I_5 and $\text{CsAg}_4\text{Br}_3 - x\text{I}_2 + x$ // Phys. Mag. Lett. 1993. V. 67. P. 19.
34. Despotuli A. I., Shestakov A. A., Lichkova N. V. An external electric field effect in electron-beam lithography of RbAg_4I_5 solid electrolyte film // Solid State Ionics. 1994. V. 70/71. P. 130.
35. Ahn J., Rabalais J. W. Composition and structure of the Al_2O_3 (0001)-(1 × 1) surface // Surf. Sci. Rep. 1997. V. 388. P. 121.
36. Sutton A. P., Baluffi R. W. Interfaces in crystalline materials // Clarendon Press, Oxford, 1995. 819 P.
37. Деспотули А. Л., Личкова Н. В., Миненкова Н. А., Носенко С. В. Получение и некоторые свойства тонких пленок твердых электролитов $\text{CsAg}_4\text{Br}_3 - x\text{I}_2 + x$ и RbAg_4I_5 // Электрохимия. 1990. Т. 26. С. 1524.
38. Kiguchi M., Inoue H., Sasaki T. et al. Electronic structure of alkali halide-metal interface: $\text{LiCl}(001)/\text{Cu}(001)$ // Surf. Sci. 2003. V. 522. P. 84.
39. Friedel J. Dislocations and walls in crystals // NATO ASI, ed. R. Balian, M. Kleman, J.-P. Poirier, 1981, P. 5.
40. Шубников А. В., Копчик В. А. Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука, 1972. 340 с.
41. Андреева А. В. Симметрия структуры и ее проявление в свойствах гомо- и гетерофазных границ раздела кристаллов // Препринт ИПТМ АН СССР, Черноголовка, 1987. 73 с.
42. Андреева А. В. Симметрия междофазных границ: приложение к задачам гетероэпитаксии // Поверхность. Физика, химия, механика. 1990. № 46. С. 117.
43. Андреева А. В., Фирсова А. А. Симметрия междофазных границ: алгоритмы, программы, таблицы // Препринт ИПТМ АН СССР, Черноголовка, 1990. 44 с.
44. Andreeva A. V. The interface symmetry and heteroepitaxy // Material Science Forum. 1991. V. 69. P. 111.
45. Andreeva A. V., Meiler D. L. The interface symmetry and epitaxy in Ni/GaAs system // Crystal properties and preparation. 1991. V. 35–38. P. 358.
46. Andreeva A. V., Talijan N. M., Milutinovic A. et al. Interface design of high coercive sintered permanent magnets of the SmCo_5 -Type // <http://preprint.chemweb.com/CPS/>, inorgchem/0302001 (2003).
47. Bredikhin S., Hattory T., Ishigame M. Schottky barriers and their properties in superionic crystals // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 2444.
48. Гохштейн А. Я. Электролиз и поверхностные явления // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. С. 779.
49. Деспотули А. Л., Личкова Н. В. Конденсатор с двойным электрическим слоем // Патент РФ. № 2004024.
50. Деспотули А. Л., Личкова Н. В. Ионистор // Патент РФ. № 2012105.
51. Личкова Н. В., Деспотули А. Л., Загороднев В. Н., Миненкова Н. А. Твердый электролит // Авт. свид. СССР № 1697573.
52. Личкова Н. В., Деспотули А. Л., Загороднев В. Н. и др. Ионная проводимость твердых электролитов двух- и трехкомпонентных $\text{AgX}-\text{CsX}$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) стеклообразующих систем // Электрохимия. 1989. Т. 25. С. 1636.
53. Kamigawa H., Kishimoto Y., Kojima Y. et al. Solid electrolyte capacitor, and process and apparatus for producing same // Patent US. N 6362950.
54. Taketani Y., Yoshida K., Kamigawa H. et al. Solid electrolyte capacitor // Patent US. N 6313979.
55. Лачинов А. Н., Корнилов В. М. Электронная природа модификации поверхности в системе $\text{Si}-\text{SiO}_2$ // Микросистемная техника. 2003. № 4. С. 11–14.
56. Hass K. C., Schneider W. F., Curioni A., Andreoni W. The chemistry of water on alumina surface: Reaction dynamics from first principles // Science. 1998. V. 282. P. 265.

Продолжение статьи читайте в следующем номере.

УДК 53.087.92

С. А. Козин,
НИИФИ, г. Пенза

ТЕХНОЛОГИЯ МЭМС В РАЗРАБОТКАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Описаны интегральные датчики механических параметров, разработанные в Научно-исследовательском институте физических измерений (г. Пенза).

Научно-исследовательский институт физических измерений (НИИФИ) был основан в 1960 г. и является головным предприятием Российского авиационно-космического агентства, специализирующимся на разработке и поставке датчиков фи-

зических величин, промежуточных преобразователей и информационно-измерительных систем на их основе.

С середины 70-х годов прошлого века НИИФИ занимается разработкой полупроводниковых датчиков механических параметров для ракетно-космической техники и общепромышленного применения. В основе разработок заложены конструктивно-технологические решения (КТР) объемных микроэлектромеханических структур (МЭМС).

Типы интегральных датчиков по технологии МЭМС представлены в таблице.

Разработаны и освоены следующие базовые решения различных типов датчиков.

Датчики избыточного давления пьезорезисторные. В основе чувствительного элемента датчика типа ДДЭ-060 находится круглый плоский кремниевый кристалл, содержащий интегральные тензорезисторы мостовой схемы, и невоспринимаю-

26. Geller S. Crystal structure of the solid electrolyte: RbAg_4I_5 // Science. 1967. V. 157. P. 310.
27. Bradley J. N., Greene P. D. Solids with high conductivity in group I halide systems // Trans. Faraday Soc. 1967. V. 63. P. 424.
28. Волков А. А., Козлов Г. В., Мирзоев Г. И., Гоффман В. Г. Субмиллиметровые колебательные спектры суперионного проводника RbAg_4I_5 // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. С. 182.
29. Di Salvo F. J. New and artificially structured electronic and magnetic materials // Advancing materials research. National Academy of Engineering and National Academy of Sciences, National Materials Advisory Board and Solid State Sciences Committee, National Research Council, P. A. Psaras, H. D. Langford, editors (1987); www.nap.edu/html/materials_and_man/0309036976/HTML/161-176.HTML/
30. Иванов-Шип А. К., Мури И. В. Ионика твердого тела. Т. 1. С.-Петербург: СПбГУ, 2000.
31. Jamnik J., Maier J. Defect chemistry and chemical transport involving interfaces // Solid State Ionics. 1999. V. 119. P. 191.
32. Despotuli A. L., Nikolaichik V. I. A step towards nanoionics // Solid State Ionics. 1993. V. 60. P. 275.
33. Nikolaichik V. I., Despotuli A. L. Electron beam writing in thin film of highly conducting solid electrolytes RbAg_4I_5 and $\text{CsAg}_4\text{Br}_3 - x\text{I}_2 + x$ // Phys. Mag. Lett. 1993. V. 67. P. 19.
34. Despotuli A. I., Shestakov A. A., Lichkova N. V. An external electric field effect in electron-beam lithography of RbAg_4I_5 solid electrolyte film // Solid State Ionics. 1994. V. 70/71. P. 130.
35. Ahn J., Rabalais J. W. Composition and structure of the Al_2O_3 (0001)-(1 × 1) surface // Surf. Sci. Rep. 1997. V. 388. P. 121.
36. Sutton A. P., Baluffi R. W. Interfaces in crystalline materials // Clarendon Press, Oxford, 1995. 819 P.
37. Деспотули А. Л., Личкова Н. В., Миненкова Н. А., Носенко С. В. Получение и некоторые свойства тонких пленок твердых электролитов $\text{CsAg}_4\text{Br}_3 - x\text{I}_2 + x$ и RbAg_4I_5 // Электрохимия. 1990. Т. 26. С. 1524.
38. Kiguchi M., Inoue H., Sasaki T. et al. Electronic structure of alkali halide-metal interface: $\text{LiCl}(001)/\text{Cu}(001)$ // Surf. Sci. 2003. V. 522. P. 84.
39. Friedel J. Dislocations and walls in crystals // NATO ASI, ed. R. Balian, M. Kleman, J.-P. Poirier, 1981, P. 5.
40. Шубников А. В., Копчик В. А. Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука, 1972. 340 с.
41. Андреева А. В. Симметрия структуры и ее проявление в свойствах гомо- и гетерофазных границ раздела кристаллов // Препринт ИПТМ АН СССР, Черноголовка, 1987. 73 с.
42. Андреева А. В. Симметрия междофазных границ: приложение к задачам гетероэпитаксии // Поверхность. Физика, химия, механика. 1990. № 46. С. 117.
43. Андреева А. В., Фирсова А. А. Симметрия междофазных границ: алгоритмы, программы, таблицы // Препринт ИПТМ АН СССР, Черноголовка, 1990. 44 с.
44. Andreeva A. V. The interface symmetry and heteroepitaxy // Material Science Forum. 1991. V. 69. P. 111.
45. Andreeva A. V., Meiler D. L. The interface symmetry and epitaxy in Ni/GaAs system // Crystal properties and preparation. 1991. V. 35–38. P. 358.
46. Andreeva A. V., Talijan N. M., Milutinovic A. et al. Interface design of high coercive sintered permanent magnets of the SmCo_5 -Type // <http://preprint.chemweb.com/CPS/>, inorgchem/0302001 (2003).
47. Bredikhin S., Hattory T., Ishigame M. Schottky barriers and their properties in superionic crystals // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 2444.
48. Гохштейн А. Я. Электролиз и поверхностные явления // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. С. 779.
49. Деспотули А. Л., Личкова Н. В. Конденсатор с двойным электрическим слоем // Патент РФ. № 2004024.
50. Деспотули А. Л., Личкова Н. В. Ионистор // Патент РФ. № 2012105.
51. Личкова Н. В., Деспотули А. Л., Загороднев В. Н., Миненкова Н. А. Твердый электролит // Авт. свид. СССР № 1697573.
52. Личкова Н. В., Деспотули А. Л., Загороднев В. Н. и др. Ионная проводимость твердых электролитов двух- и трехкомпонентных $\text{AgX}-\text{CsX}$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) стеклообразующих систем // Электрохимия. 1989. Т. 25. С. 1636.
53. Kamigawa H., Kishimoto Y., Kojima Y. et al. Solid electrolyte capacitor, and process and apparatus for producing same // Patent US. N 6362950.
54. Taketani Y., Yoshida K., Kamigawa H. et al. Solid electrolyte capacitor // Patent US. N 6313979.
55. Лачинов А. Н., Корнилов В. М. Электронная природа модификации поверхности в системе $\text{Si}-\text{SiO}_2$ // Микросистемная техника. 2003. № 4. С. 11–14.
56. Hass K. C., Schneider W. F., Curioni A., Andreoni W. The chemistry of water on alumina surface: Reaction dynamics from first principles // Science. 1998. V. 282. P. 265.

Продолжение статьи читайте в следующем номере.

УДК 53.087.92

С. А. Козин,
НИИФИ, г. Пенза

ТЕХНОЛОГИЯ МЭМС В РАЗРАБОТКАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Описаны интегральные датчики механических параметров, разработанные в Научно-исследовательском институте физических измерений (г. Пенза).

Научно-исследовательский институт физических измерений (НИИФИ) был основан в 1960 г. и является головным предприятием Российского авиационно-космического агентства, специализирующимся на разработке и поставке датчиков фи-

зических величин, промежуточных преобразователей и информационно-измерительных систем на их основе.

С середины 70-х годов прошлого века НИИФИ занимается разработкой полупроводниковых датчиков механических параметров для ракетно-космической техники и общепромышленного применения. В основе разработок заложены конструктивно-технологические решения (КТР) объемных микроэлектромеханических структур (МЭМС).

Типы интегральных датчиков по технологии МЭМС представлены в таблице.

Разработаны и освоены следующие базовые решения различных типов датчиков.

Датчики избыточного давления пьезорезисторные. В основе чувствительного элемента датчика типа ДДЭ-060 находится круглый плоский кремниевый кристалл, содержащий интегральные тензорезисторы мостовой схемы, и невоспринимаю-

МЭМС-датчики	Типы датчиков	Диапазоны измерений	Габаритные размеры, масса
Избыточного давления пьезорезисторные	ДДЭ-060, ДДЭ-073, ДДЭ-082, ДДЭ-084, ДДЭ-096, ДДЭ-097, ДДЭ-114, ДДЭ-090, ДХП-096	0,01...300 МПа	Ø3,5...36 мм 5...130 г
Абсолютного давления пьезорезисторные	ДАЭ-099, ДАЭ-100	0,01...1 МПа	Ø16 мм 20...50 г
Абсолютного давления емкостные	ЧЭЭ-024.001	0,05...1 МПа	5×5 мм
Линейного ускорения пьезорезисторные	АЛЭ-037, АВЭ-001, АВЭ-002	$\pm(1000...100\ 000)$ м/с ²	24×24×8 мм 100 г
Линейного ускорения емкостные	АЛЕ-049, АЛЕ-050	$\pm(5,6...1200)$ м/с ²	35×35×22 мм 75 г
Угловой скорости (гироскоп) емкостные (МКС)	МВГ-11.039	100...1000 °/с	5×10 мм 5 г
Частоты вращения гальваномагнитные на магнитодиоде	Вг 1855, ОМ005	60...40 000 об/мин	Ø12 мм 100 г
Деформации пьезорезисторные	ЕВ	± 3000 мкм/м	5×5×0,05 мм

ций давление терморезистор схемы компенсации ухода чувствительности. Кристалл сформирован по планарной технологии и закреплен в металлическом корпусе с помощью ситаллоцемента.

По аналогичному решению созданы датчики для измерения давления до 300 МПа.

В основе датчика типа ДДЭ-097 находится двухслойный кремнево-стеклянный элемент, сформированный анодным соединением, который закреплен в керамическом внутреннем корпусе и натянут на металлическую мембрану.

Микромеханическая структура чувствительного элемента датчика типа ДДЭ-082 представляет собой кремнево-стеклянный узел, в котором стеклянный "тюльпан" с вплавленной металлической трубкой анодной посадкой герметично соединен с планарной поверхностью кристалла через адгезионное кольцо из поликристаллического кремния, нанесенного на кристалл поверх высоколегированных коммутационных шин из p^+ -кремния, соединяющих тензорезисторы, которые расположены на мембране, и контактные площадки, находящиеся на периферии кристалла (рис. 1).

Отличительной особенностью датчика типа ДХП-096 является его миниатюрность (диаметр

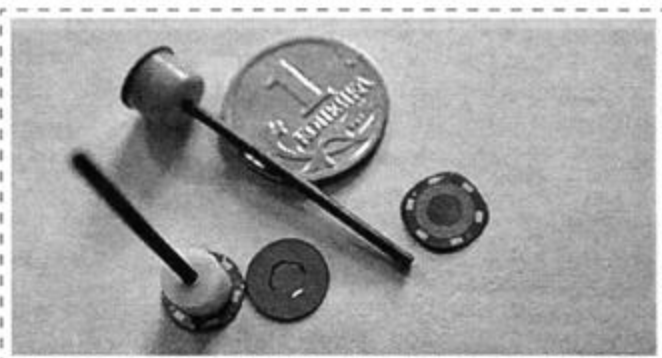


Рис. 1. Чувствительный элемент датчика ДДЭ-082

воспринимающей давление части 3,5 мм). Чувствительный элемент (ЧЭ) содержит профилированный кремниевый кристалл толщиной 100 мкм и Ø 2,5 мм с элементами жесткости на мембране, соединенный анодной посадкой со стеклянной бусой.

Основные этапы технологии кристалла датчика типа ДХП-096:

- формирование травлением профилированной заготовки (пластины кремния с утопленной до 100 мкм центральной частью);
- формирование анизотропным щелочным травлением профиля мембраны кристалла;
- формирование поэтапным ионным и диффузионным легированием термо- и тензорезисторов схемы;
- плазмохимическое травление кремния во фторсодержащей среде до разделения пластин на круглые кристаллы при защите металлическими масками.

Датчики абсолютного давления пьезорезисторные. В основе датчиков типа ДАЭ-100 находятся чувствительные элементы следующей структуры: профилированный кристалл, соединенный со стеклянной основой с образованием герметичной вакуумированной полости опорного давления (рис. 2).

Технология изготовления чувствительного элемента датчика абсолютного давления предусматривает групповое анодное соединение профилирован-

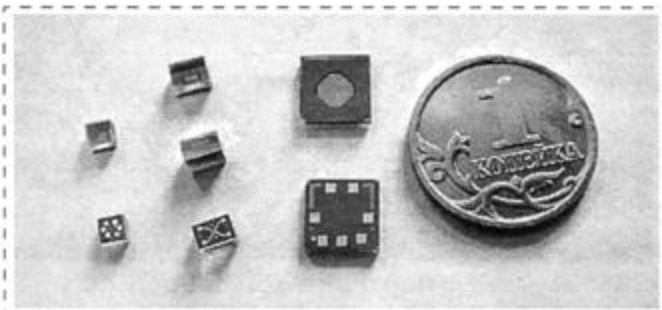
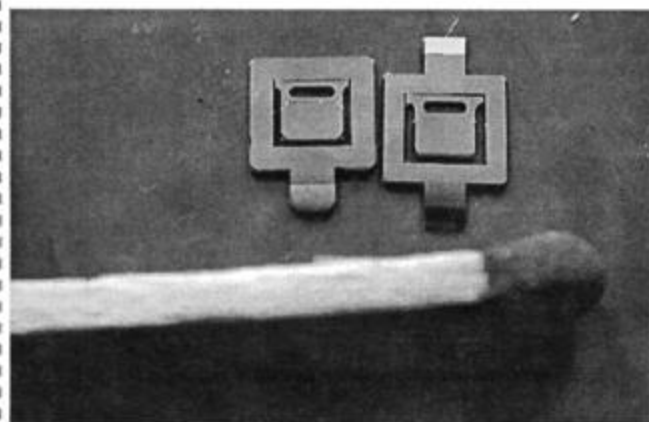
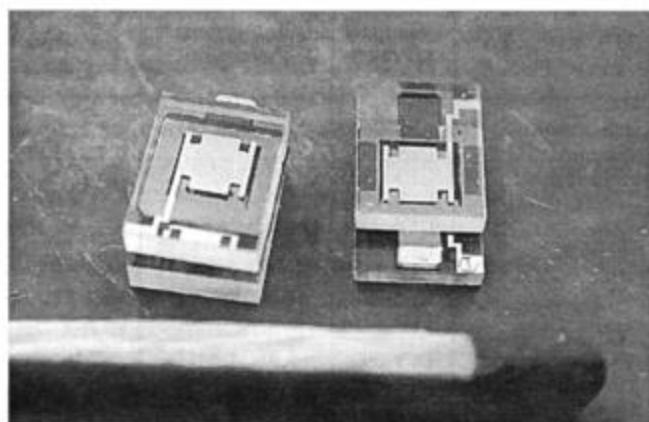


Рис. 2. Чувствительный элемент датчика ДАЭ-100



а)



б)

Рис. 3. Кремниевое-стеклянный элемент акселерометра АЛЕ-049

ной кремниевой и стеклянной пластин в вакууме с последующим разделением дисковой резкой. Благодаря использованию групповой технологии удалось достичь минимальных размеров (до 2×2 мм). За счет формирования контактов ЧЭ после создания вакуумированной полости возможно производство очень дешевых модулей абсолютного давления со столбиковыми выводами из припоя.

Датчики абсолютного давления емкостные. Особенности формирования микромеханической структуры модуля абсолютного давления емкостного типа являются: формирование групповой технологией на несущей стеклянной пластине сквозных отверстий; анодное присоединение к данной пластине рельефной кремниевой пластины; стравливание нерельефной части пластины до образования нижних емкостных обкладок; анодное присоединение в вакууме профилированной кремниевой пластины с верхними емкостными обкладками к несущей стеклянной пластине; разделение структуры на

отдельные модули; присоединение выводов к верхней обкладке и через отверстие в стекле к нижней обкладке.

Акселерометр линейных ускорений емкостной. Основные этапы технологии структуры кремниво-стеклянного элемента акселерометра типа АЛЕ-049 (рис. 3, а, б):

- формирование двусторонним размерным травлением трехрельефной структуры кристалла (с зазором 5 мкм);
- формирование металлизированных стеклянных плат;
- анодное соединение пакета ЧЭ.

Акселерометр линейных ускорений пьезорезисторный. Особенностью ЧЭ акселерометра типа АВЭ-002 является наличие двухуровневых консолей, удерживающих инерционную массу. В остальных конструктивно-технологические решения аналогичны емкостному ЧЭ (рис. 4).

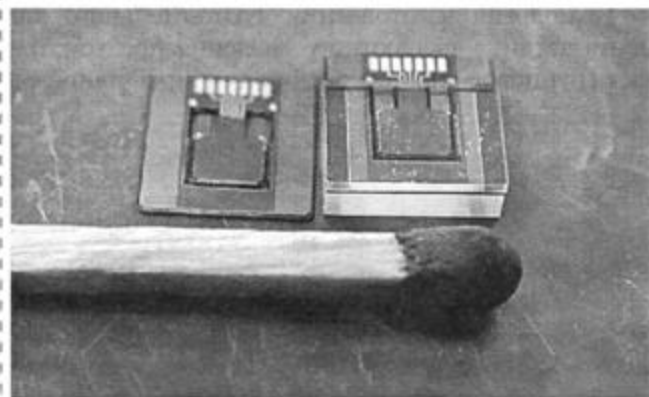


Рис. 4. Пьезорезисторный акселерометр линейных ускорений АВЭ-002

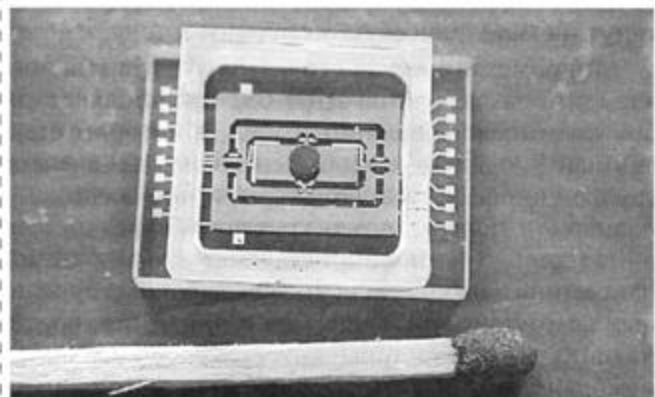


Рис. 5. Микроколебательная система датчика угловой скорости

Датчик угловой скорости (гироскоп). Работы по данному направлению находятся в развитии. На основе имеющегося технологического задела удалось освоить формирование требуемой конфигурации микроколебательной системы (МКС) (рис. 5).

МКС содержит следующие элементы:

- инерциальную механическую плату чувствительного элемента (ЧЭ), выполненного размерным травлением из монокристаллического кремния и содержащего две подвижные, подвешенные на консолях платы, которые являются обкладками емкостных датчиков силы и положения. Для повышения чувствительности центральная плата содержит двусторонний вольфрамовый груз, присоединенный к кремнию диффузионной сваркой;
- стеклянную плату-основание, содержащую выполненные по технологии напыления и фотолитографии пленочные алюминиевые емкостные обкладки датчиков силы и положения и коммутационные шины, а также глухое отверстие для перемещения массы;
- блок измерительный, содержащий сцентрированные по обкладкам емкостей датчиков механическую плату и плату-основание, которым соединены между собой методом электростатического соединения кремния и стекла; к плате-основанию с помощью стекла присоединен стеклянный корпус с обеспечением герметичности в области коммутационных шин;
- кремниевую крышку, присоединенную к корпусу с обеспечением вакуумирования, и кремниевую плату-развязку, присоединяемую к нижней плоскости основания и обеспечивающую исключение механических напряжений.

Конструкция МКС разработана НИИ ПМ (г. Москва), НИИФИ разрабатывает технологию изготовления МКС и подготавливает производство для выполнения опытных образцов и мелкосерийных поставок.

В настоящее время изготовлены экспериментальные образцы гироскопов, содержащих МКС и модуль аналоговой электроники, и проводится их отладка.

Датчик частоты вращения. Выполнен на основе модернизированного магнитодиода, разработанного ранее в МИЭТ (Зеленоград). Модернизированные конструктивно-технологические решения магнитодиода предусматривают легирование высокоомного кремния при пониженных температурах и формирование травлением локальных мезоструктур инжекционных областей диодов.

Датчик деформации. Датчики деформации выполнены в виде кремниевого тензорезистора на гибкой диэлектрической основе, в том числе со-

держающие встроенные интегральные датчики температуры.

Структура датчика: полиамидная пленка — кремниевый резистор толщиной 3...5 мкм — защитная пленка оксида — поликремниевый пленочный терморезистор.

Технология основана на "стоп"-травлении высоколегированных слоев кремния и использовании промежуточной защитной (несущей) пленки из металла.

В результате проведения работ по созданию новых технологий формирования кремниевых микрорезисторов механических систем для ЧЭ датчиков механических величин (акселерометров, датчиков скорости и др.) на сегодняшний день исследованы и отработаны следующие новые специальные технологические процессы:

- формирование прецизионным прямым травлением кремния многорельефных структур ЧЭ с минимальной высотой рельефа до 2 мкм;
- ориентированное травление кремния для обеспечения формирования структурных элементов ЧЭ с вертикальными стенками;
- плазмо-химическое травление кремния для профилирования и разделения кристаллов;
- формирование прецизионным травлением кремния X-образных элементов (консоль) в структуре ЧЭ;
- формирование методами гальванопластики технологических и конструктивных элементов структур ЧЭ;
- формирование методами легирования примеси и "стоп"-травления кремния элементов толщиной до 10 мкм с точностью $\pm 0,5$ мкм;
- формирование многослойных кремнево-стеклянных структур методом электростатического соединения;
- создание методами электростатического соединения кремния со стеклом вакуумно-плотных кремнево-стеклянных узлов ЧЭ;
- интегральная сборка ЧЭ с вакуумированными до $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. областями с обеспечением электрических гермовыводов из данных областей;
- формирование методами прецизионного анизотропного травления кремния кристаллов с точностью размеров мембран в профиле $\pm 15...25$ мкм;
- формирование тензорезисторов на кристалле с точностью их двустороннего совмещения с профилем не хуже $\pm 5...10$ мкм;
- формирование методами легирования примесью монокристаллических тензорезисторов и терморезисторов с электрофизическими параметрами, обеспечивающими температурную

компенсацию чувствительности в диапазоне температур $\pm 50^\circ\text{C}$;

- формирование кремниево-металло-стеклянных микросборочных узлов датчиков методами электростатического соединения, спекания и заливки, обеспечивающих герметизацию каналов подачи давления;
- создание кремниевых тензорезисторов толщиной 0,003...0,005 мм на основе высоколегированных кремниевых слоев с одновременным формированием над тензорезисторами пленки двуоксид кремния, обеспечивающей их защиту от влияния окружающей среды;
- соединение кремниевых тензорезисторов с гибкой диэлектрической основой с применением клеев, обеспечивающего их групповое формирование;
- формирование встроенного в кремниевые тензорезисторы на основе высоколегированных слоев интегрального терморезистора из пленки поликристаллического кремния, имеющего противоположный по знаку температурный коэффициент сопротивления по сравнению с тензорезисторами и обеспечивающего температурную компенсацию и расширение функциональных возможностей в части измерения температур;
- формирование методами размерного прецизионного травления кремния тензорезисторов в структурах КДК с размерами до 5...10 мкм;
- формирование структуры ЧЭ (мембрана-диэлектрик-тензорезисторы), имеющей низкие механические напряжения в рабочем диапазоне температур в обеспечении минимальных изменений начального выходного сигнала;
- формирование встроенных в кристалл ЧЭ интегральных схем для функциональной подгонки параметров при обеспечении минимизации начального выходного сигнала до ± 5 мВ и нормирование номинального выходного сигнала до $\pm 5\%$;
- формирование ЧЭ с двуполярной гальваноразвязкой тензосхемы от корпуса датчика вместо однополярной гальваноразвязки.

Освоенные техпроцессы позволяют разрабатывать и изготавливать ЧЭ датчиков механических величин со следующими основными характеристиками:

для акселерометров:

- диапазон измеряемых линейных ускорений 10...10 000 м/с^2 ;
- основная погрешность 0,01...0,1 м/с^2 ;

для датчиков угловой скорости (в стадии разработки):

- диапазон измеряемых угловых скоростей 10...10 000 $^\circ/\text{с}$;
- основная погрешность 0,1...10 $^\circ/\text{ч}$;

для датчиков давления:

- максимальная рабочая температура до $+200^\circ\text{C}$;
 - температурный уход чувствительности начального выходного сигнала до $+0,01...0,05\%/^\circ\text{C}$;
 - долговременная стабильность 0,1...0,2 %;
 - возможность работы в агрессивных средах на диапазонах давлений 5,0...10,0 МПа;
 - наличие двуполярной гальваноразвязки тензосхемы;
 - максимальная частота измеряемого переменного давления до 50 кГц;
 - минимальный диаметр датчика до 3 мм;
- #### для миниатюрных датчиков деформации:
- коэффициент тензочувствительности 10...50;
 - размер измерительной базы 0,5...1,0 мм;
 - габаритные размеры 2...4 мм;
 - наличие встроенного в ЧЭ измерителя температуры.

Таким образом имеющаяся в НИИФИ технология формирования объемных МЭМС обеспечивает создание широкой номенклатуры датчиков механических параметров.

Список литературы

1. Пат. 1431470 РФ. Тензометрический преобразователь и способ его изготовления.
2. Пат. 1459550 РФ. Способ изготовления кристаллов интегральных схем.
3. Пат. 2111576 РФ. Способ формирования рисунка в пленке двуокиси кремния на рельефной поверхности кремниевой пластины.
4. Пат. 2207658 РФ. Способ изготовления микромеханического чувствительного элемента емкостного типа.
5. Пат. 3 2200300 РФ. Полупроводниковый преобразователь деформации и способ его изготовления.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 004.083.8

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

МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СТИРАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ТЕРМОМАГНИТНОЙ ЗАПИСИ

Описаны модели процесса стирания на основе обоснованных статических и "самосогласованных" моделей терромагнитной записи. Выявлены причины несовпадения теоретически и экспериментально полученных данных, заключающиеся в неточности фиксации момента стирания из-за шумов в измерительной системе.

Стирание информации является сопутствующим процессом терромагнитной записи (ТМЗ) информации и является наиболее малоисследованным среди всех аспектов ТМЗ. О стирании информации нет упоминания в монографиях, затрагивающих вопросы оптической перезаписи [1–3], и в обзорных статьях [4, 5]. Неясность коснулась и стандарта [6] на оптические диски для ТМЗ, в котором приведен значительный разброс на значение поля стирания.

Явления, происходящие при стирании, будем рассматривать с позиции двух моделей записи [7], в соответствии с которыми поле стирания $H_{\text{стир}}$ зависит от поля записи $H_{\text{зап}}$, поэтому процесс стирания будет зависеть от магнитного поля записи и поля стирания.

Зависимость сигнала воспроизведения от поля стирания можно назвать *функцией передачи носителя для процесса стирания*. Критерии полного стирания для метода записи при нагреве за точку Кюри для моделей бинарного и непрерывного типов приведены ниже (a — область записи; H_T — поле насыщения носителя при ТМЗ):

Модель бинарного типа (МБТ). $H_{\text{стир}} > H_{\text{зап}}(a)$

Модель непрерывного типа

(МНТ). $H_{\text{стир}} > H_{\text{зап}}(a) + H_T$

Поле записи $H_{\text{зап}}$ зависит от размагничивающего поля $H_{\text{разм}}$, связанного с размером области записи a (геометрии записи), плотности и режимов записи.

Процесс стирания можно наблюдать по сигналу воспроизведения. Заменим в выражении для эффективности магнитооптического воспроизведе-

ния [7] намагниченность $M_{\text{зап}}/M_s$ функцией передачи носителя при записи:

$$M_{\text{зап}}(H_{\text{зап}}) = M_s \operatorname{th}\left(\frac{H_{\text{зап}}}{H_T} k_f\right) = M_s f_{if}(H_{\text{зап}}),$$

где k_f — коэффициент; M_s — намагниченность насыщения.

Приравнявая единице множители, связывающие сигнал воспроизведения с используемым магнитооптическим эффектом, получим функцию передачи по стиранию, которая для квадратичного воспроизведения будет иметь вид

$$\begin{aligned} TFE(H_{\text{зап}}, H_{\text{стир}}) &= \\ &= \sin^2(\varphi_s (1 + f_{if}(H_{\text{зап}} - H_{\text{стир}}))), \end{aligned} \quad (1)$$

где TEF — функция передачи по стиранию; φ_s — угол магнитооптического вращения носителя в состоянии магнитного насыщения.

Иногда удобно использовать передаточную функцию по стиранию в нормированном виде:

$$\begin{aligned} TFEN(H_{\text{зап}}, H_{\text{стир}}) &= \\ &= \frac{\sin^2(\varphi_s (1 + f_{if}(H_{\text{зап}} - H_{\text{стир}})))}{\sin^2(\varphi_s (1 + f_{if}(H_{\text{зап}})))}. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 1 приведена функция передачи носителя при записи, а на рис. 2 — нормированная функ-

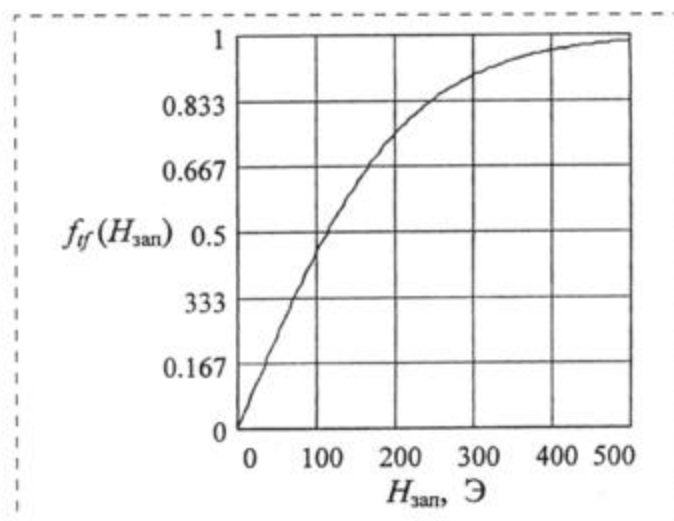


Рис. 1. Функция передачи носителя на основе TbFe при записи

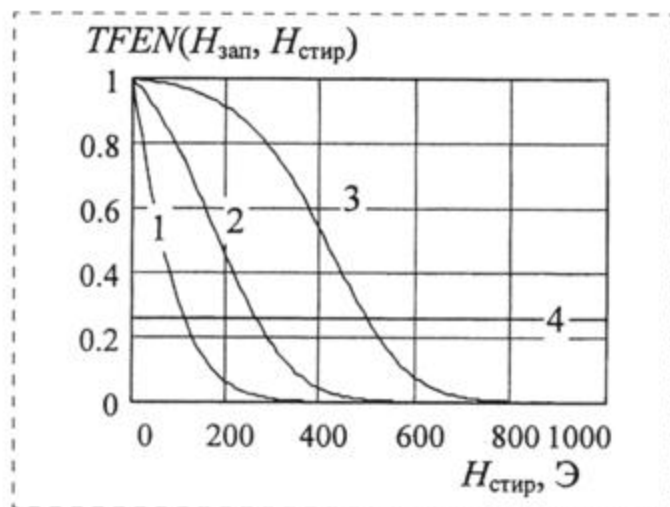


Рис. 2. Нормированная функция передачи по стиранию для магнитных полей записи $H_{\text{зап}}$, соответствию равных 1 — 0 Э, 2 — 250 Э, 3 — 500 Э, 4 — уровень шумов

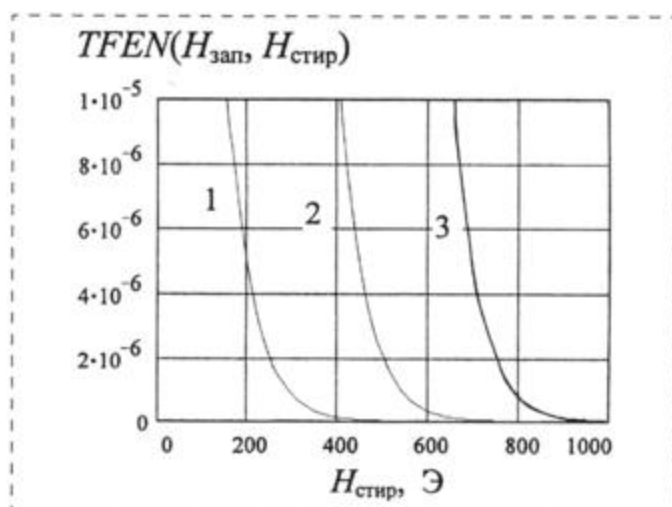


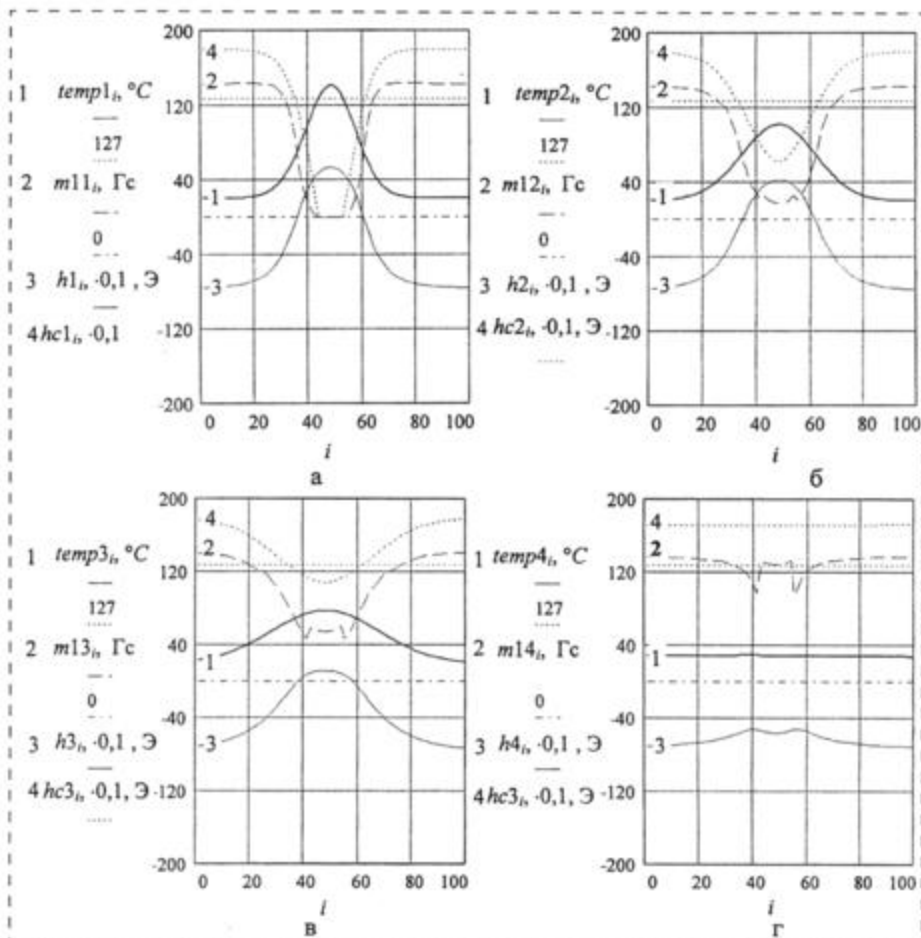
Рис. 3. Функция передачи по стиранию, построенная при приближении к моменту полного стирания

ция передачи по стиранию для носителя на основе соединения TbFe.

Кривые 1, 2, 3 на рис. 2 соответствуют полям записи соответственно 0, 250, 500 Э и описывают процесс стирания, характеризуемый уменьшением сигнала воспроизведения. Кривая 3 соответствует случаю, когда при ТМЗ приложено поле насыщения H_T , равное 500 Э. Все режимы записи и стирания описываются графическими зависимостями, лежащими между предельными кривыми 1 и 3. В соответствии с приведенными выше критериями полного стирания необходимо приложить магнитные поля, равные соответственно для зависимости 1 — $0 + H_T = 500$ Э, для 2 — $250 + H_T = 750$ Э, для 3 — $H_T + H_T = 1000$ Э. Из экстраполяции кривых на рис. 2 можно найти, что поля стирания принимают значения соответственно 360, 550 и 800 Э. Экспериментально полученные значения равны 200, 400 и 600 Э. Это свидетельствует о как бы недостаточной точности описания процессов стирания МНТ.

Рис. 4. Стирание перепадов намагниченности, записанных в носителе со смешанным типом записи (распределения температуры, намагниченности, размагничивающего поля, коэрцитивной силы):

а — в конце импульса записи; б, в, г — при остывании носителя



сируемое значение поля стирания будет тем меньше, чем больше будет уровень шумов в измерительной системе. На рис. 3 приведена функция передачи по стиранию (1), построенная при тех же параметрах, но при приближении к моменту полного стирания (нижняя часть графиков рис. 2) и, следовательно, "замаскированная" шумами.

Из анализа рис. 3 видно, что поля стирания в действительности равны соответственно 500, 750 и 1000 Э, и противоречия между измеренными значениями магнитных полей стирания и вытекающими из теоретической модели МНТ возникают из-за неточности определения момента полного стирания. Для полного стирания носителя необходимо прикладывать именно те значения полей, которые точно соответствуют МНТ.

Для увеличения точности фиксации момента стирания можно использовать сигнал воспроизведения для простого линейного способа воспроизведения и определить для него также функцию передачи

$$TFE(H_{\text{зап}}, H_{\text{стир}}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin(2\varphi_s(f_f(H_{\text{зап}} - H_{\text{стир}}))). \quad (3)$$

Использование "самосогласованного" метода анализа процессов стирания при ТМЗ, приведенного в [7], позволяет исследовать динамические процессы при стирании, особенно со смешанным типом записи, когда запись осуществляется при нагреве за точку Кюри и за счет температурного спада коэрцитивной силы.

На рис. 4 приведена картина динамических процессов при стирании информации на носителе со смешанным типом записи, движущегося со скоростью 10 м/с. Приложенное поле стирания равно 900 Э. Температура $temp_{k_i}$, намагниченность mlk_i , размагничивающее поле $h k_i$, коэрцитивная сила $h c k_i$ от номера i элемента разбиения носителя приведены в моменты времени наблюдения k при стирании информации. Длина элемента разбиения равна 0,05 мкм. Толщина носителя записи соответствует 0,1 мкм. Распределения указанных величин приведены в конце импульса стирания длительно-

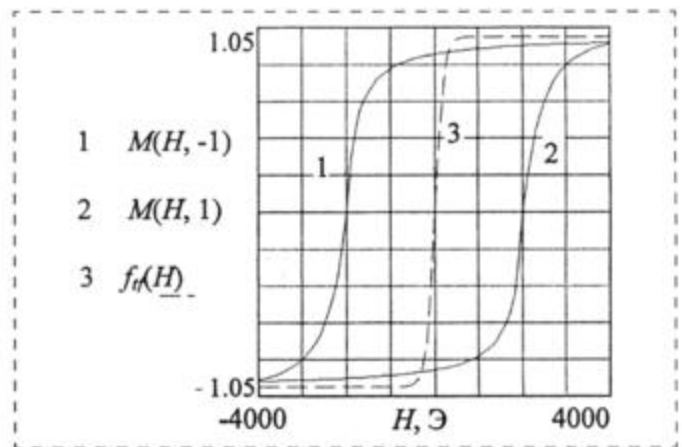


Рис. 5. Петля гистерезиса и функция передачи носителя

стью 200 нс. Перемагничивание (стирание) происходит в той зоне носителя, где поле стирания превышает сумму коэрцитивной силы и размагничивающего поля или сумму напряженности размагничивающего поля и поля насыщения при нагреве. Для уменьшения поля стирания следует также увеличить мощность записи.

Неполное стирание записанной области (рис. 4, з) объясняется "бесконечным" приближением к состоянию насыщения и различным характером ее переключения (по петле гистерезиса или по функции передачи $M(H)$) (рис. 5).

Список литературы

1. Китович В. В. Магнитные и магнитооптические оперативные запоминающие устройства. М.: Энергия, 1975. 432 с.
2. Рандошкин В. В. Прикладная магнитооптика / В. В. Рандошкин, А. Я. Червоненкис. М.: Энергоатомиздат, 1990. 300 с.
3. Звездин А. К. Магнитооптика тонких пленок / А. К. Звездин, В. А. Котов. М.: Наука, 1988. 190 с.
4. Майклджен У. М. Магнитооптическая запись // ТИИЭР. 1986. Т. 74. № 11. С. 112–125.
5. Буркова Л. В., Фролов Г. И. Аморфные пленки — новый материал для магнитооптической памяти // Зарубежная электронная техника. 1987. № 9. С. 3–68.
6. Стандарт ISO на магнитооптические диски. Document ISO/IEC JTC N 292 Oct. 25, 1989. Optical digital data disk. Final text of DP10089.
7. Слесарев Ю. Н. Термомагнитная запись для оптических дисковых накопителей информации. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 142 с.

УДК 621.3

Л. Ф. Фомин,
Институт проблем механики РАН, г. Москва

УПРАВЛЯЕМЫЕ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНЫХ МИКРОРОБОТОВ В ТРУБАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Исследуется движение микроэлектромеханических систем — колесных микророботов — по внутренним поверхностям произвольно расположенных в пространстве трубчатых сосудов с использованием в качестве прижимной силы центробежной силы, возникающей при движении любого тела по криволинейной траектории.

Введение

Всем известен цирковой аттракцион, когда каскадер на мотоцикле мчится по отвесной стене цилиндрического циркового манежа, удерживаемый от падения прижимающей его к стене центробежной силой прижима $F = mv^2/r$, возникающей при движении тела массой m со скоростью v по любому искривлению с радиусом кривизны r [1–3].

Например, для каскадера на мотоцикле при их общей массе $m = 200$ кг, движущегося со скоростью $v = 70$ км/ч по внутренней стене цилиндрического манежа радиуса $r = 10$ м, сила прижима к стене будет $F = 8$ кН или около 800 кгс. Следовательно, достаточно иметь коэффициент трения шины колеса со стеной $\mu > 0,25$, чтобы сила трения $f_{тр} = \mu F$ превосходила вес мотоцикла и удерживала его от скольжения вниз.

Цирковой манеж можно представлять себе как отрезок трубы такого же радиуса. Отсюда следует, что принцип использования центробежной силы может быть применен и для движения колесных транспортных средств внутри труб.

В предлагаемой работе рассматривается возможность использования центробежной силы, возникающей при движении тела по криволинейной траектории для самоперемещений микроэлектромеханических систем (МЭМС) — колесных микророботов по внутренним поверхностям трубчатых сосудов с криволинейными стенками. Подобные микроробототехнические устройства могут применяться для контроля, диагностики и чистки внутренних поверхностей трубопроводных систем промышленных установок, в атомной энергетике и химической промышленности.

В настоящее время во многих промышленно развитых странах уже выпускают электродвигатели

вращательного типа диаметром несколько миллиметров [4]. На основе разработок элементов микросистемотехники с применением современных новых технологий массового производства микросистем в ближайшие годы ожидается дальнейшая миниатюризация микроэлектродвигателей, микроприводов, элементов питания, сенсоров и систем управления. Создаваемые на основе подобных микросистем миниатюрные трехколесные или четырехколесные двускатные робототехнические транспортные устройства в зависимости от применяемого привода будут иметь объем от одного до нескольких кубических миллиметров и смогут перемещаться в сосудах диаметром менее 10 мм.

Постановка задачи

Целью предлагаемой работы является исследование самопродвижения колесных микророботов по внутренним поверхностям произвольно расположенных в пространстве пустых трубчатых сосудов.

Вводится неподвижная система прямоугольных координат X, Y, Z . Предполагается, что входным участком в пространственную трубчатую систему может быть прямой круговой цилиндр радиуса R , лежащий на плоскости X, Y . После входного участка кругового цилиндра следует идущая вверх изогнутая цилиндрическая трубка того же радиуса, состоящая из одного или двух участков, каждый из которых представляет собой половину тора, и переводящая путь следования в горизонтально расположенную цилиндрическую трубу радиуса R . Следующими участками трубчатой системы могут быть снова участки тора и участки горизонтальных, вертикальных или наклонных прямых круговых цилиндров, соединяемых участками горизонтальных, вертикальных или наклонных торов, а также участки некоторых других поверхностей вращения.

Уравнения участков трубчатой системы могут быть составлены в неподвижной системе координат X, Y, Z по правилу составления уравнений поверхностей вращения, как поверхностей, получающихся вращением меридиана вокруг оси вращения.

Согласно этому правилу, если в плоскостях XY, XZ, YZ меридианы заданы соответственно уравнениями

$$f(X, Y) = 0; \quad f(X, Z) = 0; \quad f(Y, Z) = 0,$$

тогда в неподвижной системе координат X, Y, Z уравнение поверхностей, образованных вращением

ем меридианов вокруг осей в соответствующей плоскости будут иметь вид

$$f[X, (Y^2 + Z^2)^{1/2}] = 0; \quad f[Y, (X^2 + Z^2)^{1/2}] = 0; \\ f[Z, (Y^2 + X^2)^{1/2}] = 0.$$

В соответствии с заданными законами управления на каждой из этих поверхностей микроробот будет передвигаться по некоторым траекториям. Основной характеристикой при выборе того или иного закона управления скоростью v движения микроробота для получения оптимальных значений прижимной центробежной силы $F = mv^2/r$ является уменьшение радиуса кривизны траектории r . Например, при движении по внутренней поверхности прямого кругового цилиндра радиуса R траектория может быть винтовой линией. При этом в случае отсутствия перемещений вдоль оси цилиндра при нулевом шаге винта микроробот будет двигаться просто по окружности радиуса R с максимально возможной кривизной траектории ($1/R$). При отличии от нуля шага винта кривизна траектории движения микроробота будет уменьшаться с увеличением шага винта и в пределе становится нулевой, а траектория превратится в прямую — одну из образующих цилиндра. В этом случае центробежная сила не может возникнуть.

Для определения кривизны произвольной траектории на внутренних поверхностях рассматриваемых трубчатых систем вводится регулярная параметризация $r = r(\alpha, \beta)$ таким образом, чтобы α, β были ортогональными криволинейными координатами, совпадающими с линиями кривизны рассматриваемых нами поверхностей вращения. При этом координатная линия α направлена по параллели поверхности вращения, а координатная линия β — по меридиану. В предлагаемой работе мы ограничимся рассмотрением движения колесных микророботов внутри прямых круговых цилиндров радиуса R , являющихся развертывающимися поверхностями, разверткой которых будет плоскость x, y .

На основании общих законов механики движение микроробота будет определяться движением некоторой его точки, рассматриваемой как полюс (например, его центра тяжести или любой другой точки) и движением микроробота вокруг этой точки как неподвижной.

В рассматриваемом нами случае движение полюса происходит по поверхности кругового цилиндра, радиус которого меньше R на значение расстояния полюса от поверхности трубчатого сосуда. Если система управления обеспечивает заданное движение микроробота по винтовой линии, то вращение вокруг полюса отсутствует и задача управления движением микроробота по заданной криволиней-

ной траектории сводится к поддержанию такого значения скорости полюса, при котором центробежная сила $F = mv^2/R$ значительно превышает вес микроробота mg и обеспечивает во все время движения требуемое сцепление в точках соприкосновения колес с поверхностью трубчатого сосуда.

Перейдем теперь к анализу рассматриваемой проблемы на основе методов аналитической механики.

Конструкция микроробота и анализ проблемы

Рассматривается микроэлектромеханическое устройство (МЭМС) — микроробот, представляющий собой четырехколесную конструкцию, основой которой является высокооборотный электродвигатель вращательного типа, устанавливаемый на продольной раме микроробота. Вращение ротора электродвигателя через ось, на конце которой установлен микродифференциал, передается на две задние полуоси, на них крепятся два ведущих задних колеса. На корпусе электродвигателя устанавливаются система управления и наблюдения и аккумуляторы питания. Включение и отключение электродвигателя осуществляется с помощью радиоуправляемого электромагнитного выключателя. К корпусу электродвигателя жестко крепится кронштейн с управляющей осью, на которой установлены два передних колеса. Повороты управляющей оси от нейтрального положения на фиксированный угол в одну и другую сторону осуществляются с помощью радиоуправляемого многопозиционного электромагнитного реле.

Два ведущих задних колеса имеют одинаковый радиус r_0 , каждое из них жестко связано с соответствующей задней полуосью, получающей вращение от микродифференциала, соединенного с осью вращения электродвигателя. Задние колеса, следовательно, могут вращаться с различными угловыми скоростями Ω_1 и Ω_2 , чем обеспечивается возможность управляемых поворотов микроробота без пробуксовок и проскальзывания в точках контакта колес с внутренней поверхностью трубчатых сосудов. Два передних колеса на управляющей оси имеют одинаковый радиус r_1 и могут свободно вращаться с разными угловыми скоростями Ω_3 и Ω_4 .

Для исследования поставленной задачи заменяем рассматриваемую конструкцию микроробота четырехколесной двускатной тележкой массы m , схема которой представлена на рисунке.

Основу тележки составляет жесткая рама $ABCD$ с шарниром управляющей оси в точке D . Система состоит из шести тел: жесткой рамы с задним скатом $ABCD$, переднего ската и четырех колес.

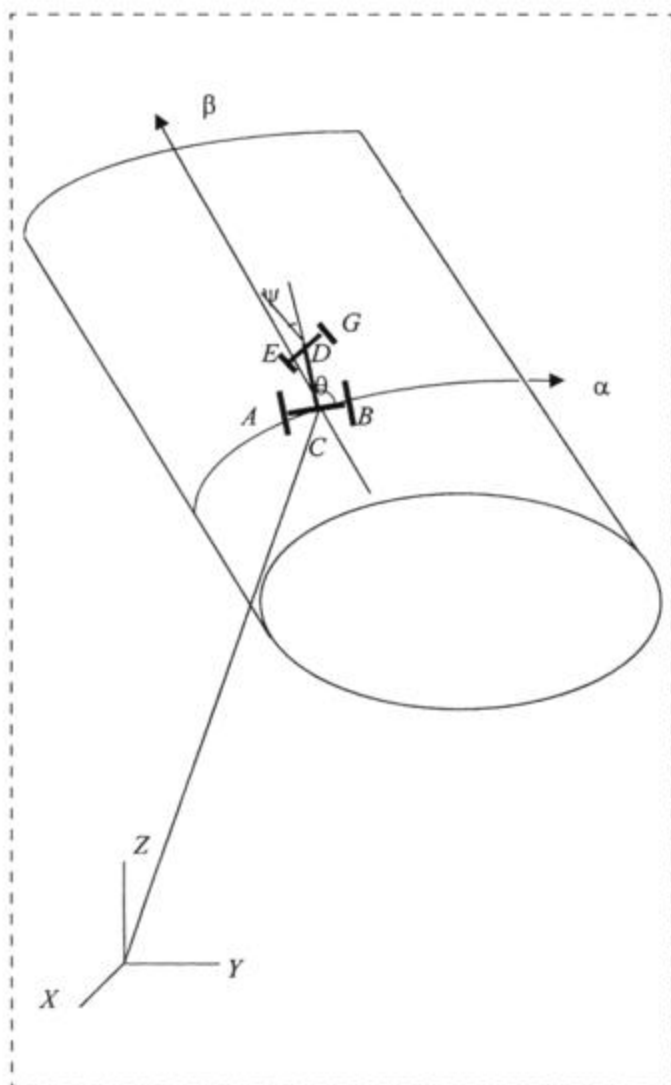


Схема движения двускатной тележки внутри трубы

Через m_0 , m_1 обозначаются массы заднего и переднего колес, через m_2 — масса рамы с задним скатом, а через m_3 — масса переднего ската.

При этом для длин соответствующих участков имеем:

$$AB = 2L_0; \quad CD = L; \quad EG = 2L_1.$$

Конфигурация тележки задается восемью обобщенными координатами q_i ($i = 1, \dots, 8$), за которые принимаются:

- криволинейные координаты α_D , β_D шарнира D:

$$q_1 = \alpha_D; \quad q_2 = \beta_D;$$

- угол θ между координатной линией α и продольной осью тележки:

$$q_3 = \theta;$$

- угол управления ψ , т. е. угол между перпендикуляром к управляющей оси EG и продольной осью тележки:

$$q_4 = \psi;$$

- углы поворота задних ведущих колес φ_1 , φ_2 :

$$q_5 = \varphi_1 = \Omega_1 t; \quad q_6 = \varphi_2 = \Omega_2 t;$$

- углы поворотов левого и правого передних колес φ_3 , φ_4 :

$$q_7 = \varphi_3 = \Omega_3 t; \quad q_8 = \varphi_4 = \Omega_4 t.$$

Для управляемого движения по внутренним поверхностям трубчатых сосудов двускатная тележка должна иметь две степени свободы. Число степеней свободы при этом определяется разностью между числом обобщенных координат n (в рассматриваемом нами случае $n = 8$) и числом накладываемых на систему связей.

Характер накладываемых на систему связей определяется значением центробежной силы, зависящим от массы тележки, скорости ее движения и радиуса кривизны ее траектории. При достаточном значении центробежной силы тележка будет двигаться без проскальзывания колес относительно поверхностей трубчатых сосудов.

При движении тележки по внутренним поверхностям трубчатых сосудов без проскальзывания и пробуксовки колес система будет иметь шесть неголономных связей, две из которых выражают отсутствие боковых составляющих скоростей точек C и D вдоль задней оси AB и передней оси EG , а остальные четыре выражают равенство нулю скоростей точек соприкосновения четырех колес с поверхностью трубчатых сосудов.

Следовательно, рассматриваемая тележка имеет две степени свободы и допускает управляемые движения по внутренним поверхностям трубчатых сосудов.

В аналитической механике выражения неголономных связей называют обычно квазискоростями ω_j . В нашем случае имеем шесть квазискоростей $\omega_1, \dots, \omega_6$, связанных с квазикоординатами $\pi_1, \dots, \pi_6$ условными соотношениями

$$d\pi_1/dt = \omega_1, \dots, d\pi_6/dt = \omega_6.$$

Уравнения неголономных связей через квазискорости ω_1, ω_2 , выражающие равенство нулю бо-

ковых составляющих скоростей точек C и D вдоль осей соответствующих скатов имеют вид:

$$\omega_1 = -(d\alpha/dt) \sin(\theta + \psi) + (d\beta/dt) \cos(\theta + \psi) = 0; \quad (1)$$

$$\omega_2 = -(d\alpha/dt) \sin\theta + (d\beta/dt) \cos\theta - L(d\theta/dt) = 0. \quad (2)$$

Для получения через квазискорости $\omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$ уравнений неголономных связей, выражающих отсутствие проскальзывания в точках контакта колес с поверхностями трубчатых сосудов, найдем прежде всего выражения для скоростей центров колес A, B, E, G :

$$v_A = (d\alpha/dt) \cos\theta + (d\beta/dt) \sin\theta - L_0(d\theta/dt);$$

$$v_B = (d\alpha/dt) \cos\theta + (d\beta/dt) \sin\theta + L_0(d\theta/dt);$$

$$v_E = (d\alpha/dt) \cos(\theta + \psi) + (d\beta/dt) \sin(\theta + \psi) - L_1(d\theta/dt + d\psi/dt);$$

$$v_G = (d\alpha/dt) \cos(\theta + \psi) + (d\beta/dt) \sin(\theta + \psi) + L_1(d\theta/dt + d\psi/dt).$$

Учитывая теперь значения мгновенных скоростей вращения центров колес относительно точек их соприкосновения с поверхностями трубчатых сосудов $r_0(d\phi_1/dt), r_0(d\phi_2/dt), r_1(d\phi_3/dt), r_1(d\phi_4/dt)$, для уравнений неголономных связей через квазискорости получим выражения:

$$\omega_3 = (d\alpha/dt) \cos\theta + (d\beta/dt) \sin\theta - L_0(d\theta/dt) - r_0(d\phi_1/dt) = 0; \quad (3)$$

$$\omega_4 = (d\alpha/dt) \cos\theta + (d\beta/dt) \sin\theta + L_0(d\theta/dt) - r_0(d\phi_2/dt) = 0; \quad (4)$$

$$\omega_5 = (d\alpha/dt) \cos(\theta + \psi) + (d\beta/dt) \sin(\theta + \psi) - L_1(d\theta/dt + d\psi/dt) - r_1(d\phi_3/dt) = 0; \quad (5)$$

$$\omega_6 = (d\alpha/dt) \cos(\theta + \psi) + (d\beta/dt) \sin(\theta + \psi) + L_1(d\theta/dt + d\psi/dt) - r_1(d\phi_4/dt) = 0. \quad (6)$$

Для удобства пользования матричным анализом введем еще две избыточные квазискорости ω_7, ω_8 . За ω_7 примем скорость v_D шарнира D , а за ω_8 скорость изменения угла поворота управляющей оси:

$$\omega_7 = v_D = (d\alpha/dt) \cos(\theta + \psi) + (d\beta/dt) \sin(\theta + \psi); \quad (7)$$

$$\omega_8 = (d\psi/dt). \quad (8)$$

Теперь мы имеем число квазискоростей $\omega_1, \dots, \omega_8$, равное числу обобщенных координат $q_1, \dots, q_8$ или обобщенных скоростей $dq_1/dt, \dots, dq_8/dt$, и можем записать матрицу коэффициентов a_{ij} выражений квазискоростей через обобщенные скорости в таком виде:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta + \psi) & \cos(\theta + \psi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & -L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & -L_0 & 0 & -r_0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & L_0 & 0 & 0 & -r_0 & 0 & 0 \\ \cos(\theta + \psi) & \sin(\theta + \psi) & -L_1 - L_1 & 0 & 0 & -r_1 & 0 & 0 \\ \cos(\theta + \psi) & \sin(\theta + \psi) & L_1 & L_1 & 0 & 0 & 0 & -r_1 \\ \cos(\theta + \psi) & \sin(\theta + \psi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Вычисление коэффициентов матрицы $\mathbf{b} = \mathbf{a}^{-1}$, обратной к матрице $\mathbf{a}$, можно выполнить непосредственно, выражая обобщенные координаты через квазискорости из формул (1)–(8).

После необходимых вычислений, обратную к $\mathbf{a}$ матрицу $\mathbf{b}$ запишем в таком виде:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta + \psi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\theta + \psi) & 0 \\ \cos(\theta + \psi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(\theta + \psi) & 0 \\ (1/L)\cos\psi & -1/L & 0 & 0 & 0 & 0 & (1/L)\sin\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -[\sin\psi + (L_0/L)\cos\psi]/r_0 & L_0/r_1 L & -1/r_1 & 0 & 0 & 0 & [\cos\psi - (L_0/L)\sin\psi]/r_0 & 0 \\ -[\sin\psi - (L_0/L)\cos\psi]/r_0 & L_0/r_1 L & 0 & -1/r_1 & 0 & 0 & [\cos\psi + (L_0/L)\sin\psi]/r_0 & 0 \\ -(L_1/r_1 L)\cos\psi & L_1/r_1 L & 0 & 0 & -1/r_1 & 0 & [1 - (L_1/L)\sin\psi]/r_1 & -L_1/r_1 \\ (L_1/r_1 L)\cos\psi & -L_1/r_1 L & 0 & 0 & 0 & -1/r_1 & [1 - (L_1/L)\sin\psi]/r_1 & -L_1/r_1 \end{bmatrix}$$

Для вывода уравнений и исследования рассматриваемых задач кроме коэффициентов матриц **a** и **b** необходимы трехиндексные символы Больцмана γ_{jm}^i , определяемые соотношениями

$$\gamma_{jm}^i = \sum_{k=1}^8 \sum_{s=1}^8 \left(\frac{\partial a_{ik}}{\partial q_s} - \frac{\partial a_{is}}{\partial q_k} \right) b_{sj} b_{km} \quad (i, j, m = 1, \dots, 8).$$

При выводе уравнений движения рассматриваемых нами задач необходимы будут значения следующих трехиндексных символов:

$$\begin{aligned} \gamma_{78}^1 &= -\gamma_{87}^1 = 1, \quad \gamma_{78}^i = 0 \quad (i = 2, \dots, 8), \quad (9) \\ \gamma_{17}^1 &= -\gamma_{71}^1 = -(1/L) \cos \psi, \quad \gamma_{27}^1 = -\gamma_{72}^1 = 1/L; \\ \gamma_{78}^1 &= -\gamma_{87}^1 = 1, \quad \gamma_{71}^2 = -\gamma_{17}^2 = 1/L; \\ \gamma_{12}^2 &= -\gamma_{21}^2 = (1/L) \sin \psi, \\ \gamma_{27}^2 &= -\gamma_{72}^2 = (1/L) \cos \psi, \\ \gamma_{12}^k &= -\gamma_{21}^k = (1/L) \cos \psi, \\ \gamma_{72}^k &= -\gamma_{27}^k = (1/L) \sin \psi \quad (k = 3, 4), \\ \gamma_{12}^k &= -\gamma_{21}^k = 1/L, \\ \gamma_{71}^k &= -\gamma_{17}^k = (1/L) \sin \psi, \quad \gamma_{81}^k = -\gamma_{18}^k = 1 \\ &\quad (k = 5, 6, 7, 8). \end{aligned}$$

Поскольку связи системы неголономны, то уравнения движения используются в форме уравнений Эйлера—Лагранжа через квазикоординаты π_i и квазискорости ω_i ($i = 1, \dots, 8$) с такими трехиндексными символами, в которых нижние индексы соответствуют номерам дополнительных избыточных квазискоростей ω_7, ω_8 , введенных по формулам (7), (8) и не обращающихся в нуль вследствие уравнений неголономных связей (1)–(6).

С учетом (9) уравнения Эйлера—Лагранжа через кинетическую энергию тележки T , вычисленную без учета неголономных связей, кинетическую энергию T^0 , вычисленную с учетом неголономных связей, обобщенную активную силу P_7 , включающую вращающий момент двигателя и силы сопротивления, и обобщенный вращающий момент рулевого управления P_8 , запишутся в виде

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega_7} - \frac{\partial T}{\partial \omega_1} \omega_8 - \frac{\partial T}{\partial \pi_7} &= P_7; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega_8} + \frac{\partial T}{\partial \omega_1} \omega_7 - \frac{\partial T}{\partial \pi_8} &= P_8. \end{aligned} \quad (10)$$

К ним присоединяются восемь кинематических соотношений, выражающих обобщенные скорости

dq_i/dt через квазискорости ω_i ($i = 1, \dots, 8$) с помощью коэффициентов матрицы **b**. Эти восемь кинематических соотношений также вычисляются двояким образом — с учетом неголономных связей (соответствующие величины отмечаются верхним индексом⁰) и без учета неголономных связей (соответствующие величины выписаны без верхнего индекса⁰).

Так, например, угловая скорость заднего ската относительно нормали к поверхности трубы, проходящей точку C , даст следующие уравнения:

$$\begin{aligned} (d\theta/dt)^0 &= (1/L)[\omega_1 \cos \psi + \omega_7 \sin \psi - \omega_2]; \\ d\theta/dt &= \omega_7 \sin \psi. \end{aligned}$$

Аналогично могут быть вычислены угловая скорость переднего ската относительно нормали к поверхности трубы, проходящей через точку D , скорости центров колес и их угловые скорости.

При вычислении кинетической энергии T неголономные связи не учитываются, они принимаются во внимание только при вычислении производных от кинетической энергии T по квазискоростям, т. е. при вычислении квазиимпульсов $p_1 = \partial T / \partial \omega_1$, $p_2 = \partial T / \partial \omega_7$, $p_1 = \partial T / \partial \omega_8$. Для нахождения производных от кинетической энергии по квазикоординатам $\partial T^0 / \partial \pi_7$, $\partial T^0 / \partial \pi_8$ кинетическая энергия T^0 вычисляется с учетом неголономных связей.

Выражение для кинетической энергии тележки составим в виде суммы кинетических энергий всех шести тел системы: рамы с задним скатом, переднего ската и четырех колес. При этом через J_0, J_1 обозначим моменты инерции задних и передних колес относительно их осей вращения, через J_C, J_D — моменты инерции колес относительно нормалей к поверхности трубчатого сосуда, проходящих через точки C, D , а через J_2, J_3 — моменты инерции заднего и переднего скатов относительно нормалей к поверхности, проходящих через точки C, D .

После необходимых вычислений, используя дополнительные обозначения

$$\begin{aligned} h &= (1/L)[J_3 + 2m_1 L_1^2 + 2J_D + J_1 L_1^2 / r_1^2]; \\ h_1 &= (1/L^2)[J_2 + J_3 + 2(J_C + J_D) + \\ &\quad + 2(m_0 L_0^2 + m_1 L_1^2)] - m_2 - 2m_0 + 2J_1 L_1^2 / L^2 r_1^2 - \\ &\quad - J_0(1 - L_0^2 / L^2); \\ h_2 &= m_2 + m_3 + 2(m_0 + m_1) + 2(J_0 / r_0^2 + J_1 / r_1^2), \end{aligned}$$

приходим к следующим уравнениям Эйлера—Лагранжа движения двускатной тележки:

$$\begin{aligned} (h_2 + h_1 \sin^2 \psi)(d\omega_7/dt) + h_1 \omega_7(d\psi/dt) \sin \psi \cos \psi + \\ + h(d^2 \psi / dt^2) \sin \psi = P_7; \quad (11) \\ (hL)d[d\psi/dt + (1/L)\omega_7 \sin \psi]/dt = P_8. \end{aligned}$$

Из уравнений (11) видим, что при движении тележки по заданной траектории (например, винтовой линии) без поворотов, когда $\psi = 0$, $d\psi/dt = 0$, тележка движется как система с одной степенью свободы. При этом сила тяги задних ведущих колес, возникающая вследствие условия сцепления колес с дорогой без проскальзывания, является реактивной силой, ее элементарная работа равна нулю и эта сила не входит в уравнения Эйлера—Лагранжа (11). Однако отсюда не следует, что конструкция микроробота может иметь лишь одну степень свободы. Так, например, если бы на задней оси микроробота был установлен электродвигатель с двусторонней осью, на которую насаживаются два задних ведущих колеса, вращающихся с одинаковой угловой скоростью, то число обобщенных координат сократилось бы до 7, а число неголономных связей при сохранении условия отсутствия проскальзывания в точках контакта осталось бы равным 6. Движение подобной системы по поверхностям возможно только при снятии условия об отсутствии проскальзывания в точках контакта.

Выводы и заключение

Задача управления движением четырехколесной двускатной тележки, перемещающейся по внутренним поверхностям трубчатых сосудов, произвольно расположенных в пространстве, приводится к нахождению таких возможных траекторий движения, следуя по которым действующие на те-

лежку центробежные силы достигают значений, достаточных для создания прижимных сил и сил трения, обеспечивающих устойчивое движение тележки по внутренним поверхностям сосудов. При этом при одной и той же массе m тележки и той же скорости v центробежная сила прижима возрастает с уменьшением радиуса трубчатого сосуда, по которому с большой скоростью может перемещаться колесная динамическая машина.

Это является важным преимуществом применения в микромеханике высокоскоростных колесных микророботов на основе использования центробежных сил.

Работа выполнялась в рамках Программы фундаментальных исследований РАН "Разработка фундаментальных основ машин динамического принципа действия" (Госконтракт № 10002-0251/ОЭММПУ-15/076-079/100603-595, а также при финансовой поддержке гранта РФФИ № 02-01-00205 "Управляемые движения миниатюрных роботов".

Список литературы

1. Аппель П. Теоретическая механика. М.: Физматгиз, 1960. Т. 1. 516 с.; Т. II. 488 с.
2. Бухгольц Н. Н. Основной курс теоретической механики. М.: Наука, 1965. Т. 1. 468 с.; Т. 2. 332 с.
3. Лурье А. И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
4. Shimoyama I., Yasuda T. et al. Mobile microrobots // Robotica. 1996. Vol. 14. N 5. P. 469—476.

УДК 65.011.56:608

А. Н. Соболев, д-р техн. наук,
Марийский государственный
технический университет

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ КАК ОСНОВА СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКИ

Рассмотрены вопросы, связанные с использованием физических эффектов при разработке структурных элементов микросистемотехники, и закономерности в системе физических объектов как методологической основы для решения технических задач.

Введение

Микросистемотехника относится к таким классам технических систем (ТС), которые характеризуются высокой концентрацией самых передовых

научных и технических достижений. Научные открытия, разнообразные физические эффекты (ФЭ), изображения, относящиеся к конструкциям и технологиям, — вот та основа, которая используется при создании элементов микросистемотехники. В связи с высокими темпами развития микросистемотехники и кратким жизненным циклом ее объектов наибольшее влияние на значение их эксплуатационных характеристик оказывают используемые ФЭ и физические объекты (вещества, материалы), на которых эти эффекты проявляются. Поэтому решение задач создания самых совершенных по характеристикам объектов микросистемотехники осуществимо только на основе использования физических эффектов, открытых в последнее время, или на основе новых сочетаний известных ФЭ.

Как правило, выбор физических эффектов для специалиста-разработчика невелик. Он ограничен преемственностью систем, опытом разработок в этой области и доступностью информации в при-

Из уравнений (11) видим, что при движении тележки по заданной траектории (например, винтовой линии) без поворотов, когда $\psi = 0$, $d\psi/dt = 0$, тележка движется как система с одной степенью свободы. При этом сила тяги задних ведущих колес, возникающая вследствие условия сцепления колес с дорогой без проскальзывания, является реактивной силой, ее элементарная работа равна нулю и эта сила не входит в уравнения Эйлера—Лагранжа (11). Однако отсюда не следует, что конструкция микроробота может иметь лишь одну степень свободы. Так, например, если бы на задней оси микроробота был установлен электродвигатель с двусторонней осью, на которую насаживаются два задних ведущих колеса, вращающихся с одинаковой угловой скоростью, то число обобщенных координат сократилось бы до 7, а число неголономных связей при сохранении условия отсутствия проскальзывания в точках контакта осталось бы равным 6. Движение подобной системы по поверхностям возможно только при снятии условия об отсутствии проскальзывания в точках контакта.

Выводы и заключение

Задача управления движением четырехколесной двускатной тележки, перемещающейся по внутренним поверхностям трубчатых сосудов, произвольно расположенных в пространстве, приводится к нахождению таких возможных траекторий движения, следуя по которым действующие на те-

лежку центробежные силы достигают значений, достаточных для создания прижимных сил и сил трения, обеспечивающих устойчивое движение тележки по внутренним поверхностям сосудов. При этом при одной и той же массе m тележки и той же скорости v центробежная сила прижима возрастает с уменьшением радиуса трубчатого сосуда, по которому с большой скоростью может перемещаться колесная динамическая машина.

Это является важным преимуществом применения в микромеханике высокоскоростных колесных микророботов на основе использования центробежных сил.

Работа выполнялась в рамках Программы фундаментальных исследований РАН "Разработка фундаментальных основ машин динамического принципа действия" (Госконтракт № 10002-0251/ОЭММПУ-15/076-079/100603-595, а также при финансовой поддержке гранта РФФИ № 02-01-00205 "Управляемые движения миниатюрных роботов".

Список литературы

1. Аппель П. Теоретическая механика. М.: Физматгиз, 1960. Т. 1. 516 с.; Т. II. 488 с.
2. Бухгольц Н. Н. Основной курс теоретической механики. М.: Наука, 1965. Т. 1. 468 с.; Т. 2. 332 с.
3. Лурье А. И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
4. Shimoyama I., Yasuda T. et al. Mobile microrobots // Robotica. 1996. Vol. 14. N 5. P. 469—476.

УДК 65.011.56:608

А. Н. Соболев, д-р техн. наук,
Марийский государственный
технический университет

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ КАК ОСНОВА СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСИСТЕМОТЕХНИКИ

Рассмотрены вопросы, связанные с использованием физических эффектов при разработке структурных элементов микросистемотехники, и закономерности в системе физических объектов как методологической основы для решения технических задач.

Введение

Микросистемотехника относится к таким классам технических систем (ТС), которые характеризуются высокой концентрацией самых передовых

научных и технических достижений. Научные открытия, разнообразные физические эффекты (ФЭ), изображения, относящиеся к конструкциям и технологиям, — вот та основа, которая используется при создании элементов микросистемотехники. В связи с высокими темпами развития микросистемотехники и кратким жизненным циклом ее объектов наибольшее влияние на значение их эксплуатационных характеристик оказывают используемые ФЭ и физические объекты (вещества, материалы), на которых эти эффекты проявляются. Поэтому решение задач создания самых совершенных по характеристикам объектов микросистемотехники осуществимо только на основе использования физических эффектов, открытых в последнее время, или на основе новых сочетаний известных ФЭ.

Как правило, выбор физических эффектов для специалиста-разработчика невелик. Он ограничен преемственностью систем, опытом разработок в этой области и доступностью информации в при-

емлемые сроки. В настоящее время в мировой науке отсутствует официальная регистрация открытых ФЭ, а информация о них публикуется в очень широком круге источников, при этом теоретические основы ФЭ публикуются в одних источниках, а описание их технической реализации — в других. Существуют также барьеры между ведомствами, организациями и предприятиями, которые занимаются как теоретическими, так и экспериментальными разработками по конкретным ФЭ.

Решение проблемы использования ФЭ при разработке технических систем привлекало внимание ученых и специалистов постоянно. Известен ряд работ [1—8], в которых изложены различные методологические подходы к решению конструкторско-технологических задач. Однако широкое распространение они не получили по следующим причинам: они ориентировались на использование неформализованных методов, не были вскрыты закономерности проявления и технической реализации ФЭ, отсутствовали приемлемые для практического использования базы данных по ФЭ.

Существенный вклад в решение этой проблемы сделан трудами коллектива Проблемной научно-исследовательской лаборатории математических методов оптимального проектирования Марийского государственного технического университета (г. Йошкар-Ола).

В результате выполненных научных исследований и разработок накоплен значительный объем информации по ФЭ, выявлены закономерности их проявления, образования и технической реализации, разработаны методы решения некоторых классов задач, связанных с выбором физической основы технических систем.

1. Модель физического эффекта

На основе закономерностей проявления ФЭ предложена следующая обобщенная модель физического эффекта [9]:

$$C_i = f(A_{\text{осн}}, A_{\text{доп}}, \langle b_1, b_2, \dots, b_n \rangle, t),$$

где C_i — параметры i -го результата воздействия; $A_{\text{осн}}, A_{\text{доп}}$ — параметры основного и дополнительного воздействий; $\langle b_1, b_2, \dots, b_n \rangle$ — кортеж параметров физического объекта B ; t — время, характеризующее стадии проявления ФЭ.

Для определения различных C_i должны использоваться разные модели ФЭ, при этом изменяемыми параметрами модели будут кортежи варьируемых параметров физического объекта B .

Модель ФЭ может изменяться при переходе с одного класса физических объектов на другой. Изменение также будет связано с изменением кортежа $\langle b_1, b_2, \dots, b_n \rangle$.

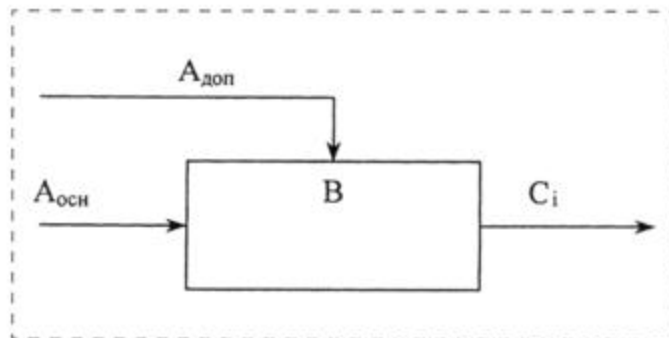


Рис. 1. Обобщенная схема физического эффекта

Из модели ФЭ следует, что результат воздействия C_i зависит от используемых марок веществ, материалов и других типов физических объектов, например, пленок, кластеров и т. д.

В соответствии с моделью каждый тип физического объекта (вещество, материал и т. д.) должен характеризоваться параметрами по отношению к воздействию (основному и дополнительному) и результатам воздействия, конструкторско-технологическими требованиями.

Модель ФЭ позволяет представить обобщенную схему ФЭ, которая приведена на рис. 1.

На схеме показаны основное и дополнительное воздействие ($A_{\text{осн}}, A_{\text{доп}}$), результат воздействия (C_i), физический объект (B).

Обобщенная схема ФЭ позволяет наглядно представить физическое преобразование, сравнивать ФЭ между собой, находить ФЭ по определенным признакам, строить цепочки, графы, сети физических преобразований. По своему функциональному назначению обобщенная схема ФЭ близка к условным обозначениям электрорадиоэлементов на электрических схемах.

2. Закономерности проявления физических эффектов

К закономерностям проявления ФЭ относятся следующие:

- ФЭ проявляются при переходе физической системы или ее элементов из одного устойчивого состояния в другое;
- проявление ФЭ осуществляется в три стадии: начальная стадия, связанная с приложением воздействия к физическому объекту; установившееся проявление результата воздействия; конечная стадия, связанная со снятием воздействия;
- воздействие и результат воздействия могут быть значительно разделены во времени;
- на один физический объект может быть оказано несколько воздействий;
- различные воздействия могут создавать один и тот же результат воздействия;

- при увеличении времени приложения воздействия проявление ряда ФЭ прекращается;
- при одном воздействии на физический объект может проявляться несколько различных результатов воздействия одновременно;
- результат воздействия может регулироваться;
- при постоянстве условий воздействия и свойств физического объекта проявляются одни и те же результаты воздействия, одни и те же значения их параметров;
- инерция в появлении результата воздействия и в его проявлении;
- на одном физическом объекте от разных воздействий могут проявляться различные ФЭ;
- на одном физическом объекте одновременно может проявляться несколько ФЭ.

Некоторые закономерности рассмотрены в работе [10].

3. Закономерности образования физических эффектов

Исследование базы данных по ФЭ позволило выявить, что наряду с принципиально отличающимися ФЭ имеются такие, которые близки по своей сущности. Кроме того, имеются ФЭ, подразделяющиеся на несколько разновидностей, например, эффект Холла (четыре разновидности), эффект Доплера (пять разновидностей) и др. Каждая из разновидностей ФЭ проявляется в определенных условиях, на конкретных типах физических объектов. Открытие таких ФЭ, как правило, носит случайный характер. Имеются ФЭ, которые отличаются друг от друга лишь проявлением в различных физических средах: твердой, жидкой, газообразной.

Физические эффекты могут образоваться за счет модификации воздействий:

- видоизменение воздействия $A_{осн}$ путем замены его характеристики;
- изменение интервала значений параметров воздействия $A_{осн}$;
- изменение характера приложения воздействия $A_{осн}$ к физическому объекту B ;
- уменьшение времени приложения воздействия;
- введение дополнительного воздействия $A_{доп}$;
- увеличение числа $A_{доп}$.

Образование ФЭ за счет модификации физического объекта:

- изменение физического объекта, на котором проявляется ФЭ, или его замена;
- замена одного физического объекта на систему физических объектов;
- придание физическому объекту определенной геометрической формы, конструктивных особенностей;

- замена физического объекта одного уровня иерархии на физический объект другого уровня иерархии;
- замена агрегатного состояния физического объекта;
- замена одного класса физических объектов на другой.

4. Образование иерархических уровней физических эффектов

Рассмотренные закономерности образования ФЭ позволяют, в свою очередь, образовывать группы ФЭ с несколькими уровнями иерархии.

На рис. 2 изображена схема образования иерархических уровней от эффекта поглощения света с указанием даты открытия ФЭ.

Переход с уровня 1 на уровень 2 осуществлен заменой характеристики воздействия — переходом на поляризованный свет. Чтобы осуществить та-



Рис. 2. Иерархическая схема эффектов поглощения света

кой переход, потребовалось 80 лет, хотя поляризация света была обнаружена Х. Гюйгенсом еще в 1690 г.

Переход с уровня 2 на уровень 3 связан с переходом на свет с круговой поляризацией. На это потребовалось около 100 лет!

Переход с уровня 3 на уровень 4 осуществлен за счет дополнительного воздействия — магнитного поля. Потребовалось тоже много времени — почти 80 лет.

И, наконец, переход на уровень 5 осуществлен за счет замены характеристики дополнительного воздействия — использования постоянного магнитного поля.

Подобные иерархические схемы построены по ФЭ, относящимся к электромагнитным излучениям (280 ФЭ) и звуковым излучениям (140 ФЭ).

Исследование образования иерархических схем ФЭ позволило выявить следующие закономерности:

1. Образование иерархических уровней за счет модификации более общих ФЭ (принцип от общего к частному).

2. Чем выше по иерархии расположен ФЭ, тем более общим он является, т. е. он лежит в основе всех ФЭ, расположенных ниже по иерархии.

3. Расширение состава ФЭ, принадлежащих одному уровню иерархии.

4. Образование иерархических уровней ФЭ и их расширение осуществляется с помощью приемов изменения воздействий ($A_{\text{осн}}$, $A_{\text{доп}}$) и физических объектов (B).

5. Модификация любого ФЭ вышестоящего уровня позволяет получить ФЭ нижестоящего уровня.

Использование закономерностей образования ФЭ возможно в следующих направлениях: систематизация ФЭ; прогнозирование новых ФЭ; выявление недостающих ФЭ при разработке БД; планирование научных исследований, направленных на открытие новых ФЭ; решение задач, связанных с синтезом физической основы ТС; прогнозирование развития ТС.

5. Группы физических эффектов

По характеру проявления ФЭ образуют следующие группы: ФЭ-проводники; ФЭ-модификаторы; ФЭ-преобразователи энергии и ФЭ-преобразователи физических объектов.

Первая группа — ФЭ, связанные с проводимостью определенного вида энергии. Например: электропроводность, светопроводимость, звукопроводимость и т. д.

ФЭ этой группы используют для обеспечения взаимосвязей между физическими объектами, на которых проявляются ФЭ-преобразователи.

Вторая группа — ФЭ, связанные с модификацией результата воздействия по отношению к воздействию без преобразования одного вида энергии в другой, например, эффект преломления звуковых волн, эффект фокусировки и дефокусировки света, поляризации и др.

ФЭ этой группы используются для согласования результата воздействия и воздействия у двух взаимосвязанных ФЭ. При этом результат воздействия и воздействие являются разновидностями одного физического поля и отличаются лишь характеристиками. Кроме того, они могут использоваться для модификации характеристики результата воздействия у конечного ФЭ в цепочке преобразований или характеристики воздействия у первого ФЭ.

Для каждого физического поля могут быть составлены списки характеристик. Эти списки в значительной мере пересекаются друг с другом.

Третья группа. В природе не может быть физического поля, которое не имело бы взаимосвязей с другими полями посредством ФЭ. Эти ФЭ связаны с преобразованием одного вида энергии в другой. Несмотря на небольшое число известных в настоящее время видов энергии, данная группа ФЭ довольно многочисленна, что определяется большим числом модификаций эффектов. Примеры ФЭ: фотоэлектрический, термоэлектрический, акустомагнитный эффекты и др.

Проявление ФЭ, обеспечивающих преобразование одних физических полей в другие, обуславливается наличием в составе физических объектов двух типов структурных элементов: структурные элементы, взаимодействующие с внешним воздействием, и структурные элементы, обладающие физическим полем, соответствующим результату воздействия.

Четвертая группа — ФЭ, связанные с преобразованием физического объекта B , которое может проявляться в следующем:

- изменении физических свойств: прозрачности, текучести, температуры, намагниченности и т. д.;
- изменение структуры: кристаллизация, переход от одной кристаллической структуры к другой, преобразование одних химических соединений в другие и т. п.;
- изменение агрегатного состояния: плавление, конденсация, сублимация, испарение и т. д.;
- изменение состава структурных элементов: деление и синтез молекул, атомов, ядер атомов и др.;
- изменение B может быть дискретным (замена одного физического объекта на другой) и непрерывным (изменение концентрации растворов, давления газов, состава газов и т. п.).

Изменение свойств физического объекта влияет, в свою очередь, на проявление других ФЭ на этом же физическом объекте.

6. Система физических эффектов и ее закономерности

Закономерности проявления ФЭ и их образования позволяют определить закономерности, присущие системе ФЭ. Одна из основных закономерностей — иерархия ФЭ.

Между результатом воздействия и воздействием любого ФЭ существуют причинно-следственные связи. Они отражают сущность физических процессов и взаимосвязи между структурными элементами физического объекта. Эти взаимосвязи реализуются посредством конкретных физических полей. Таким образом, происходящие в физическом объекте процессы и явления можно представить в виде взаимосвязанных ФЭ более низкого уровня иерархии.

Пример. Эффект генерации ударных волн в твердом высокомолекулярном диэлектрике (рис. 3).

Данный ФЭ может быть представлен в виде совокупности взаимосвязанных ФЭ более низкого уровня иерархии: эффект радиационного накопления заряда; эффект электропроводности; эффект Джоуля; эффект электрострикции; эффект теплового расширения.

Если взять, например, эффект электрострикции, то он также может быть представлен как совокупность взаимосвязанных ФЭ более низкого уровня иерархии.

На этом уровне представляется возможным увидеть все взаимосвязи между ФЭ (последовательность происходящих процессов), побочные результаты воздействия, структурные элементы объекта, на которых проявляются ФЭ более низкого уровня.

Процедура декомпозиции может быть продолжена и дальше. Она применима к любым ФЭ. Ог-

раничением может являться лишь недостаточность наших знаний.

На низких уровнях иерархии ФЭ носят фундаментальный характер. При этом, чем с меньшими объектами материального мира связано проявление ФЭ, тем в большем масштабе они проявляются.

Это подтверждается результатами анализа большого числа различных ФЭ.

На основе меньшего числа ФЭ более низкого уровня иерархии проявляется большее число ФЭ более высокого уровня иерархии. Это обуславливает возможность решения задачи синтеза ФЭ i -го уровня иерархии из ФЭ $(i + 1)$ -го уровня иерархии.

На макроуровне физические объекты характеризуются рядом конструктивных особенностей: макроструктурой, взаимосвязью и взаимным расположением структурных элементов, их геометрической формой, поэтому разновидности физических объектов на макроуровне весьма многочисленны. Верхние уровни иерархии связаны с технической реализацией ФЭ.

На микроуровне ФЭ проявляются на молекулах, атомах и их частях. Физические объекты отличаются значительно меньшим числом разновидностей. Таким образом, иерархия ФЭ взаимосвязана с иерархией физических объектов, т. е. ФЭ определенного уровня иерархии проявляются на физических объектах, соответствующих этому уровню иерархии. Совокупность ФЭ $(i + 1)$ -го уровня иерархии, образующая ФЭ i -го уровня иерархии, позволяет выделить совокупность физических объектов, образующих физический объект i -го уровня иерархии, обеспечивающего проявление ФЭ i -го уровня иерархии.

Эта закономерность обеспечивает решение задачи синтеза физического объекта для ФЭ i -го уровня иерархии из физических объектов, на которых проявляются ФЭ $(i + 1)$ -го уровня.

ФЭ, у которых воздействием $A_{осн}$ является одно и то же физическое поле, образуют подсистему ФЭ.

В каждую подсистему входят группы ФЭ: ФЭ-проводники; ФЭ-проводники-модификаторы; ФЭ-преобразователи; ФЭ-преобразователи физических объектов.

В каждую группу, в свою очередь, входят ФЭ, относящиеся к различным уровням иерархии.

Подсистемам ФЭ присущи одни и те же закономерности проявления и приемы модификации ФЭ.

Подсистемы различных физических полей образуют систему ФЭ.

Связь между подсистемами ФЭ осуществляется через ФЭ-преобразователи, $A_{доп}$ и физические объекты.

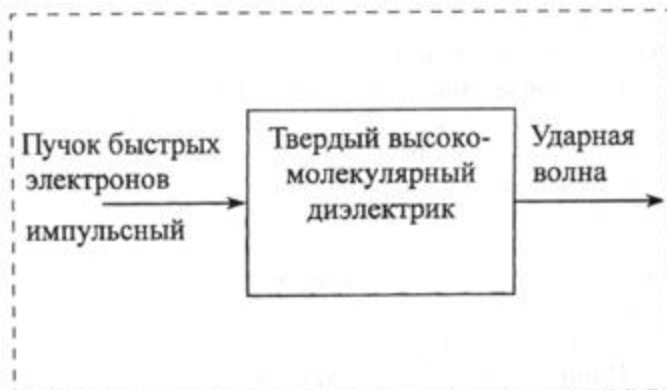


Рис. 3. Эффект генерации ударных волн в твердом высокомолекулярном диэлектрике

Между подсистемами ФЭ можно провести ряд аналогий: по ФЭ-проводникам с $A_{\text{доп}}$, по иерархии образования ФЭ, результатам воздействия, дополнительным воздействиям, агрегатным состояниям физических объектов и другим признакам.

Имеются и существенные различия между подсистемами, которые состоят в следующем:

- различное число иерархических уровней ФЭ;
- разный состав ФЭ на определенных уровнях;
- различия в физических объектах.

В совокупности система ФЭ позволяет осуществлять непрерывный и(или) дискретный процесс преобразования различных видов энергий и перехода их с одного уровня иерархии на другой.

7. Закономерности технической реализации физических эффектов

Исследование технических систем различных классов и назначения, технологических процессов, вариантов технической реализации отдельных ФЭ позволило выявить следующие закономерности их технической реализации:

- на нижнем уровне иерархии ТС ее элементы являются физическими объектами, на которых проявляются ФЭ, составляющие ее физическую основу;
- при технической реализации ФЭ физическому объекту придается определенная геометрическая форма;
- к физическому объекту определенной геометрической формы осуществляется пространственная привязка воздействий и результатов воздействий;
- одни и те же ФЭ технически могут быть реализованы на объектах, находящихся в различных агрегатных состояниях;
- одна и та же функция системы может быть реализована с помощью различных ФЭ, относящихся к разным группам;
- одна и та же функция объекта техники может быть реализована как с помощью одного ФЭ, так и с помощью совокупности взаимосвязанных ФЭ;
- часто встречающиеся в технической системе ФЭ или группы взаимосвязанных ФЭ, обеспечивающих реализацию определенных функций, технически реализуются в виде типовых структурных элементов ТС;
- существует взаимосвязь между параметрами ТС и параметрами ФЭ.

8. Основные напряжения использования физических эффектов в микросистемотехнике

Колоссальное число ТС, которые создавались и создаются человеком, основываются на сравни-

тельно небольшом числе известных ФЭ. Одни и те же ФЭ используются для достижения различных целей. Этим обуславливается многообразие областей их применения, среди которых в микросистемотехнике наиболее важную роль играют следующие: датчики контроля и измерения; микросистемы навигации, ориентации и управления движением; сенсорные микросистемы; робототехнические системы; микродатчики; наносистемы и нанотехнологии и др.

Рассмотрим некоторые из них.

Датчики для контроля и измерения физических величин. Данная область техники характеризуется высокой потребностью для контроля и измерения самых разнообразных физических величин и их сочетаний. Решение этих задач во многих случаях затруднено из-за жестких требований к функционированию средств измерения и контроля (высокая точность, надежность, тяжелые условия эксплуатации, низкая стоимость и др.), что связано с анализом большого числа возможных вариантов физической основы их реализации.

Во многих случаях измеряемые величины требуется преобразовать в некоторые другие, например, электрические. Это требует синтеза цепочек ФЭ, обеспечивающих заданные преобразования. Число возможных вариантов физической основы датчика при этом значительно возрастает. Наличие богатой по содержанию базы данных по ФЭ существенно упрощает процесс решения задач.

Робототехнические системы. В связи с тенденцией внедрения в робототехнические системы систем искусственного интеллекта и вычислительной техники потребовалось создание большого разнообразия чувствительных элементов, реагирующих на различные воздействующие факторы окружающей среды. Ужесточились требования к чувствительности, массово-габаритным характеристикам, к энергопотреблению и др. Это обуславливает переход на новые ФЭ.

Так, например, в качестве источника энергии для перемещения нанороботов используют световое излучение. Полимеры-хромофоры сжимаются и растягиваются под воздействием света.

Сенсорные микросистемы, сети. Они могут выполнять функции управления движением объектов в установленном пространстве, контроля за движением, борьбы с подвижными объектами и др. Обеспечение этих возможностей связано с использованием различных датчиков и исполнительных систем. В этих микросистемах важную роль будет играть рационально синтезированная система — совокупность взаимосвязанных ФЭ.

Наносистемы и нанотехнологии. Глубинные физические процессы, происходящие в наносистемах и нанотехнологиях, прямо связаны с ФЭ, которые

здесь проявляются. Важной особенностью является то, что здесь, как правило, проявляются ФЭ низших уровней иерархии, когда в качестве структурных элементов наносистем используются отдельные атомы, молекулы и группы атомов.

Есть ФЭ, которые проявляются только на наноразмерном уровне, например, эффекты квантовой механики, электродинамики, выстраивания атомов, размерные эффекты и др. Однако в описаниях ФЭ отсутствует информация о применимости их в нанотехнологиях, что создает значительные трудности для инженеров и научных работников. Устранить эти недостатки возможно на основе создания локальной базы данных — базы данных ФЭ для нанотехнологий, которая позволит сделать доступной информацию о нанотехнологиях для широкого круга специалистов. Этот вопрос рассмотрен в работах [11, 12].

Научно-техническое прогнозирование. Недостатком методов прогнозирования на основе патентно-технической информации является то, что они не могут учесть влияния возможного появления технических решений на новых принципах действия, не могут учесть влияния появления новых ФЭ. В свое время открытие ФЭ, связанных с генерацией когерентных электромагнитных излучений, в корне изменило состояние науки и техники во многих областях. Эти изменения нельзя было предвидеть, опираясь только на патентно-техническую информацию. Роль вновь открытого ФЭ еще до его технической реализации оказывается возможным определить во взаимосвязи с ФЭ, содержащимися в БД [13]. Такое прогнозирование позволит своевременно спланировать проведение необходимых научных исследований, разработку физических объектов (веществ, материалов) с требуемыми свойствами.

Учитывая тенденции развития микросистемной техники, можно отметить, что в процессе создания микросистем будет осуществлен переход от индивидуальной разработки датчиков, чувствительных элементов, измерителей, исполнительных устройств и других элементов к разработке систем, образованных этими элементами. Когда-то на заре радиоэлектроники разрабатывался каждый элемент, затем перешли к разработке систем элементов. А сейчас, в связи с развитием нанотехнологий, по видимому, будет осуществлен переход к созданию единой системы элементов.

Заключение

На основе системного подхода проведено исследование ФЭ. Установлено, что ФЭ образуют

систему. Выявлены закономерности в системе ФЭ, относящиеся к проявлению, образованию и их технической реализации, которые могут быть использованы при разработке теоретических основ применения ФЭ в микросистемной технике.

Выявленные закономерности в системе ФЭ позволяют целенаправленно модифицировать известные ФЭ, обеспечивая требуемые свойства, прогнозировать открытие новых ФЭ, осуществлять синтез моделей ФЭ, формализовать решение задач по синтезу физической основы элементов микросистемной техники и осуществлять экспертную оценку физической реализуемости принципиально новых технических решений.

Список литературы

1. Зарипов М. Ф., Никонов А. И., Петрова И. Ю. Элементы теории информационных моделей преобразователей с распределенными параметрами. Уфа: Изд-во БФАН СССР. 1983. 156 с.
2. Хасанов П. Ф. и др. Графовые модели физических явлений, эффектов и законов // Изв. АН УзССР. Сер. Физ.-мат. науки. 1977. № 5. С. 75—81.
3. Ходжаев С. С. О физических основах построения элементов автоматики // Сб. материалов по итогам НИР инж.-физ. ф-та Ташкентского ПИ. Т. 136. Вып. 52. Ташкент, 1974. С. 52—56.
4. Шварц К., Гольдфарб Т. Поиски закономерностей в физическом мире: Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 357 с.
5. Ardenne M., Musiol G., Reball S. Effekte der Physik. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1988. 287 p.
6. Koller R. Konstruktions-methode für den Maschinen-, Geräte- und Apparatenbau. Berlin—Heidelberg—New York: Springer-Verlag, 1976. 184 s.
7. Rodenacker W. G. Methodisches Konstruieren: Regeln und Beispiele. Mainz: Krausskopf-Verlag, 1972. 288 s.
8. Schubert Y. Physikalische Effekte: Anwendung, Beschreibungen, Tabellen. Weinheim: Physik-Verlag, 1982. 137 s.
9. Соболев А. Н. Об одной модели физических эффектов и ее практической реализации в автоматизированном проектировании // Математическое моделирование и программное обеспечение в САПР: Межвуз. сб. Горький: ГТУ, 1984. С. 109—118.
10. Соболев А. Н. О некоторых закономерностях проявления, образования и технической реализации физических эффектов // Труды Науч. конф. по итогам науч.-исслед. работ МарГТУ. 3—7 апр. 2000 г. Секция "Информационные методы, технологии и системы". Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. С. 3—23. — Деп. в ВИНТИ 29.06.2000. № 1846—В00.
11. Физические эффекты в нанотехнологиях: Учебное пособие / А. Н. Соболев, В. И. Галочкин, Г. Н. Аврамчик, Н. П. Бурмистрова. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. 184 с.
12. Соболев А. Н. О методологии конструирования измерительной техники в области нанотехнологий // В XXI век — с новыми принципами построения аппаратуры: Тез. докл. юбилейной науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию ННИПИ "Кварц". 14—15 сент. 1999 г. Н. Новгород, 1999. С. 92—95.
13. Соболев А. Н. Об одном методе прогнозирования новых физических эффектов // Труды науч. конф. по итогам науч.-исслед. работ МарГТУ. Секция "Автоматизация проектирования". 20—22 апреля 1998 г. Йошкар-Ола, 1998. С. 17—20. — Деп. в ВИНТИ 25.09.98. № 2858—В98.

УДК 519.711.2

М. Б. Богонин,
Пензенский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИДКОСТНОГО АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

Рассмотрены этапы создания динамической модели анизотропного травления кремния, реализованной средствами вычислительной техники. Показаны результаты сходимости модели с реальным технологическим процессом.

Анизотропное жидкостное травление полупроводниковых материалов, в частности кремния, применяется в технологии приборостроения для формирования прецизионных фигур с определенной формой микропрофиля. Широкое распространение эта технология получила из-за своей относительной дешевизны и возможности групповой обработки деталей и узлов микромеханики.

Несмотря на распространенность данной технологии в большинстве случаев разработчики вынуждены пользоваться стандартными фигурами упреждения и параметрами технологических процессов для достижения желаемых результатов. Это объясняется, в первую очередь, анизотропными свойствами конструктивных и функциональных материалов микромеханики, которые затрудняют расчеты по определению необходимых технологических параметров. К тому же процесс жидкостного, а также плазмохимического травления, как правило, замкнут и, соответственно, постоянный контроль за линейными размерами получаемых образцов не всегда возможен.

Литература по химическому травлению многочисленна, однако имеющиеся данные разбросаны по отдельным статьям и книгам, касающимся металлургии полупроводников, гониометрии и исследования различных электрических свойств, особенно поверхностной рекомбинации и поверхностной электропроводности. При этом систематическому

изучению данного процесса посвящено очень мало работ [1].

Разработка математических моделей анизотропного травления позволит снять ограничения на проектирование и изготовление нестандартных микромеханических узлов и конструкций. Сложность моделирования анизотропного травления в основном определена большим числом параметров технологического процесса, к которым относятся:

- состав травителя;
- концентрация травителя;
- температура реакции;
- скорость отвода продуктов реакции;
- геометрия образца;
- кристаллографическая ориентация образца;
- время травления.

К сложности моделирования также можно отнести и отсутствие в литературе полного описания функции скорости травления в необходимом кристаллографическом направлении для опреде-

ленного травителя и материала. Например, в [4] для скорости травления материалов выведено следующее выражение:

$$U = \frac{\beta_m K_R C_S C_X \exp[-E(\alpha)/(RT)]}{\beta_m C_S + K_R C_X \exp[-E(\alpha)/(RT)]},$$

где β_m — коэффициент массопереноса реагента; C_X — концентрация химсорбированных частиц; C_S — концентрация насыщенного раствора у поверхности твердого тела; K_R — константа равновесия; $E(\alpha)$ — энергия активации реакции травления; α — кристаллографическое направление вектора травления.

Энергия активации реакции травления $E(\alpha)$ определяется эмпирически.

На сегодняшний день как $E(\alpha)$, так и для скорости травления анизотропных сред в определенных кристаллографических направлениях определяют опытным путем [2, 3]. Скорости травления для различных кристаллографических ориентаций кремниевых пластин достаточно подробно представлены в [3] в виде диаграмм анизотропии скоростей травления (рис. 1). Они дают возможность построения модели анизотропного травления на их основе, поскольку несут в себе ряд важных параметров технологического процесса, а именно:

- тип травителя;
- концентрацию травителя;
- температуру травителя;

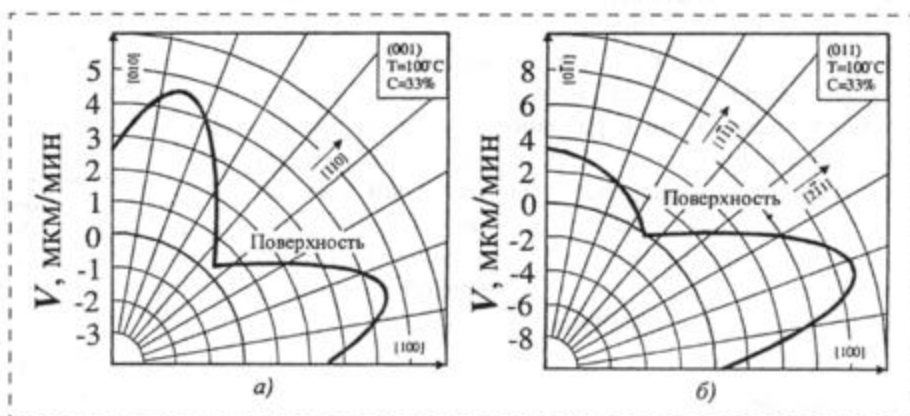


Рис. 1. Диаграмма анизотропии скорости травления кремния в 33 %-ном КОН при 100 °С. Кристаллографическая ориентация пластины: а — (001); б — (011)

- кристаллографическую ориентацию пластины кремния.

Разработанная модель анизотропного травления кремния представляет собой последовательный расчет изменения геометрии фигуры травления. Входными данными для расчетов являются:

- линейные размеры фигуры травления;
- диаграмма анизотропии скоростей травления для необходимой кристаллографической ориентации пластины, типа травителя, его температуры и концентрации.

Расчет выполняется в несколько этапов.

1. Определение направленности вектора скорости травления:

$$\alpha = \pi + \frac{Y_i - Y_{i+1}}{X_i - X_{i+1}},$$

где X_i , Y_i — векторы, определяющие геометрическое положение узловых точек фигуры травления; i — номер грани, для которой выполняется расчет, $i \in [1; k]$; k — число рассчитываемых граней фигуры травления, может изменяться в связи с перекрытием граней в процессе травления [3].

2. Определение модуля вектора скорости травления в направлении α :

$$V(\alpha) = \left(\frac{V_{j+1} - V_j}{\alpha_j - \alpha_{j+1}} (\alpha - \alpha_j) + V_j \right) \frac{t}{60},$$

где V_j — вектор значений модулей скоростей травления (дискретное описание диаграммы анизотропии скоростей травления); α_j — соответствующие направления векторов скоростей травления ($\alpha_j \leq \alpha \leq \alpha_{j+1}$) по диаграмме анизотропии скоростей травления; t — время травления в минутах.

3. Изменение геометрического места точек поверхности фигуры в соответствии с полученными данными по пп. 1, 2:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + V(\alpha) \cos(\alpha); \\ Y_{i+1} &= Y_i + V(\alpha) \sin(\alpha); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + V(\alpha) \cos(\alpha); \\ Y_{i+1} &= Y_i + V(\alpha) \sin(\alpha). \end{aligned}$$

4. Определение перекрывающихся граней и удаление их из последующих расчетов.

Нетрудно заметить, что представленная модель, несмотря на свою простоту, требует большого количества вычислительных операций, число которых прямо пропорционально размеру векторов X_i , Y_i , V_j . Также следует учесть произвольный характер поверхности образца, который приводит к дополнительным расчетам модуля скорости травления (п. 2), и достаточно трудоемкое определение граней, вышедших из дальнейших расчетов. Исходя из этого, становится очевидным, что построение работоспособной и пригодной для использования модели выгоднее всего проводить средствами электронно-вычислительной техники.

Для этого были разработаны алгоритмы, реализующие представленную модель, на основе которых была написана программа на языке *Object Pascal*, которая обладает рядом потребительских свойств:

- загрузка произвольной фигуры травления в векторы X_i , Y_i , причем линейные размеры задаются с точностью до 0,01 мкм, при этом размер векторов не ограничен;
- загрузка произвольного травителя в вектор V_j , объем которого также не ограничен. Точность описания диаграммы анизотропии пропорциональна числу модулей векторов скоростей травления. Разрешенность значений мкм/мин;

- определение разработчиком временных интервалов единичного шага расчета модели;
- пошаговые и циклические расчеты геометрии фигуры травления;
- замена травителей в процессе травления, что часто применяется на практике;
- визуализация динамики изменения геометрии образца;
- произвольное масштабирование выбранных областей;
- выгрузка полученной фигуры во внешние файлы.

Следует отметить, что использование диаграмм анизотропии скоростей травления как базиса для проведения моделирования позволяет применять также изотропные травители, которые используют на практике для химической полировки материалов.

Результаты моделирования можно представить в виде "слепков рабочего окна" программы динамического моделирования при использовании диаграммы анизотропии скоростей травления (диаметр окна маски круглой формы диаметром 1000 мкм) при следующих технологических режимах (рис. 2):

- пластины кремния ориентации (001);
- травитель КОН 33 % при 100 °С.

При этом нетрудно заметить эффект автоторможения растворения физического тела в анизотропном травителе ($t = 72$ мин).

Ввиду объектной ориентированности языка *Object Pascal* разработанная программа легко модифицируется для необходимых целей. Например, для иллюстрации динамики изменения геомет-

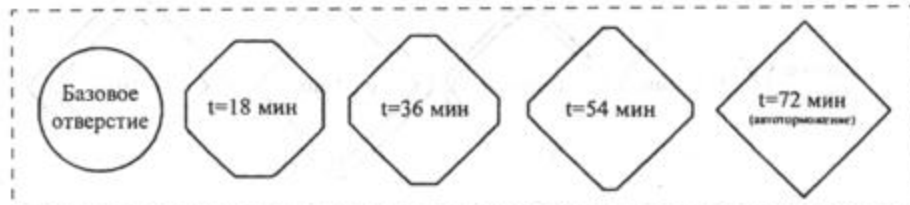


Рис. 2. Динамика изменения геометрии фигуры травления, рассчитанная средствами разработанного прототипа модели

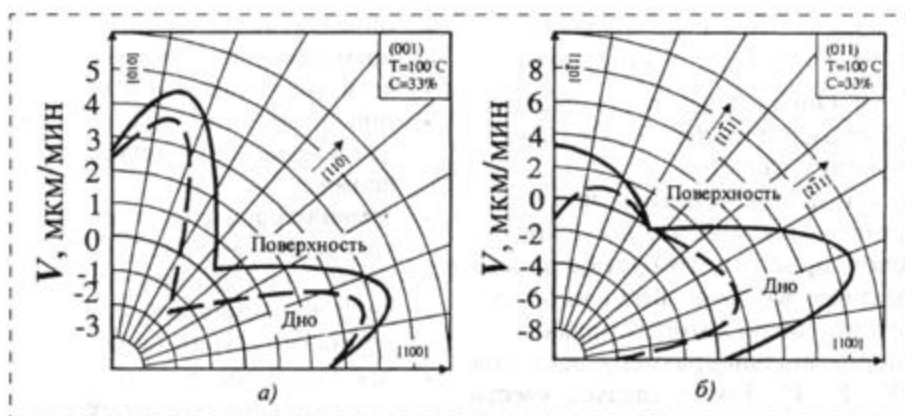


Рис. 3. Диаграмма анизотропии скоростей травления по поверхности кремниевой пластины и по дну лунки травления в 33 %-ном КОН при 100 °С. Кристаллографическая ориентация пластины:

а — (001); б — (011)

рии пластины кремния для маски круглой формы были использованы наиболее полные диаграммы анизотропии скоростей травления (рис. 3), на которых верхней кривой обозначены скорости травления по поверхности пластины, а внутренней кривой — по дну лунки травления [3].

Полученные результаты при использовании травителя КОН 33 % при 100 °С для пластины с ориентацией (001) представлены на рис. 4.

Сходимости полученных результатов разработанной программы динамического моделирования анизотропного травления с экспериментальными данными проверяем следующим образом. В процессе экспериментов формировались маски различной конфигурации на пластинах (001) КЭФ 4,5 диаметром 60 мм и толщиной 400 мкм. Маска, стойкая к глубинному травлению в КОН, была выбрана следующего типа: $\text{SiO}_2\text{—V—Cu}$ (напыленная)— Cu (гальваническая) общей толщи-

ной $\approx 1,5\text{—}1,8$ мкм. Указанная маска была устойчивой к глубоким травлениям до 400 мкм, что позволило формировать профиль различной высоты.

В процессе формирования экспериментальных структур проводилось травление как внешних фигур (мезаструктуры), так и внутренних структур. Процесс травления был разбит на несколько промежуточных стадий (три стадии), в конце которых измерялась геометрия фигур травления (размеры, углы, число граней). Для контроля внешнего вида применен микроскоп МССО-1 (ТУ-3-3.587—78), контроля размера рельефа — микроинтерферометр МИИ-4. Размеры рельефов измеряли с применением индикатора многооборотного с одной деления 0,001 мм типа 1МИГ (ГОСТ 9696—82), закрепленного на стойке для измерительных головок типа С-III (ГОСТ 10197—70).

Далее оценивалась разница между размерами фигур травления, получаемых средствами модели,

и экспериментальных образцов при известном времени травления.

Как показали эксперименты, разница, отнесенная к экспериментальным размерам $\frac{a_{\text{эксп}} - a_{\text{м}}}{a_{\text{эксп}}}$,

составляет не более 5 %, что может быть объяснено как факторами погрешности соблюдения технологических условий, так и погрешностью самой модели.

На основании проведенных экспериментов и оценки сходимости разработанной модели можно сделать следующие выводы:

- разработанная модель позволяет выявить динамику изменения геометрии образца при анизотропном травлении;
- особенностью модели является то, что наряду с анизотропным травлением имеется возможность моделировать процессы изотропного травления, а также комбинированные технологические процессы жидкостного травления с изменением типов травителей на необходимых временных интервалах;
- данная модель позволяет разработчику устройств микро-системной техники отказаться от интуитивного проектирования и перейти к машинному проектированию, обеспечивающему оптимальные конфигурации силовых и функциональных узлов микромеханики.

Список литературы

1. Травление полупроводников: Пер. с англ. С. Н. Горина. М.: Мир, 1965. С. 9—61.
2. Тимошенко С. П., Рубиц В. Г. Моделирование процесса прецизионного травления вибрационной системы датчика угловой скорости // Микросистемная техника. 2002. № 3. С. 3—7.
3. Ваганов В. И. Интегральные пьезопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти, П. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема: Пер. с англ. В. Л. Кустова, В. М. Петрова, О. В. Селляховой. Под ред. профессора Р. А. Суриса. М.: Радио и связь, 1988.

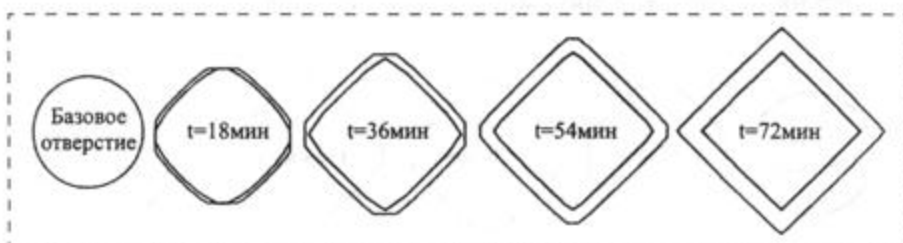


Рис. 4. Динамика изменения геометрии фигуры травления по поверхности пластины и по дну лунки

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 629.7:533.6.013.622

В. И. Бердников, главный конструктор
ОАО "НИИТП-Альфа"

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ МИНИАТЮРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МАШУЩЕКРЫЛОГО ТИПА

Рассматриваются вопросы актуальности создания миниатюрных беспилотных летательных аппаратов машущекрылового типа. Приведены схема и результаты испытаний двухроторного машущекрылового устройства, на базе которого возможно создание маневренных, дистанционно управляемых махолетов (ornithopters) вертикального взлета и посадки различного назначения.

В последние годы создание дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) стало одной из наиболее быстро развивающихся отраслей авиационно-космической промышленности во многих странах мира. В настоящее время в 41 стране, в той или иной степени, ведутся работы по созданию ДПЛА различного назначения.

Положительный опыт боевого использования штатных ДПЛА, полученный в ходе операции "Сюзническая сила" НАТО против Югославии в 1999 г. в Афганистане и Ираке, послужил основой при формировании тактико-технических требований к новым, перспективным ДПЛА, способным обеспечить получение информации о противнике в реальном масштабе времени, в любое время суток, для различных войсковых иерархических уровней — от отделения до батальона, полка и выше. Наиболее сложной проблемой в поставленном многообразии задач является создание миниатюрных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) для информационного обеспечения войсковых звеньев: отделение — рота (и решения других задач).

Несмотря на продолжающиеся сокращения средств на оборону в странах НАТО, программы по модернизации и разработке новых ДПЛА становятся приоритетными, и их финансирование непрерывно растет.

Отставание России в сфере создания миниатюрных беспилотных летательных аппаратов побуждает руководство заинтересованных организаций форсировать работы по созданию и освоению этой

перспективной техники (см. материалы НВО № 5, 2003 г.).

За рубежом интенсивные работы в области исследования возможности создания сверхминиатюрных беспилотных дистанционно пилотируемых летательных аппаратов, именуемых микроБЛА (МБЛА), были отмечены со второй половины 1990-х годов. Повышенный интерес к этому классу аппаратов в последнее время является результатом одновременного появления новых достижений в области миниатюризации компонентов ЛА и новых военно-технических концепций применения таких аппаратов, лежащих в русле перспективных концепций информатизации вооруженной борьбы.

Безусловно, влияние на инициирование проведения исследований по созданию МБЛА оказал опыт боевых действий в локальных конфликтах (в миротворческих операциях) последних лет, а также условия их ведения, где выявились потребности информационной обеспеченности наземных войск тактического уровня. В отличие от средств разведки с более высоким уровнем характеристик, подобных спутникам и высотным БЛА, микроБЛА будут эксплуатироваться в интересах отдельных групп солдат как средство уровня взвода, обеспечивая локальную разведку по непосредственному требованию потребителя. Главным принципом боевого применения становится непрерывная разведка, планирование и управление выполнением запланированных (задач) действий с привлечением минимально необходимых ударных средств.

Важным достоинством использования технологии микроБЛА является то, что между человеком-оператором, находящимся в наземном пункте дистанционного управления, и летящим микроБЛА, оснащенным телевизионной камерой и ИК-аппаратурой, происходит непрерывный обмен информацией, благодаря чему создается иллюзия непосредственного наблюдения за наземными целями в реальном масштабе времени и точно определяются их координаты, при этом на оператора не действуют реальные психические и физические нагрузки, свойственные экипажам пилотируемых самолетов.

В настоящее время лидирующую роль среди зарубежных стран в исследованиях и разработках микроБЛА занимают США.

Основные прикладные поисково-исследовательские работы по данному направлению возглавляет и финансирует управление перспективных разработок Министерства обороны США (ДАРПА) в рамках программы MAV. Предполагается,

что такие аппараты, оснащенные телевизионными и тепловизионными камерами, биохимическими, радиационными и акустическими датчиками, будут входить в состав индивидуального снаряжения военнослужащих и использоваться при проведении контртеррористических операций и боевых действий в городских условиях.

Существующие технические концепции, разработанные в США, предполагают, что разведка с помощью БЛА будет проводиться на удалении до 10 км, длительностью до одного часа и со скоростью от 1 до 20 м/с при обеспечении оперативности и круглосуточности наблюдения, хотя некоторые варианты применения могут требовать и наиболее низких характеристик дальность — полезная нагрузка (вплоть до малозумных "стационарных" БЛА для дневного и ночного контроля за охраняемыми объектами).

Исследования и разработки, проводимые с 1998 г. по программе MAV, доказали реальность изготовления миниатюрных беспилотных летательных аппаратов размером около 150 мм. Такие микроБЛА за три года в США прошли путь от идеи до реально существующих образцов. Некоторые опытные МБЛА, прошедшие летные испытания в конце 2000 г., даже превысили требования, определенные специалистами ДАРПА. Полученные результаты позволили командованию СВ США принять решения о том, что с 2003 г. разрабатываемые микроБЛА будут интегрированы в концепцию FCS (Future Combat Systems), предусматривающую создание будущего боевого снаряжения пехотинца. Для этого ДАРПА готово приступить к разработке второго поколения беспилотных микроаппаратов с вертикальным взлетом и посадкой в рамках программы OAV (Organic Air Vehicle), рассчитанной на три года и оцениваемой в 28 млн долл. В настоящее время создание микроБЛА пока не вышло из стадии концептуальных исследований, хотя их развертывание в США планируется еще до 2005 г. Вместе с тем первые экспериментальные исследования показали недостаточную эффективность МБЛА "винтокрылого" типа.

По мнению многих западных специалистов существенный прорыв в освоении МБЛА возможен только с созданием машущекрылых летательных аппаратов. По их более осторожным прогнозам появление первого поколения высокоэффективных машущекрылых микроБЛА в реальной эксплуатации возможно не ранее 2010 г., что связано с решением ряда проблем машущекрылого полета.

Теоретические исследования, ранее проведенные в СССР, показали, что малоскоростные ЛА с машущим крылом могут оказаться существенно эффективней винтокрылых ЛА. Однако до 1989 г. идея осуществления машущекрылого полета оста-

валась нереализованной. И это не случайно! Несмотря на тщательное изучение особенностей полета птиц и насекомых, создание крыльев, копирующих движение крыльев птиц, является крайне сложной задачей.

В СССР группа энтузиастов Научно-исследовательского института тепловых процессов (НИИТП) пошла другим путем. Ими в инициативном порядке был разработан принципиально новый механизм, обеспечивающий движение крыльев (махолета) по восьмеркообразной траектории, что позволило существенно повысить удельную подъемную силу машущекрылых аппаратов.

Автором этого механизма является талантливый инженер, один из старейших сотрудников НИИТП Петр Андреевич Богданов.

Первоначально, в 1985—1989 гг. им были изготовлены несколько макетов роторов с двумя и четырьмя (два ротора) крыльями, позволяющих наглядно демонстрировать все фазы движения крыльев по интригующей траектории, обеспечивающей высокую эффективность "машущего" крыла. Однако большие размеры первых роторных механизмов, ограничивающих размер крыла, не позволяли перейти к созданию летающего образца махолета (см. а. с. 1621237, заявка 4608172 от 23.11.88 г. и заявка 4690679 от 15.05.89 г.).

В дальнейшем все же удалось найти схему ротора, на основании которой был разработан и изготовлен более компактный роторный блок для четырехкрылого махолета. Испытания серии этих образцов показали синусоидальный характер подъемной силы при одновременном махе двух пар крыльев (в том числе за счет возникновения реактивных сил).

Практическую значимость данная схема могла получить только при условии устранения приведенных выше недостатков, что первоначально казалось невозможным. Однако вскоре удалось найти оригинальное решение проблемы, позволившее исключить возникновение реактивных сил и обеспечить практически равномерную подъемную силу при увеличении эффективности маха крыльев. При этом махолет стал восьмикрылым.

По этой схеме в 1991—1992 гг. были изготовлены около 10 вариантов моделей роторов, прежде чем удалось найти оптимальные конструктивные решения, потенциально обеспечивающие вертикальный взлет и посадку махолета, и варианты его эффективного управления по тангажу, рысканию и крену с высокими динамическими характеристиками (ноу-хау авторов).

Упрощенная действующая модель махолета, установленная на весах, представлена на рис. 1 (см. третью сторону обложки). Различные фазы траектории движения крыльев варианта махолета (МББ-

2.4) представлены на рис. 2 (см. третью сторону обложки). Из фотографий видно, что в то время, когда две пары крыльев совершают эффективный мах, создавая максимальную подъемную силу, две другие пары движутся ребром вверх и выходят в исходное положение. При этом переход пар крыльев из положения завершения маха до начала очередного маха осуществляется за время поворота приводного вала всего на 10° (из 180°) при минимально возможном сопротивлении крыльев (движение ребром), т. е. практически во всех фазах движения крыльев формируется только положительная составляющая подъемной силы. Расходящиеся крылья формируют разрежение в верхней полусфере, и наоборот, сходящиеся крылья в нижней полусфере (см. рис. 2) — выталкивают воздух вниз.

Кроме того, "восьмеркообразное" движение крыльев приводит к образованию в зоне "ометания" крыльев вихревого потока, подобного вихревому эффекту, возникающему при полете майского жука, что также способствует росту удельной подъемной силы.

При массе модели махолета МББ-2.4, равной 320 г, и мощности электродвигателя 7–8 Вт (при частоте вращения ротора 150–160 об/мин), подъемная сила составила 340–350 г, т. е. ~ 50 г/Вт, что по состоянию на 1993 г. являлось абсолютным мировым рекордом для данного класса летательных аппаратов (ЛА).

Расчеты показывают, что при использовании современных конструкционных материалов на базе данной схемы махолета возможно создание сверхманевренных летательных аппаратов от ЛА массой 60–100 г до двухместных пилотируемых ЛА массой в 140–170 кг. Несмотря на существенное (более чем в 5 раз) превосходство таких махолетов над вертолетами по удельной подъемной силе, скорости таких махолетов, по-видимому, не превысит 60–80 км/ч, что в 4 раза ниже, чем у вертолетов.

Пилотируемые махолеты могут найти применение в качестве воздушных малолетных "мотоциклов" для проведения транспортных перевозок в горной местности, в качестве сверхманевренных воздушных "акробатов", для контроля местности (в том числе в режиме зависания), проведения сельскохозяйственных и спасательных работ, в качестве МБЛА — миниатюрных разведчиков для МЧС, а также для решения многих других задач.

Список литературы

1. Якович Ю. Кому летать на разведку // Крылья родины. 2003. № 3.
2. Газета "Независимое военное обозрение". № 5, 2003.
3. А. с. 1621237 СССР / П. А. Богданов — заявка 4608172 от 23.11.88.
4. Заявка 4690679 от 15.05.89 СССР / П. А. Богданов и др.
5. Заявка 93-015309/06-014306 от 23.03.93 Россия / П. А. Богданов, В. И. Бердников.

УДК 523.44+621.3+629.735.45+629.78

С. В. Стреж, канд. техн. наук,
ОАО ЦНИИ "Техномаш",
Е. В. Трошин, канд. техн. наук,
Военная академия РВСН им. Петра Великого

СОЗДАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МИКРОАППАРАТОВ

Рассматриваются проблемы создания космических систем на основе микросистемной техники. Орбитальные группировки состоят из большого числа космических аппаратов, имеющих массу порядка нескольких килограмм. Такая группировка рассматривается как единый объект, распределенный в пространстве. Важнейшим компонентом таких систем становится информационный.

Фундаментальные исследования и практические работы в области создания микросистем по самому широкому спектру применений в настоящее время получили значительное распространение во всем мире. Известны микрозонды и микродатчики, микрооптические приборы, микророботы, летательные микроаппараты — самолеты и вертолеты, массой от нескольких килограммов до сот граммов и др. Наряду с микроэлектронными широкое распространение получают также устройства микромеханики. Одной из наиболее интересных и перспективных областей применения микросистем является космонавтика.

Индустриальная эпоха требовала создания технических гигантов, достижением считалось построение огромных заводов, производство сверхмощных устройств, стабильно шло увеличение массогабаритных и вещественно-энергетических характеристик. Однако сегодня индустриальный этап себя уже во многом исчерпал. На смену ему приходит информационная эпоха. С одной стороны, экологические проблемы, а с другой — накопленные человечеством знания послужили причиной разработки новейших технологий во всех отраслях. Одной из особенностей этих технологий является резкое снижение значений параметров, касающихся потребления всех видов вещественно-энергетических ресурсов. В результате уменьшаются размеры, масса, потребление топлива и энергии различных приборов и устройств, в то же время возрастает значение информационной и интеллектуальной составляющих технических и техногенных систем, а также повышается комплексный показатель эффективности систем. Тенденция к ми-

2.4) представлены на рис. 2 (см. третью сторону обложки). Из фотографий видно, что в то время, когда две пары крыльев совершают эффективный мах, создавая максимальную подъемную силу, две другие пары движутся ребром вверх и выходят в исходное положение. При этом переход пар крыльев из положения завершения маха до начала очередного маха осуществляется за время поворота приводного вала всего на 10° (из 180°) при минимально возможном сопротивлении крыльев (движение ребром), т. е. практически во всех фазах движения крыльев формируется только положительная составляющая подъемной силы. Расходящиеся крылья формируют разрежение в верхней полусфере, и наоборот, сходящиеся крылья в нижней полусфере (см. рис. 2) — выталкивают воздух вниз.

Кроме того, "восьмеркообразное" движение крыльев приводит к образованию в зоне "ометания" крыльев вихревого потока, подобного вихревому эффекту, возникающему при полете майского жука, что также способствует росту удельной подъемной силы.

При массе модели махолета МББ-2.4, равной 320 г, и мощности электродвигателя 7–8 Вт (при частоте вращения ротора 150–160 об/мин), подъемная сила составила 340–350 г, т. е. ~ 50 г/Вт, что по состоянию на 1993 г. являлось абсолютным мировым рекордом для данного класса летательных аппаратов (ЛА).

Расчеты показывают, что при использовании современных конструкционных материалов на базе данной схемы махолета возможно создание сверхманевренных летательных аппаратов от ЛА массой 60–100 г до двухместных пилотируемых ЛА массой в 140–170 кг. Несмотря на существенное (более чем в 5 раз) превосходство таких махолетов над вертолетами по удельной подъемной силе, скорость таких махолетов, по-видимому, не превысит 60–80 км/ч, что в 4 раза ниже, чем у вертолетов.

Пилотируемые махолеты могут найти применение в качестве воздушных малолетных "мотоциклов" для проведения транспортных перевозок в горной местности, в качестве сверхманевренных воздушных "акробатов", для контроля местности (в том числе в режиме зависания), проведения сельскохозяйственных и спасательных работ, в качестве МБЛА — миниатюрных разведчиков для МЧС, а также для решения многих других задач.

Список литературы

1. Якович Ю. Кому летать на разведку // Крылья родины. 2003. № 3.
2. Газета "Независимое военное обозрение". № 5, 2003.
3. А. с. 1621237 СССР / П. А. Богданов — заявка 4608172 от 23.11.88.
4. Заявка 4690679 от 15.05.89 СССР / П. А. Богданов и др.
5. Заявка 93-015309/06-014306 от 23.03.93 Россия / П. А. Богданов, В. И. Бердников.

УДК 523.44+621.3+629.735.45+629.78

С. В. Стреж, канд. техн. наук,
ОАО ЦНИИ "Техномаш",
Е. В. Трошин, канд. техн. наук,
Военная академия РВСН им. Петра Великого

СОЗДАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МИКРОАППАРАТОВ

Рассматриваются проблемы создания космических систем на основе микросистемной техники. Орбитальные группировки состоят из большого числа космических аппаратов, имеющих массу порядка нескольких килограмм. Такая группировка рассматривается как единый объект, распределенный в пространстве. Важнейшим компонентом таких систем становится информационный.

Фундаментальные исследования и практические работы в области создания микросистем по самому широкому спектру применений в настоящее время получили значительное распространение во всем мире. Известны микрозонды и микродатчики, микрооптические приборы, микророботы, летательные микроаппараты — самолеты и вертолеты, массой от нескольких килограммов до сот граммов и др. Наряду с микроэлектронными широкое распространение получают также устройства микромеханики. Одной из наиболее интересных и перспективных областей применения микросистем является космонавтика.

Индустриальная эпоха требовала создания технических гигантов, достижением считалось построение огромных заводов, производство сверхмощных устройств, стабильно шло увеличение массогабаритных и вещественно-энергетических характеристик. Однако сегодня индустриальный этап себя уже во многом исчерпал. На смену ему приходит информационная эпоха. С одной стороны, экологические проблемы, а с другой — накопленные человечеством знания послужили причиной разработки новейших технологий во всех отраслях. Одной из особенностей этих технологий является резкое снижение значений параметров, касающихся потребления всех видов вещественно-энергетических ресурсов. В результате уменьшаются размеры, масса, потребление топлива и энергии различных приборов и устройств, в то же время возрастает значение информационной и интеллектуальной составляющих технических и техногенных систем, а также повышается комплексный показатель эффективности систем. Тенденция к ми-

ниатюризации и снижению энергопотребления при повышении эффективности системы очень наглядно проявилась в области компьютерной техники и электроники. Достижения в этих областях послужили одним из важнейших катализаторов к переходу от индустриальной к информационной эпохе развития человеческой цивилизации [1].

Указанные процессы в полной мере идут и в космической области, в которой создается и эксплуатируется множество космических систем различной сложности и различного назначения. Миниатюризация в космической сфере особенно актуальна, так как запуск 1 кг массы полезной нагрузки на орбиту составляет несколько десятков тысяч долларов.

В [2] космическая система рассматривается с системных позиций и делается вывод о том, что она представляет собой, по сути, новый класс систем, являясь одновременно сложной и большой системой по классификации, принятой в теории систем.

Большинство космических систем по своему функциональному назначению являются информационными системами. Все многообразие основных задач, решаемых такими системами, можно классифицировать следующим образом:

- обеспечение различных видов связи;
- наблюдение, сбор данных о космическом пространстве и подстилающей поверхности и передача их потребителю;
- наблюдение за объектами естественного и искусственного происхождения в космосе и на Земле и передача данных о них потребителю;
- обеспечение потребителей навигацией;
- проведение научных и экспериментальных работ.

Важнейшими характеристиками космических систем наблюдения, связи и навигации являются глобальность, оперативность, непрерывность, способность к передаче информации массовому потребителю в реальном масштабе времени в любой точке пространства. В военной сфере в качестве массового потребителя следует рассматривать отдельного солдата, оснащенного высоко технологичными информационными средствами.

В [2–4] говорится о необходимости и неизбежности создания в космосе единого информационного пространства. Де-факто оно уже существует. При разработке и эксплуатации космических систем необходимо использовать преимущества единого информационного пространства и наращивать его потенциал. Если тормозить развитие единого информационного пространства в космосе и проводить деструктивные действия по его разрушению, то это неминуемо приведет к гибели всей космической отрасли.

Важнейшими элементами единого информационного космического пространства являются орбитальные системы космических аппаратов (КА), входящие в космическую систему. Научные исследования показывают, что в ближайшем будущем для существенного повышения устойчивости орбитальной системы, увеличения зоны покрытия средствами космического наблюдения и связи, обеспечения потребителей информацией в реальном масштабе времени потребуются увеличение на порядки числа КА в составе орбитальной системы.

Важнейшим в рассматриваемой проблематике является и военный аспект. В качестве одного из компонентов американской Национальной противоракетной обороны (НПРО) предполагается использовать орбитальную группировку из 15–20 тыс. спутников массой 8–10 кг, называемых наноперехватчиками. Один Шаттл способен доставить на орбиту за один раз 3 тыс. таких аппаратов.

В свое время разработка программы СОИ натолкнулась на проблемы, связанные с необходимостью запуска в космос на несколько порядков большего, чем это было возможно в те годы, числа КА. Только в этом случае можно было говорить об ее эффективности, точнее даже — целесообразности применения. Запуск и эксплуатация орбитальной группировки из сотен и тысяч КА, имеющих массу в сотни и тысячи килограммов, а также большое число сложных в управлении и эксплуатации подсистем, требующих больших центров управления полетом (ЦУП), принципиально не возможен. Очевидно, именно тогда США сделали ставку на разработку сверхмалых КА, имеющих массу порядка 5–10 кг, которые можно запускать на орбиты тысячами.

Противоракетная оборона и противоспутниковая борьба становятся возможны при использовании многочисленных орбитальных группировок (ОГ), как атакующих, так и выполняющих информационные задачи и являющихся мало уязвимыми для атакующих средств противника. Вывод о необходимости создания многочисленных ОГ для решения военных задач был сделан еще в 80-е годы при анализе Стратегической оборонной инициативы [5]. Многочисленная ОГ из сверхмалых КА оказывается малоуязвимой и сверхнадежной относительно существующих космических систем, что обеспечивается:

- малыми размерами самого КА;
- использованием принципиально иной элементной базы КА;
- относительной его простотой с точки зрения конструктивного исполнения;
- многократным дублированием функционирования отдельных КА в системе друг другом;

- низкой стоимостью производства, запуска и эксплуатации одного КА;
- относительной легкостью наращивания и выполнения орбитальной группировки;
- необходимостью проведения противником масштабной атаки для вывода ОГ из строя.

Космический аппарат является основным структурным компонентом космической системы. Существовавшие до настоящего времени подходы к развитию космических систем основывались на повышении мощности средств выведения полезной нагрузки, использовании крупных энергоемких аппаратов и станций. Концепция построения КА, сложившаяся в 1960—1970 гг., подразумевала конструкции, имеющие массу от полтонны до нескольких тонн.

В настоящее время результаты фундаментальных научных исследований позволяют создать новейшие технологии, которые могут применяться при построении вычислительной техники, электроники, лазеров, оптики, в производстве новых материалов и др. В основе этих технологий лежат, прежде всего, молекулярные нанотехнологии. По ним ведутся интенсивные исследования и практические разработки во всех передовых в научном и техническом аспекте странах. Более того, анализ состояния нанотехнологий в России свидетельствует о том, что имеющийся научно-технический задел ведущих научных и технологических организаций в области создания принципиально новой элементной базы и перспективных информационных технологий пока позволяет обеспечить приоритет отечественных разработчиков и осуществить успешные действия в сфере высоких технологий [6].

Значительную перспективу представляет направление *молекулярного компьютеринга и приборов наноэлектроники*, в частности, компонентов устройств волоконно-оптических средств связи и информационных систем. Создаваемые устройства и технологии предназначены для использования в опто- и наноэлектронных системах хранения и обработки информации, в коммуникационных технологиях, вычислительной и измерительной технике. Использование целого ряда физических явлений позволяет рассчитывать на создание нового поколения элементной базы информационных систем, в том числе для компьютеров с принципиально новой архитектурой — молекулярных, квантовых, и, прежде всего, оптических и нейросетевых. В стране развиваются зондовые нанотехнологии [6], особенно в приложении к задачам микроробототехники. Осуществляются работы по созданию средств прецизионного измерения расстояний (с точностью до 1 нм) оптическими методами.

Перечисленные перспективные нанотехнологии имеют практические заделы, развитие которых способно в ближайшие 4—5 лет привести к созданию новейшей элементной базы и устройств на этой основе. Разработанные нанотехнологии и изготовленное технологическое оборудование по всем предлагаемым направлениям могут быть освоены в широком производстве и использованы для создания nanoиндустрии.

В частности, в настоящее время получены существенные практические результаты в области создания микрореактивных двигателей размерами с копейку [7].

На основе использования новейших технологий становится возможным в течение ближайших 5—10 лет создать КА массой не более 10 кг. При этом принципиально изменяется подход к развитию и использованию космических систем.

В настоящее время как в России, так и за рубежом уже существуют малогабаритные беспилотные летательные аппараты. Масса этих аппаратов составляет от нескольких килограммов до нескольких десятков килограммов. В основе таких проектов закладываются инновационные технологии, с помощью которых возможно также построение сверхмалых КА.

На самом деле создание и испытание микро-спутников за рубежом и прежде всего в США идет полным ходом. Первые четыре аппарата массой по 12 кг были запущены для решения задач радиосвязи в США в 1990 г. Позже подобные КА запускали Япония, Германия, Италия, Китай, Швеция и даже Мексика. В 1997 г. NASA утвердила стратегический план "Быстрее, лучше, дешевле", направленный на активизацию внедрения в создание микроузлов космической техники современных достижений нанотехнологии, микроэлектроники и молекулярной электроники. Речь идет как об отдельных узлах для больших станций, так и о микро-спутниках. Журнал "Новости космонавтики" не раз рассказывал об американских проектах в этой области, к которым относятся проекты: "3 спутника по углам", ION-F, "Эмеральд", "Первопроходец созвездий", "Солнечная вертушка". Характерно, что Пентагон, ведущие университеты США и NASA работают совместно в тесной кооперации.

Начаты подобные разработки и у нас. Это "Руслан-ММ" (НПО Машиностроения), "Диалог" (ГКНПЦ им. М. В. Хруничева), "Интерспутник-100М" (МОКС "Интерспутник"), "Экспресс-1000" (НПО ПМ). Правда, эти проекты относятся к малоразмерным аппаратам, а не к наноспутникам.

Анализ конструкции КА показывает, что его размеры и масса определяются, прежде всего, спецификой спецаппаратуры, т. е. той аппаратуры,

ради использования которой и осуществляется запуск КА на орбиту. В зависимости от используемой спецаппаратуры применяются те или иные типы систем терморегуляции, систем электропитания, систем ориентации и стабилизации аппарата, систем коррекции движения центра масс, систем телеметрического контроля, командно-измерительной системы, системы бортовых измерений и управления, бортовых вычислительных систем, доставки потребителям специнформации, генерируемой данным КА и др. На конструкцию и параметры служебных систем и систем бортового комплекса управления КА оказывает влияние не только комплекс массогабаритных и вещественно-энергетических характеристик спецаппаратуры, но и функциональная специфика последней. Спецаппаратура является системообразующим фактором для КА, и именно она в основном определяет технологические циклы управления КА и порядок его использования. Естественно, что служебные системы вносят свои ограничения на использование и управление КА.

Например, для космических систем наблюдения главной частью спецаппаратуры является оптико-электронная камера наблюдения. Сотни (или даже тысячи) миниатюрных КА с миниатюрными камерами способны обеспечить глобальность и непрерывность наблюдения за космическим пространством и подстилающей поверхностью с выдачей результатов наблюдения в реальном масштабе времени в любой точке пространства на носимые средства получателя специнформации. Использование большого числа аппаратов в системах космического наблюдения позволяет создавать объемные образы наблюдаемых объектов за счет съемки их одновременно с нескольких КА. Объемные образы позволяют повысить информативность систем наблюдения, что, в свою очередь, представляет новые широкие возможности для семантической обработки информации.

Такие системы становятся важнейшим элементом высокоточного оружия, о создании и совершенствовании которого уже объявлено американской администрацией. Еще в 1951 г. в США был выдвинут девиз: "Наука разделит будущее армии". В настоящее время Минобороны США начинает совместный пятилетний проект с Массачусетским технологическим институтом. Этот проект непосредственно касается нанотехнологий.

Снижение массогабаритных и вещественно-энергетических характеристик (МГВЭХ) спецаппаратуры на порядки не только уменьшает МГВЭХ других систем КА и всего КА в целом, но и принципиально изменяет всю его конструкцию, состав аппаратуры и компоновочную схему. Некоторые

системы КА становятся не актуальными, другие подвергаются принципиальным изменениям. Кроме того, новейшие технологии должны быть использованы не только в конструкции спецаппаратуры, но и при создании всех остальных систем КА, т. е. бортовые системы должны претерпеть резкое снижение МГВЭХ сами по себе, даже вне связи со спецаппаратурой.

Представленное изменение конструкции КА существенно повлияет на стоимостные характеристики КА и собственно стоимость выведения единицы массы полезной нагрузки. Улучшение этих характеристик за счет снижения МГВЭХ КА позволит запускать существующими и новыми ракетами-носителями на несколько порядков больше КА для создания орбитальной системы, решающей определенную целевую задачу. Изменение конструкции КА и их количества в космосе в сторону значительного увеличения изменит технологические циклы управления и порядок применения космической системы. Увеличение числа КА в системе, упрощение конструкции отдельного КА позволят повысить надежность функционирования космической системы в целом на фоне снижения требований к надежности отдельного КА, упростить системы КА, что также положительно повлияет на уменьшение МГВЭХ.

Использование новых технологий в создании элементной базы вычислительной техники, являющихся более перспективными, чем наиболее распространенные в настоящее время кремниевые технологии, позволит в этой области выйти на еще более высокий рубеж. Такими технологиями становятся биотехнологии, а также технологии, основанные на использовании алмаза и др. При этом вся бортовая вычислительная система в ближайшей перспективе может оказаться не больше на ручных часов.

Крайне малые размеры спецаппаратуры, бортовой вычислительной системы, отсутствие системы терморегуляции и других систем или их миниатюризация приведут к тому, что существенно будет уменьшена система электропитания. Здесь возможны варианты, при которых либо сами элементы конструкции КА будут покрываться преобразующим слоем и превращаться в солнечные батареи, либо будут использоваться миниатюрные аккумуляторы, емкости которых будет достаточно для питания миниатюрных систем КА.

При использовании миниатюрных КА появляется совершенно новый подход к их применению и построению всей космической системы в целом. В этом случае должны использоваться новые принципы коррекции орбиты КА и связи его с наземными компонентами космической системы. Иннова-

ционный подход подразумевает развитие принципиально нового направления в космонавтике — космических систем на основе сверхмалых аппаратов, которые должны органично вписаться в космическую инфраструктуру.

Характеризовать сверхмалые КА как "простые" не верно. Эта характеристика является слишком примитивной и не отражает сути этих аппаратов. Безусловно, их конструкция и принципы функционирования подвергнутся серьезной трансформации, некоторые бортовые системы будут исключены, другие перестанут играть определяющую роль, но вряд ли здесь можно говорить о непосредственном упрощении. Аппарат станет меньше, будет требовать меньше ресурсов на обслуживание служебных систем, могут быть снижены показатели его надежности, но говорить о его "упрощении" — это все равно, что говорить об упрощении настольного компьютера по сравнению с машинами недалекого прошлого, когда они занимали целые этажи зданий. Напротив, с точки зрения обработки информации малые КА должны быть на порядок производительнее и сложнее существующих.

В инновационном подходе речь идет о принципиально новых КА и принципиально новых технологических циклах управления КА, новых принципах обработки специнформации и использования КА в целом. Необходимо проведение серьезных исследований и создание принципиально новых подходов к использованию таких КА. Естественно, что элементная база и параметры спецаппаратуры должны отвечать требованиям выполнения целевой задачи, но эти параметры должны быть системно увязаны с методами обработки информации и управления КА по целевому назначению. И здесь информационный компонент становится доминирующим.

Отличительной особенностью орбитальной группировки (ОГ) из сверхмалых КА (СМКА) является большое число аппаратов в ее составе. Состав и структура рассматриваемой ОГ является сложным. Главная ОГ может состоять из нескольких подчиненных ОГ, выполняющих частные подзадачи, при этом в составе каждой ОГ могут находиться КА различного типа и назначения.

ОГ СМКА является системой, в качестве элементов которой рассматриваются отдельные СМКА. Группировка является именно системой, а не просто совокупностью КА. В такой ОГ задачи КА и ОГ принципиально различны. Один СМКА в отдельности не способен обеспечить выполнение целевой задачи. Это объясняется двумя противоположными причинами. С одной стороны, СМКА может иметь ограниченные возможности относительно большого КА того же целевого назначения и вы-

полнение целевой задачи КС может быть достигнуто только в результате совокупного функционирования СМКА. С другой стороны, функционально развитые СМКА, не уступающие большим КА, способны нагрузить КС новым классом целевых задач, которые ранее были не доступны системе с большими КА. Этот новый класс задачи опять же может быть решен только совокупностью КА.

В проекте рассматриваются ОГ, имеющие в своем составе десятки, сотни и тысячи КА. Такая многочисленная группировка для системы управления представляет собой единое целое как совокупный объект. Расположение элементов в пространстве не является случайным, задачи между СМКА строго распределены, функционирование отдельного СМКА в данный момент времени зависит от функционирования остальных КА и состояния всей системы, специнформация от каждого отдельного СМКА вливается в общий поток.

СМКА в ОГ находятся друг с другом в различных отношениях: по расположению в пространстве, по функциональным задачам и др.

Орбитальная группировка представляет собой распределенный в пространстве искусственный многокомпонентный космический объект. Этот объект выполняет роль большой космической станции в космической системе.

Орбитальная группировка обладает избыточностью по числу КА. МГВЭХ СМКА позволяют добиваться избыточности без существенных затрат, в то же время избыточность позволяет достичь более высокой надежности всей системы в целом за счет резервирования КА, а кроме того большей гибкости при перестроении ОГ как с функциональной, так и с пространственной точки зрения.

В ОГ из большого числа СМКА возникает эмерджентность, ОГ приобретает свойства, не присущие отдельному КА и не получаемые суммированием свойств отдельных КА. За счет большого числа СМКА в ОГ оказывается возможным обеспечить непрерывность, глобальность, супернадежность, оперативность функционирования космической системы и доступность продуктов ее функционирования большому числу потребителей.

Новый подход к созданию КС потребует соответствующей перестройки наземного комплекса управления космическими аппаратами и технологии их использования по целевому назначению.

Для управления многочисленными сложно организованными системами КА понадобятся мощные автоматизированные системы управления (АСУ). Однако развитие вычислительных средств, новые алгоритмы обработки больших массивов информации и новые информационные технологии позволяют решать эти задачи. Эффективность

таких систем управления повысится с использованием нейрокомпьютеров, новых архитектур вычислительной техники, молекулярных и биокомпьютеров, систем искусственного интеллекта.

Управление отдельным КА с помощью человека становится неэффективным и просто невозможным. Акцент деятельности человека перемещается из сферы непосредственного управления КА, как управления технологией функционирования бортовых систем, в сферу использования всей орбитальной системы по целевому назначению и обработки семантической составляющей результата работы космической системы, т. е. в область принятия решения по оценке обстановки.

Сейчас для управления одним КА задействуется значительное число специалистов с привлечением технических средств обработки информации. По каждой бортовой системе независимо работают группы анализаторов. При этом необходимо обеспечить взаимодействие между группами при анализе состояния КА в целом и при планировании программы полета и операций технологических циклов управления. Анализ работы спецаппаратуры и обработка специнформации представляют собой только часть общего объема работ, выполняемых по управлению КА, и эта часть нередко является далеко не самой сложной и трудоемкой (зависит от назначения КА). В процессе управления КА идут огромные потоки телеметрической информации о состоянии бортовой аппаратуры. При управлении сверхмалыми КА должно произойти существенное смещение акцента от управления служебными системами КА к управлению спецаппаратурой, установленной на нем, а также непосредственно к обработке специнформации. Мощный телеметрический поток должен замениться потоком специнформации, поступающей от множества сверхмалых аппаратов соответствующей орбитальной системы.

Работа центров управления полетом (ЦУП) сверхмалых КА на основе существующих технологий управления становится неэффективной ввиду резкого увеличения числа КА в данной системе. Потребуется создание АСУ, предназначенных для управления системой из большого числа КА, которая должна оперативно распределять задачи между КА в зависимости от условий обстановки и обеспечения цели функционирования системы, оценивать состояние системы в целом, выдавать рекомендации по изменению ее состава, конфигурации и внутренних взаимодействий. Потребители информации должны будут обрабатывать потоки специнформации от множества источников, формировать задание не для отдельного КА, а для всей системы, распределять задачи между отдельными КА должна АСУ.

Информационная составляющая функционирования космической системы приобретает первостепенное значение. Это предъявляет особые требования к эффективности, безопасности и надежности информационных технологий, используемых в космической системе. Требования к информационным системам и перспективы их развития изложены в [2—4]. Здесь следует указать на то, что основой создания информационных космических систем должны стать полностью сертифицированные программные продукты отечественного производства и, прежде всего, базовое программное обеспечение, включающее операционные системы и системы программирования. Обязательными требованиями к операционным системам, используемым в космической системе, являются сертифицируемость и открытость ядра. Полностью эти требования, скорее всего, могут быть удовлетворены только при создании операционной системы отечественным разработчиком. В работе [8] доказана актуальность разработки отечественной операционной системы как основы информационных систем.

Таким образом, основными направлениями развития нового подхода к созданию космических систем являются следующие направления исследований:

- миниатюризация на основе новых нанотехнологий, используемых при создании вычислительных, электронных, оптических и других средств;
- молекулярные технологии, позволяющие создавать материалы, выдерживающие широкий диапазон температур;
- лазерные технологии;
- новые принципы осуществления перемещения в космическом пространстве;
- исследования в области систем связи и коммуникации;
- системы искусственного интеллекта, био- и нейрокомпьютеры;
- вычислительные системы и информационные технологии, обрабатывающие сверхбольшие объемы информации;
- интеллектуальные системы принятия решений;
- методы проектирования больших систем и управления ими.

При построении самого микросистемного КА в первую очередь необходимо решить проблемы связи его с наземным компонентом и с другими КА. Проблема лежит здесь в области повышения КПД приемопередающих устройств при минимальных энергетических затратах. Второй первостепенной задачей является движение КА по орбите и обеспечение его маневра и ориентации.

В кибернетическом аспекте необходима разработка методов и средств управления совместным

полетом нескольких (в перспективе многих) КА в ОГ. Такую задачу уже отрабатывают США — по программе NASA при участии Пентагона компьютерная программа КАСПЕР должна управлять тремя спутниками массой по 15 кг, как единым распределенным объектом без участия человека [9].

Все это позволит создать принципиально новый сверхмалый КА и на его основе построить принципиально новую космическую систему. В результате станет возможным выведение в космос количества КА на порядки большего, чем в настоящее время, при значительном сокращении затрат, что, в свою очередь, обеспечит глобальность использования космических систем, обработку информации в реальном масштабе времени, получение информации массовым потребителем, повысит живучесть и надежность космической системы в целом.

Следует подчеркнуть, что при решении ряда военных задач сверхмалые КА получают преимущества по сравнению с другими в силу их гораздо меньшей уязвимости как по отдельности, так и в совокупности, и в силу относительно легкой восполняемости орбитальной системой до необходимой численности для выполнения целевой задачи. Ввиду сказанного могут появиться новые задачи, которые ранее принципиально были не решаемы.

Развитие новых технологий на базе фундаментальных исследований позволит использовать их результаты и в других областях промышленного комплекса, что должно обеспечить приток инвестиций для этих исследований. Результаты интенсивных исследований в новой области нанотехнологий, вызванные потребностями космической отрасли, найдут применение не только в указанной области, но и во многих других областях. Новые технологии могут стать технологиями двойного и тройного применения. В настоящее время многие их возможности и перспективы использования еще до конца не известны. Интерес к ним будет неуклонно расти, и в ближайшее время прогнозируется использование новых технологий при производстве самой разнообразной продукции, что привлечет внимание многочисленных участников различных сегментов рынка, и, как следствие, появление частных инвесторов, понимающих выгоду вложения средств в проведение исследований в области нанотехнологий.

Наиболее передовыми областями науки, техники и производства являются три области: космическая отрасль, информационные технологии и нанотехнологии. Эти три области не могут развиваться автономно друг от друга, сращивание их в единое инновационное пространство неизбежно.

Однако процессы интегрирования не должны происходить стихийно, необходима разработка долгосрочной и продуманной концепции, осознанной и поддержанной государством. Инновационный подход к созданию космических систем на основе нанотехнологий является частью этой концепции. Стратегия, которая может быть применима для реализации описанного проекта, изложена в [10].

В заключение приведем таблицу с классификацией КА по массовым характеристикам, которая начинается складываться в среде научного сообщества.

Наименование группы	Масса космического аппарата, кг
Большие спутники	>1500
Малые спутники	500—1000
Мини-спутники	100—500
Микроспутники	10—100
Наноспутники	1—10
Пикоспутники	0,1—1
Фемтоспутники	≤0,1

Список литературы

1. Квасников А. Ю., Ермак С. Н., Стреж С. В., Трошин Е. В. Инновационный подход к созданию космических систем на основе нанотехнологий // Радиоэлектроника и управление. 2002. № 7—9.
2. Стреж С. В., Трошин Е. В. Информатизация космотехносферы путем создания единого информационного пространства // Информационные ресурсы России. 2001. № 5.
3. Ермак С. Н., Стреж С. В., Трошин Е. В. Создание единого информационного пространства космотехносферы — основа развития космических систем // 6-я Международная конференция "Системный анализ и управление аэрокосмическими комплексами", Крым, Евпатория. 2001.
4. Ермак С. Н., Стреж С. В., Трошин Е. В. Интеграция космических систем на основе создания единого информационного пространства // Международная космическая конференция-2001 "Космос без оружия — арена мирного сотрудничества в XXI веке" 11—14 апреля 2001 г. Москва. М.: Изд-во МАИ, 2001.
5. Космическое оружие: дилемма безопасности / Под ред. Е. П. Велихова, Р. З. Сагдеева, А. А. Кокошина. М.: Мир, 1986.
6. Лускинович П. Н. Нанотехнология и наночипы // CHIP NEWS. Инженерная микроэлектроника. 2001. 10(63), декабрь. С. 2—5.
7. Александров С. Е., Акулишин Ю. Д., Васильев В. К. и др. Перспективы развития микрореактивных двигателей для МСТ // Микросистемная техника. 2002. № 10. С. 3—7.
8. Стреж С. В., Трошин Е. В. Актуальность и пути разработки отечественной операционной системы // Информационные ресурсы России. 2002. № 1—2.
9. Радиоэлектроника и управление. 2002. № 4—6. С. 33.
10. Трошин Е. В. Метапроекты — основа развития высоких технологий в России // Радиоэлектроника и управление. 2002. № 10—12.

УДК 621.317

А. Н. Булатов, В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.
Московский государственный институт электронной техники
(Технический университет)
e-mail vkn@miee.ru

АНОДНОЕ ОКИСЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ В АТОМНО-СИЛОВОМ МИКРОСКОПЕ

Проведено экспериментальное исследование и анализ параметров (высоты, ширины) наноструктур алюминиевых пленок, полученных анодным окислением, в условиях контролируемой влажности воздуха и комнатной температуры. Найдены закономерности изменения параметров локального окисления пленок при изменении относительной влажности в пределах от 20 до 60 %.

В настоящее время для создания элементной базы нанoeлектроники используют различные технологические методы. Одним из них является анодное окисление [1] с помощью зондов (атомно-силовых микроскопов или сканирующих туннельных микроскопов).

Известно, что в обычной атмосфере на любой поверхности присутствует определенный слой адсорбированной воды (квазижидкость), которая оказывает определенное влияние на процесс анодного окисления [2]. Изменяя парциальное давление паров воды путем повышения относительной влажности окружающей среды, мы можем отслеживать его влияние на параметры структур, полученных анодным окислением. Поэтому исследование роли влажности окружающей среды на высоту и толщину структур на поверхности, получаемых анодным окислением, является актуальной задачей.

В данной статье рассматривается процесс анодного окисления и определяется зависимость параметров (высоты, ширины) структур в условиях контролируемой относительной влажности и контролируемой стабильности кан-

тилевров, так как в процессе окисления электрические свойства и характеристики используемых кантилевров подвергаются изменению.

Эксперименты проводили на пленке Al толщиной около 5 нм, напыленной на пластину GaAs (образец 1) или Si (образец 2). Исследование велось с помощью микроскопа, размещенного в колпаке, в котором можно изменять относительную влажность от 20 до 60 %. Анодное окисление проводилось Pt треугольными или TiN прямоугольными кантилеверами на атомно-силовом микроскопе Solver P-47 H (NT-MDT, Россия, г. Зеленоград) в контактном режиме. Собственная частота этих кантилевров составляла около 150–250 кГц. На кантилеверы подавался двуполярный ступенчатый сигнал, амплитуда напряжения которого изменялась от 4 до 6 В. Период однополярного ступенчатого сигнала — 0,01 м, число сигналов — 100.

Участок поверхности пленки сканировали, после чего выполнялось анодное окисление в заданных направлениях. Фигурой окисления на поверхности являлся крестик, потому что на поверхности алюминия наблюда-

лись простые естественные образования (линии, точки и т. п.), которые можно было перепутать с результатами проведенной нами литографии. После этого сканирование проводилось в другой области пленки, и эксперимент повторялся в других условиях.

Алюминий, осажденный на различных подложках, вследствие их различия должен обладать различными электрохимическими свойствами. Эти свойства определяют особенности анодного окисления. В процессе анодного окисления немаловажную роль играет толщина естественного оксида на поверхности алюминия. Известно, что именно толщина естественного оксида (около 2 нм [3, 4]) увеличивает пороговое значение процесса анодного окисления.

Необходимо также отметить то, что в окислительно-восстановительных реакциях алюминия с водой конечный продукт определяется количеством исходного продукта, т. е. алюминием [5]. А именно, чем больше исходного алюминия участвует в реакции с водой, тем больше массовая доля гидроксида алюминия ($\text{AlO}(\text{OH})$ — бемит) по отношению к доле α -оксида алюминия (Al_2O_3 — корунд) присутствует в конечном продукте для одной и той же температуры активации реакции.

На рис. 1 приведены сканы топографии поверхности алюминия в контактном режиме после литографии для образцов 1 и 2. Видно, при относительной влажности 20 % и амплитуде 4 В сканирование после литографии показало для образца 1 наличие фигуры крестика, а для образца 2 — ее отсутствие. Дальнейшее увеличение влажности до 25 % при постоянном напряжении привело к положительному результату в обоих случаях. Именно из этих

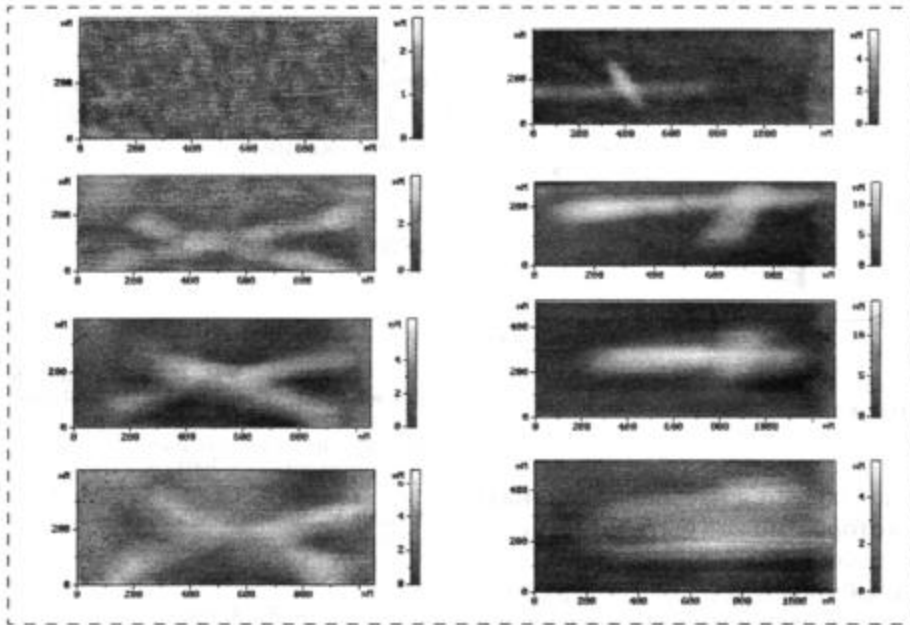


Рис. 1. Топография поверхности после литографии при амплитуде напряжения 4 В: справа — для Al на GaAs, слева — для Al на Si; сверху вниз — влажность, %: 20, 30, 50 и 60

соображений было сделано заключение о том, что пороговое напряжение для анодного окисления на алюминии имеет значение 4 В. Последовательное повышение влажности до 60 % с интервалом в 5 % привело к насыщению параметров структур для обоих образцов.

Результаты экспериментов в тех же условиях относительной влажности, но при амплитудах напряжения 4,5; 5; 5,5 и 6 В для образца 1 идентичны по характеру роста, как и для 4 В. Не наблюдается отличия в росте высоты (ширины) и для образца 2 (при амплитуде 5 и 6 В). Все данные о высоте и ширине наноструктур пересчитаны и выведены в виде графиков (рис. 2–4).

На приведенных графиках относительная погрешность составляет 20 %. В нее включены как статические (приборные), так и динамические (погрешность измерения) ошибки. Анализ графиков показал, что различие между образцами составляет в среднем около 15 %.

Для качественного сравнения состава конечного продукта по-

сле реакции окисления рассмотрим уравнение

$$V_{эл} = \frac{MN_A}{\rho}, \quad (1)$$

где $V_{эл}$ — элементарный объем; M — молярная масса вещества; N_A — число Авогадро; ρ — плотность вещества.

Тогда отношение элементарного объема гидроксида алюминия ($Al(OH)_3$ — гидраргиллит) к элементарному объему алюминия составит

$$K = \frac{V_{Al(OH)_3}}{V_{Al}} = \frac{M_{Al(OH)_3} \rho_{Al}}{\rho_{Al(OH)_3} M_{Al}}. \quad (2)$$

Зная, что $M_{Al(OH)_3} = 156 \text{ моль}^{-1}$, $M_{Al} = 27 \text{ моль}^{-1}$, $\rho_{Al(OH)_3} = 2,42 \text{ г/см}^3$, $\rho_{Al} = 2,699 \text{ г/см}^3$, получим, что

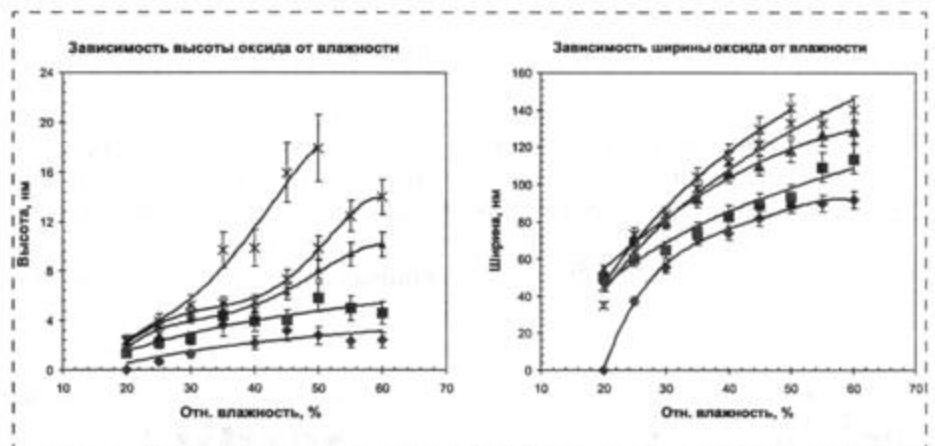


Рис. 2. Зависимость высоты и ширины оксида от влажности для Al на GaAs. Снизу вверх: амплитуда напряжения, В: 4; 4,5; 5; 5,5 и 6

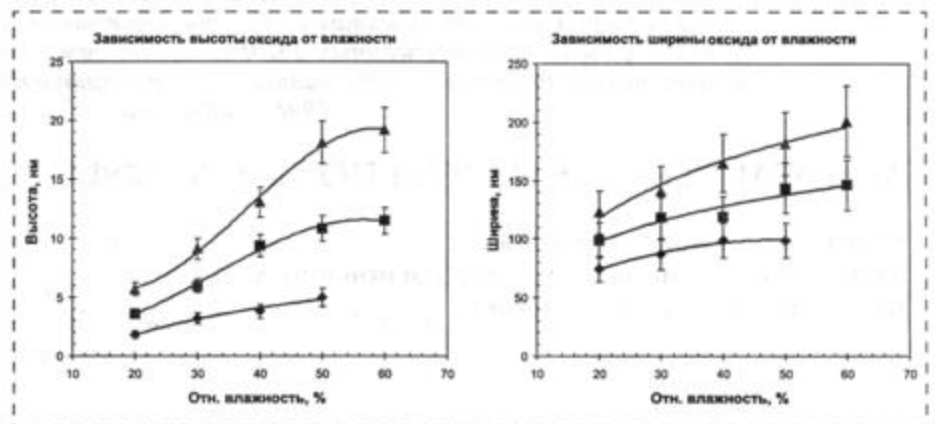


Рис. 3. Зависимость высоты и ширины оксида от влажности для Al на Si. Снизу вверх: амплитуда напряжения, В: 4, 5 и 6

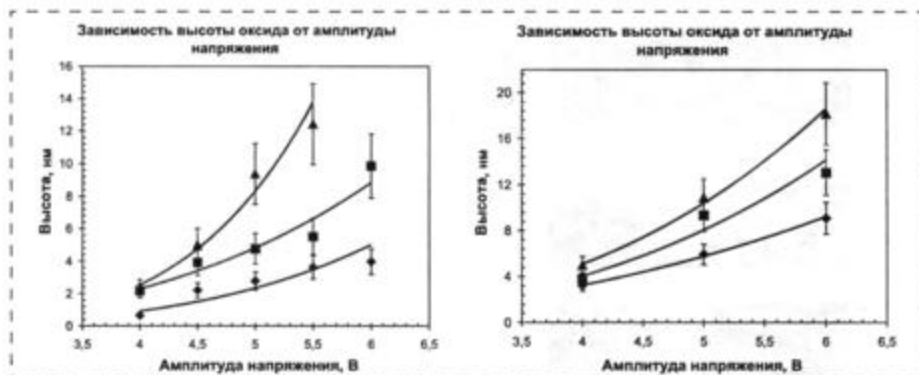


Рис. 4. Зависимость высоты оксида от амплитуды напряжения: слева — Al на GaAs, справа — Al на Si. Снизу вверх: отн. влажность, %: 30, 40 и 50

$K = 6,44$. Так как исходным источником алюминия является пленка толщиной 5 нм (минус 2 нм оксида), то конечный продукт реакции должен быть толщиной 3К, т. е. около 18 нм. Этот результат совпадает с экспериментальной точкой кривой высот наноструктур (20 нм) для 60 % влажности и амплитуды напряжения 6 В.

Качественно анализируя результаты экспериментов, мы видим, что высота структур при изменении влажности в области 20—50 % при амплитуде напряжения выше 4,5 В хорошо аппроксимируется кубической зависимостью. На участке 50—60 %

наблюдается насыщение кривых, которое может быть описано закономерностью поведения адсорбированной на поверхности квазижидкости. Известно, что при малой относительной влажности на поверхности Si(100) адсорбировано 5 нм квазижидкости, при 92 % толщина воды 8 нм [6]. Принимая во внимание аналогичное поведение влаги на поверхности алюминия, можно заключить, что насыщение высот наноструктур наступает вследствие насыщения толщины слоя квазижидкости на поверхности.

Проанализировав поведение кривых для ширины окисленных

дорожек, был сделан вывод, что ширина структур определяется в основном свойствами кантилевров и зависит от дополнительного прижатия, возникающего из-за электростатического взаимодействия заряженного зонда и заряженного образца.

Список литературы

1. Бобринский И. И., Неволин В. К., Рошин В. М., Синсаренко Э. А. Формирование наноконтактов при локальном окислении титановых пленок // Микросистемная техника. 2001. № 11. С. 42—45.
2. Lemeshe S., Gavrilov S., Shevyakov V., Roschin V., Solomatenko R. Investigation of tip-induced ultrathin Ti film oxidation kinetics // Nanotechnology. 2001. N 12. P. 273—276.
3. Ogatay S., Campbell T. J. Parallel molecular dynamics simulations for the oxidation of an aluminium nanocluster // J. Phys. Condens. Matter. 1998. N 10. P. 11449—11458.
4. Rotole J. A., Sherwood P. M. A. X-ray photoelectron spectroscopic studies of the oxidation of aluminium by liquid water monitored in an anaerobic cell // J. Anal. Chem. 2001. N 369. P. 342—350.
5. Kannan T. S., Panda P. K., Jaleel V. A. Preparation of pure boehmite, Al_2O_3 and their mixtures by hydrothermal oxidation of aluminium metal // J. Materials Science Letters. 1997. N 16. P. 830—834.
6. Binggeli M., Mate C. M. Influence of water vapor on nanotribology studied by friction force microscopy // J. Vac. Sci. Technol. 1995. N 13. P. 1312—1315.

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 1998 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 6 за 1998 г. <http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Порождение нового знания в человеко-машинных системах, основанных на когнитивной компьютерной графике

Номер проекта: 98-01-00339

Год представления отчета: 2000

За отчетный период доложены на научных семинарах и конференциях и опубликованы следующие основные результаты:

1. ККГ-обобщение классической ($m = 0$) проблемы Варинга (КПВ) на случай любых $m \geq 1$ (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen>; WEB-address: <http://www.con2com.ru/alexzen/#T08>).

2. Доказательство ККГ-обобщения на случай любых $m \geq 1$ гильбертовского решения КПВ для $m = 0$ (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen/papers/synopsis&contnt-e.html>).

3. ККГ-обобщение основных теорем КПВ (Лагранжа, Вифериха, Баласубраманиана и др.) на неклассический

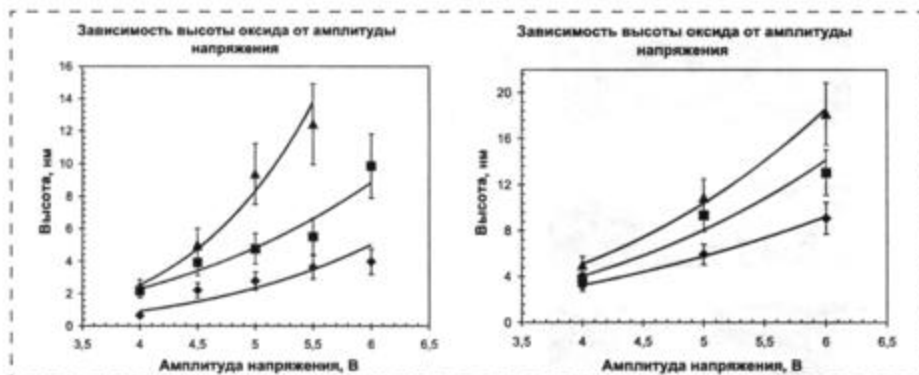


Рис. 4. Зависимость высоты оксида от амплитуды напряжения: слева — Al на GaAs, справа — Al на Si. Снизу вверх: отн. влажность, %: 30, 40 и 50

$K = 6,44$. Так как исходным источником алюминия является пленка толщиной 5 нм (минус 2 нм оксида), то конечный продукт реакции должен быть толщиной 3К, т. е. около 18 нм. Этот результат совпадает с экспериментальной точкой кривой высот наноструктур (20 нм) для 60 % влажности и амплитуды напряжения 6 В.

Качественно анализируя результаты экспериментов, мы видим, что высота структур при изменении влажности в области 20–50 % при амплитуде напряжения выше 4,5 В хорошо аппроксимируется кубической зависимостью. На участке 50–60 %

наблюдается насыщение кривых, которое может быть описано закономерностью поведения адсорбированной на поверхности квазижидкости. Известно, что при малой относительной влажности на поверхности Si(100) адсорбировано 5 нм квазижидкости, при 92 % толщина воды 8 нм [6]. Принимая во внимание аналогичное поведение влаги на поверхности алюминия, можно заключить, что насыщение высот наноструктур наступает вследствие насыщения толщины слоя квазижидкости на поверхности.

Проанализировав поведение кривых для ширины окисленных

дорожек, был сделан вывод, что ширина структур определяется в основном свойствами кантилевров и зависит от дополнительного прижатия, возникающего из-за электростатического взаимодействия заряженного зонда и заряженного образца.

Список литературы

1. Бобринский И. И., Неволин В. К., Рошин В. М., Синсаренко Э. А. Формирование наноконтактов при локальном окислении титановых пленок // Микросистемная техника. 2001. № 11. С. 42–45.
2. Lemeshe S., Gavrilov S., Shevyakov V., Roschin V., Solomatenko R. Investigation of tip-induced ultrathin Ti film oxidation kinetics // Nanotechnology. 2001. N 12. P. 273–276.
3. Ogatay S., Campbell T. J. Parallel molecular dynamics simulations for the oxidation of an aluminium nanocluster // J. Phys. Condens. Matter. 1998. N 10. P. 11449–11458.
4. Rotole J. A., Sherwood P. M. A. X-ray photoelectron spectroscopic studies of the oxidation of aluminium by liquid water monitored in an anaerobic cell // J. Anal. Chem. 2001. N 369. P. 342–350.
5. Kannan T. S., Panda P. K., Jaleel V. A. Preparation of pure boehmite, Al_2O_3 and their mixtures by hydrothermal oxidation of aluminium metal // J. Materials Science Letters. 1997. N 16. P. 830–834.
6. Binggeli M., Mate C. M. Influence of water vapor on nanotribology studied by friction force microscopy // J. Vac. Sci. Technol. 1995. N 13. P. 1312–1315.

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 1998 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 6 за 1998 г. <http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Порождение нового знания в человеко-машинных системах, основанных на когнитивной компьютерной графике

Номер проекта: 98-01-00339

Год представления отчета: 2000

За отчетный период доложены на научных семинарах и конференциях и опубликованы следующие основные результаты:

1. ККГ-обобщение классической ($m = 0$) проблемы Варинга (КПВ) на случай любых $m \geq 1$ (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen>; WEB-address: <http://www.con2com.ru/alexzen/#T08>).

2. Доказательство ККГ-обобщения на случай любых $m \geq 1$ гильбертовского решения КПВ для $m = 0$ (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen/papers/synopsis&contnt-e.html>).

3. ККГ-обобщение основных теорем КПВ (Лагранжа, Вифериха, Баласубраманиана и др.) на неклассический

случай $m > 0$ (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen/#T08>).

4. ККГ-открытие новых объектов классической теории чисел — инвариантных множеств Обобщенной проблемы Варинга (ОПВ) (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen/#T08>).

5. ККГ-открытие нового универсального аддитивно-го свойства натуральных чисел (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen/#T08>).

6. ККГ-открытие нового типа математических и логических рассуждений — так называемых EA-Теорем (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen/#T08>).

7. ККГ-открытие метода супериндукции — нового метода доказательства общих математических утверждений (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen/#T08>).

8. ККГ-открытие аддитивной версии классического решета Эратосфена (см. WEB-address: http://www.com2com.ru/alexzen/hm_fom/additive_sieve.html).

9. ККГ-открытие нового класса (виртуальных) геометрических объектов, образованных обыкновенными натуральными числами (см. WEB-address: <http://www.com2com.ru/alexzen/vgeom/vgeom.html>).

10. ККГ-визуализация и решение проблемы континуума (первой проблемы Гильберта) (см. WEB-Sites of the "VISUAL MATHEMATICS" e-journal: <http://www.mi.sanu.ac.yu/vismath/zen/index.html>; <http://members.tripod.com/vismath/zen/index.html>).

11. В течение 1999 г. опубликовано девять статей, около 50 больших (30—80 Кб) научных сообщений на ИНТЕРНЕТ-дискуссию по истории, основаниям и философии математики и логики и сделано 13 научных докладов на семинарах МГУ, ИМАШ РАН, ИПУ РАН, Российской ассоциации искусственного интеллекта и др.

Осредненная динамика фазовых включений в заполненных жидкостью вибрирующих полостях

Номер проекта: 98-01-00269

Год представления отчета: 1999

Разработана и изготовлена экспериментальная установка для изучения динамики фазовых включений в заполненных жидкостью полостях, совершающих высокочастотные вращательные вибрации. Исследовано поведение твердого сферического тела в полости в форме сектора цилиндрического слоя, совершающей колебания вокруг своей оси, расположенной под некоторым углом к вертикали. Плотность тела отличается от плотности жидкости. Показано, что вращательные колебания приводят к разделению твердых включений: тела, менее плотные по сравнению с жидкостью, перемещаются к внешней по отношению к оси вращения границе полости, более плотные — к внутренней. Вибрационное воздействие может конкурировать с действием силы тяжести (тяжелые стальные шарики перемещаются в направлении, противоположном направлению действия силы тяжести) и особенно эффективно будет проявляться в условиях пониженной гравитации. Эффективная вибрационная сила проявляется во всем объеме полости. Более того, вибрационный эффект проявляется как при ламинарном, так и при турбулентном режимах обтекания осциллирующего тела; таким образом, он не огра-

ничен предельным случаем малых амплитуд вибраций. Дано теоретическое объяснение обнаруженного эффекта. На основании проведенных экспериментов делается вывод об эффективности применения вращательных вибраций для разделения фаз. Изучено вибрационное взаимодействие двух одинаковых сферических тел в описанных выше условиях. Показано, что их взаимодействие существенно определяется безразмерной частотой вибраций (отношением размера тела к толщине вязкого скин-слоя): в случае высоких частот вибрации всегда приводят к азимутальному отталкиванию тел; в области низких частот такой эффект проявляется пороговым образом при повышении интенсивности вибраций. Изучена осредненная вибрационная сила взаимодействия тел в зависимости от расстояния между ними.

Автоматное моделирование процессов взаимодействия сложных сред (на примерах биологических тканей и активных воздействий на них)

Номер проекта: 98-01-00652

Год представления отчета: 2001

Работа над проектом сосредоточилась на конкретизации тех алгоритмов, которые должны реализовываться в мозаичных структурах. Основные из этих алгоритмов — распознавательские по характеру. Вводится понятие условного изображения как конечного (непустого) множества точек на плоскости. Код изображения — пара множеств, первое из которых — множество номеров точек, второе — множество чисел, получаемых как отношение площадей треугольников с вершинами в точках изображения. Доказано, что код определяет изображение с точностью до аффинных его преобразований. Доказано, что если в определении кода вместо трехточечников рассматривать любые другие, то это свойство кода не сохраняется. Рассматриваются аналогичные построения для трехмерного случая. Показано, что существуют коды, определяющие изображения с точностью до изометрических преобразований и с точностью до преобразований подобия. Представлен алгоритм, позволяющий восстановить трехмерное изображение по его плоским проекциям, заданным с точностью до аффинных преобразований.

Математическое моделирование фильтрационных течений многокомпонентных смесей

Номер проекта: 98-01-00380

Год представления отчета: 2001

При моделировании фильтрации смеси возникает проблема расчета фазового равновесия в пористой среде, особенно вблизи критической точки. Моделируемая смесь может быть в одно- или двухфазном состоянии (газ — жидкость). Наличие фазового перехода конденсация — испарение в пористой среде усложняет гидродинамическую картину течения. В этом случае при моделировании фильтрации необходимо учитывать ряд физических процессов, обусловленных критическими явлениями, такими как ретроградная конденсация, неравновесность, флуктуации плотности, критическая адсорбция и т. д.

В некоторой области течения распределение фаз может иметь пленочный характер. Здесь следует учитывать конвективный массообмен, модифицировать зависимости фазовых проницаемостей и макрошероховатостей, зависимости капиллярных сил.

Были проанализированы "классические" уравнения состояния для смесей: многокоэффициентные и кубические Ван-дер-Ваальсовского типа. "Классические" уравнения не работают вблизи критической кривой смеси, там необходимо использовать другие подходы. Кроме того, пористая среда вносит свои порой существенные коррективы в уравнения состояния. В рамках масштабной теории развит общий подход, основанный на гипотезе изоморфности и гипотезе перемешивания физических полей, позволяющий вычислять различные термодинамические величины как в окрестности критических точек, так и в других, так называемых особых точках фазовых диаграмм (обусловленных близостью критической точки смеси).

Изучен вопрос о распространении сильных и слабых разрывов решений уравнения многокомпонентной фильтрации. Показано, что скорости распространения слабых разрывов концентрации суть решения определенной задачи на собственные значения. Получено энтропийное условие, которому должны удовлетворять физически допустимые сильные разрывы. Установлено, что применительно к уравнениям многокомпонентной изотермической фильтрации энтропийное условие выражается требованием уменьшения свободной энергии смеси: производство свободной энергии на разрыве меньше ее подвода с границ области, содержащей этот разрыв.

Разработаны вычислительные алгоритмы для численного интегрирования уравнений двухфазной и двухкомпонентной фильтрации. Построены точные решения задачи Баклея—Леверетта и стационарных уравнений двухкомпонентной фильтрации с модельным уравнением состояния фаз. Разработанные вычислительные алгоритмы протестированы на указанных точных решениях и продемонстрировали удовлетворительную эффективность. Показано, что условие невозрастания свободной энергии смеси на разрыве накладывает ограничения на возможные типы разрывов концентраций. Допустимыми являются разрывы, переводящие смесь из однофазного состояния в однофазное того же типа, и разрывы, переводящие смесь из однофазного состояния в двухфазное, но не наоборот.

Для тестирования вычислительных алгоритмов построены аналитические (автомодельные) решения уравнений двухкомпонентной изотермической фильтрации, содержащие сильные и слабые разрывы. Разработаны и реализованы вычислительные алгоритмы для численного интегрирования пространственных уравнений двухкомпонентной фильтрации. В плане термодинамического описания рассматривались два варианта — модель нелетучей нефти и смесь с модельным потенциалом Гиббса.

Теоретически исследована устойчивость стационарных течений двухкомпонентных смесей с фазовыми переходами. Проведенное исследование не обнаружило неустойчивостей ни в области обычного термодинамического поведения смеси, ни в области ретроградной конденсации. Исследованы бинарная (метан—гептан) и тройная (метан—пентан—гептан) смеси. С теоретической точки зрения данные системы представляли особый интерес потому, что в них возможно трехфазное существование. Обнаружено изоморфное поведение те-

плоемкости при наличии в системе трехфазного равновесия, что является первым прямым подтверждением гипотезы изоморфности, на которой, по существу, основано описание околокритического поведения смесей.

Математическое моделирование жидких, полимерных и полиэлектролитных сред на основе метода интегральных уравнений

Номер проекта: 98-01-00375

Год представления отчета: 2001

В 1998 г. предложены две модели полиэлектролитной системы, основанные на системе PRISM интегральных уравнений, явно описывающие два противоположно заряженных компонента. Для обеих моделей впервые разработаны итерационные численные алгоритмы решения соответствующей системы уравнений. Созданы компьютерные программы, реализующие эти алгоритмы на ЭВМ. Проведены проверочные расчеты, позволяющие оценить точность разработанных алгоритмов, и расчеты некоторых термодинамических характеристик полимерных сред, результаты которых сопоставлены с результатами других исследователей. В 1998—1999 гг. на примере однокомпонентной модели получены новые теоретические результаты о сходимости итераций, основанные на применении первого метода А. М. Ляпунова (устойчивость по первому приближению). В 1999 г. метод решения PRISM интегральных уравнений для полиэлектролитных систем распространен на другой класс полимерных сред — полиамфолиты. Полиамфолиты — это сополимеры, состоящие из в целом электронейтральных макромолекул, в которых противоположные заряды распределены вдоль цепи по определенному закону. Проведены расчеты термодинамических характеристик полиамфолитных сред. В 2000 г. предложены алгоритмы и созданы программы решения RISM и PRISM интегральных уравнений на плоскости. Традиционный подход, основанный на алгоритме Ладо (F. Lado // J. Chem. Phys. 1968, 49, 3042) вычисления преобразования Бесселя—Ханкеля, не позволяет проводить расчеты на сетках с большим (более 100) числом узлов, что делает принципиально невозможным его использование в полимерных задачах. Новый подход основан на применении разработанного исполнителями настоящего проекта экономичного дискретного аналога двумерного преобразования Фурье-функций с симметрией вращения, в результате чего становятся доступными для расчета полимерные задачи на сетках с большим (более 1000) числом узлов. Проведено сопоставление расчетов по новому алгоритму и методу Ладо и выявлено совпадение результатов в пределах общей доступной области.

Интегрированное программирование роботов на основе методов нечеткой логики с использованием "перчаточного" интерфейса

Номер проекта: 98-01-01103

Год представления отчета: 2000

Разработаны теоретические принципы обучения роботов выполнению типовых сборочных операций на основе использования методов нечеткой логики и специ-

ального аппаратного интерфейса (осязательные перчатки или браслет). Конкретные результаты этого этапа следующие:

- обоснование метода формирования программы обучения в виде последовательности "сенсорных образов", являющихся целями для исполнительных системы управления роботом (метод "программирования показом");
- разработка и реализация в виде макета нового человеко-машинного интерфейса (осязательные перчатки, браслет) для осуществления программирования посредством "показа" будущих действий робота;
- разработка тестового варианта задачно-ориентированного языка управления роботами, реализующего метод программирования на основе интеграции обучения показом и задачно-ориентированного программирования;
- разработка новых эффективных методов воспроизведения запрограммированных операций, в том числе метода соединения и скрепления собираемых деталей, основанного на использовании квазипотенциальной силовой обратной связи;
- экспериментальное тестирование разработанных методов.

Теоретическое исследование поведения многофазных систем в вибрационных полях

Номер проекта: 98-01-01012

Год представления отчета: 2000

Исследовано влияние поступательных вибраций линейной и круговой поляризации на форму капли жидкости или газового пузыря, окруженных жидкостью другой плотности. Показано, что независимо от соотношения плотностей наблюдается сжатие включения в направлении оси вибраций. Однако природа эффекта сжатия различна для капли и пузыря, что приводит к различию во влиянии ограниченности размеров сосуда. Обнаружено, что вынужденные колебания капли в поле линейно-поляризованных вибраций сопровождаются нелинейным резонансом: максимум амплитудно-частотной характеристики приходится на частоту вибраций, вдвое меньшую частоты первой моды собственных колебаний.

Изучена квазиравновесная форма капли на колеблющейся подложке. Предполагалось, что частота вибраций меньше нижней собственной частоты колебаний капли (что позволяет не рассматривать резонансы), но достаточно велика по сравнению с вязким декрементом. Получено решение для пульсационного течения и квазиравновесной формы поверхности капли в виде рядов. Показано, что вибрационное воздействие приводит к сжатию капли в направлении оси вибраций. Для малой интенсивности вибраций в пульсационной задаче учтена динамика краевого угла. Обнаружено, что искажение формы капли максимально, если краевой угол не меняется при пульсационном движении.

Исследовано поведение капли (пузыря) в неоднородном пульсационном потоке. Рассмотрены пульсации высокой частоты и малой амплитуды. Для случая, когда размеры капли малы по сравнению с характерными масштабами неоднородностей невозмущенного потока, получены общие формулы для средней силы, действующей

на каплю со стороны потока, и средней формы капли при неоднородных пульсациях произвольного вида. Проведен конкретный расчет средней силы и формы капли в неоднородном пульсационном потоке, создаваемом качательными вибрациями. Методами осреднения получены уравнения и граничные условия на поверхности раздела сред при воздействии высокочастотных неакустических вибраций, модулированных низкой частотой. На их основе исследована устойчивость плоской поверхности раздела невязких сред в поле вертикальных вибраций.

Изучены условия возбуждения параметрического резонанса на частоте модуляции. Определены длины резонансных волн, в приближении малой вязкости сред вычислен порог возбуждения параметрического резонанса. Исследована устойчивость плоской поверхности раздела фаз в состоянии, близком к термодинамической критической точке, при вибрациях сосуда в направлении, перпендикулярном поверхности раздела. Показано, что эффекты сжимаемости оказывают на движение границы раздела сравнительно малое влияние. Главными факторами околокритического состояния являются высокий порог возбуждения параметрического резонанса и малое значение коэффициента межфазного натяжения, что, даже при умеренных значениях частоты вибраций, приводит к возбуждению ряби с малой длиной волны. Показано, что в изотермо-изохорических условиях решение задачи о стационарном зародыше новой фазы не единственно, причем зародыш меньшего радиуса всегда неустойчив.

Распознавание и классификация пространственных форм гибких молекул с использованием структурных символьных спектров и эволюционных алгоритмов

Номер проекта: 98-01-00324

Год представления отчета: 2001

Продолжение моделирования зависимостей "структура — свойства" для гибких молекул. Признаковые пространства, в которых проводится описание молекул — структурные спектры помеченных графов — формируются автоматически. Тип признакового пространства определяется уровнем детализации представления структуры. Исследована прогностическая способность двух типов классифицирующих функций — линейной и статистического взвешенного голосования, примененных к таблицам "молекула — признак", которые описывали как топологическое, так и пространственное представление молекул обучающей структурной БД (СБД). Трехмерные формы молекул были рассчитаны для химических структур, обладающих: антиВИЧ активностью, антималярийной активностью и мускусным запахом.

Для каждого вида активности сопоставлялись компьютерные модели классификации свойства: линейные модели, формируемые эволюционным алгоритмом, и модели взвешенного статистического голосования. Показано, что обе модели на одних и тех же признаковых пространствах дают сопоставимые (по прогностическому качеству) результаты для биологической активности. Программно реализован генетический алгоритм поиска метрик, для которых верна гипотеза компактности распознавания образов. Вычислительные эксперименты подтвердили сходимость генетического алгоритма.

CONTENTS

- Despotuli A. L., Andreeva A. V.** *Creation of New Types of Thin-Film Solid Electrolyte Supercapacitors for Microsystems Technology and Micro(Nano)Electronics* 2

For thin-film supercapacitors the critical consideration of modern state of developments is made.

With the aim of creation of supercapacitors suited for MST, micro- and nanoelectronics the conception of the perfect (coherent) electrode/solid electrolyte interfaces is proposed. Thin-film capacitive heterostructures of different types are developed and investigated.

- Kozin S. A.** *The Technology of Microelectromechanical Structures (MEMS) in the Development of Integral Generators of Mechatronical Parameters* 10

The integral of the mechanical parameters developed at the scientific research Institute of physical dimensions (Penza) are described.

- Slesarev Yu. N.** *Erasing Magnetic Media Models During Thermomagnetic Recording* 15

Erasing magnetic media models on the basis of static and self-consistent model of thermomagnetic recordings are executed. The causes of a non coincidence theoretically and experimentally of obtained data encompassing by discrepancies fixation the moment erasure because of noise in a measuring system are detected.

- Fomin L. F.** *The Control Motions of Wheeled Microrobots in Tubes with the Use of Centrifugal Forces* 18

The motion of microelectromechanical systems — MEMS (wheeled microrobots) on the inner surfaces of arbitrary situated in the space tubular vessels with the use as pressing forces the centrifugal forces, arising at the motion of any body on the curvilinear trajectory, is investigated.

- Sobolev A. N.** *Physical Effects as Basis of Structural Elements of Microsystem Technics* 23

The questions have been touched, connected with the usage of physical effects while working upon structural elements of microsystem technics and laws in the system of physical elements as methodological basis for technical problem solving.

- Bogonin M. B.** *Simulation of a Liquid Anisotropic Etching of Silicon* 30

The introduced creation stages of anisotropic etching of silicon dynamic model based on computer technology. Showed results of model convergence with a real manufacturing process of anisotropic etching of silicon.

- Strezh S. V., Troshin E. V.** *Cosmic System Creation of the Base of Microapparatuses* 35

Problems of cosmic system creation on the base of microsystem technique are examined. Orbital grouping consist of a great amount of cosmic apparatuses having some kilograms mass. Such grouping is considered as a single whole unit (object) spreaded in space. The most important component of examined systems is the informational one.

- Bulatov A. N., Nevolin V. K.** *The Anode Oxidation Fine Film Aluminium at Probe* 42

Experimental study and analysis of nanostructures parameters (height and width) carried out. The structures formed by aluminum films anodic oxidation in condition of controlled humidity. The behavior regularities of the local film oxidation parameters were found in relative humidity ranged from 20 % to 60 %.

Подписку за рубежом принимают:

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

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

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