

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 621.049.77:681.586.32:539:319

Е. С. Горнев, Н. А. Зайцев, М. Ф. Равилов,
И. М. Романов, С. О. Ранчин,
"НИИМЭ и Микрон"

ОБЗОР МИКРОГИРОСКОПОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИЛИ ОБЪЕМНОЙ МИКРОМЕХАНИКИ

Дан обзор систем ориентации в пространстве на основе элементов микромеханики (микрогироскопов), сформированных по технологии поверхностной или объемной микромеханики.

Как известно, гироскопы широко используются в летательных аппаратах для ориентации в пространстве, но это в основном — механические гироскопы. Подобные гироскопы можно изготовить и по технологии полупроводниковых интегральных схем [1—4]. Микромеханические гироскопы, изготовленные с использованием достижений полупроводниковой кремниевой технологии, имеют большие перспективы для различных областей применения и существенные резервы в уменьшении размеров, улучшении параметров и снижении издержек на их производство. Возможности прецизионной обработки материалов, групповая технология формирования приборов, совмещение (или близкое, взаимное расположение) механической и электрических частей прибора, а также разнообразие технологических процессов являются неоспоримыми достоинствами использования достижений микроэлектроники при изготовлении микромеханических гироскопов.

Принцип действия у микромеханических гироскопов тот же, что и у обычных гироскопов. Но так как очень трудно по полупроводниковой кремниевой технологии изготовить долговечные и надежные вращающиеся части, то в микрогироскопах используется колебательное движение массы, подвешенной на торсионах.

Существует большое разнообразие конструкций микрогироскопов. Все они содержат несколько подвижных механических систем, которые могут колебаться во взаимно перпендикулярных плоскостях. Колебания в одной плоскости являются вынужденными. Наведенные колебания в другой плоскости появляются тогда, когда микрогироскоп поворачивается.

В работе [5] рассматривается интегральный микрогироскоп колебательного типа.

Структурная схема микрогироскопа представлена на рис. 1. Она содержит внутреннюю колебательную систему (ВКС) 1 и внешнюю рамку (ВР) 2. Между собой ВКС и ВР соединены с помощью упругих торсионов 3. Внешняя рамка соединена с неподвижным основанием посредством аналогичных упругих торсионов 4. Внешняя рамка и внутренняя колебательная система электрически соединены между собой и подключены к нулевой шине. ВКС может совершать вынужденные колебания относительно оси X под действием генератора гармонических колебаний 5 и системы обкладок 6, которые совместно с ВКС образуют плоский конденсатор. В случае вращения системы вокруг оси Z внешняя рамка будет совершать колебания относительно оси Y . Амплитуда колебаний является функцией угловой скорости Ω и частоты колебаний. Информация об угловой скорости снимается с помощью системы обкладок 7 (образующих с внешней рамкой плоский конденсатор) и устройства обработки информации.

Для возбуждения колебаний и снятия информации об угловой скорости целесообразно использовать конденсаторы типа металл—диэлектрик—полупроводник. При этом все подвижные части микроколебательной системы необходимо подключить к нулевой шине. Это означает, что материал колебательных систем должен быть проводящим. Как видно из рис. 1, подключение к нулевой шине внутренней колебательной системы и внешней рамки обеспечивается через торсионы.

Недостатком такого способа возбуждения колебаний и снятия полезной информации является необходимость в прецизионном изготовлении зазора в МОП-конденсаторах. В большинстве случаев это достигается методами прецизионного травления и посадки колебательных систем в специальные посадочные места.

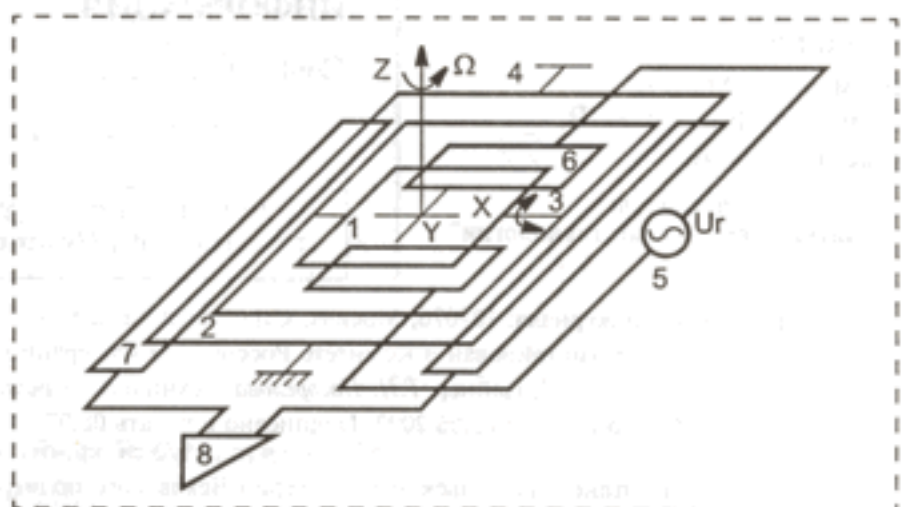


Рис. 1. Структурная схема микрогироскопа

Для эффективной работы микрогироскопа необходимо обеспечить одинаковую собственную частоту колебаний внутренней системы и внешней рамки. Одним из наиболее эффективных способов подстройки собственных частот колебаний внутренней колебательной системы и внешней рамки является изменение длины торсиона и/или массы системы.

Избежать прецизионной посадки можно путем формирования колебательной системы на многослойных структурах (типа структур кремний на изоляторе — КНИ), имеющих строго определенную толщину монокристаллического кремния и промежуточного слоя диэлектрика (SiO_2 или многокомпонентного стекла) на специальном основании. Технология получения подобных структур включает операции прецизионной химико-механической обработки пластин кремния, формирование рельефа методами травления (обычно жидкостного анизотропного и/или плазмохимического), наращивание вспомогательных и конструктивных слоев, сращивание кремниевых пластин. Повторные операции химико-механической обработки, травления и наращивания позволяют формировать необходимую многослойную структуру.

Конструкция микрогироскопа представлена на рис. 2.

Ее основу составляет колебательная система в виде центральной рамки, прикрепленной двумя торсионами к внешней рамке, которая, в свою очередь, прикреплена торсионами (расположенными перпендикулярно направлению торсионов центральной рамки) к основанию. Генерация и измерение параметров колебаний осуществляется с помощью емкостной схемы, расположенной на несущей подложке.

В работе [6] рассматривается конструкция микромеханического вибрационного гироскопа-акселерометра, конструктивно выполненного в виде маятника с емкостным датчиком угла и электростатическим датчиком момента.

Микромеханический гироскоп-акселерометр (рис. 3) содержит плату из кристалла на основе диэлектрика 3 (стекло, ситалл, сапфир, кремний), на

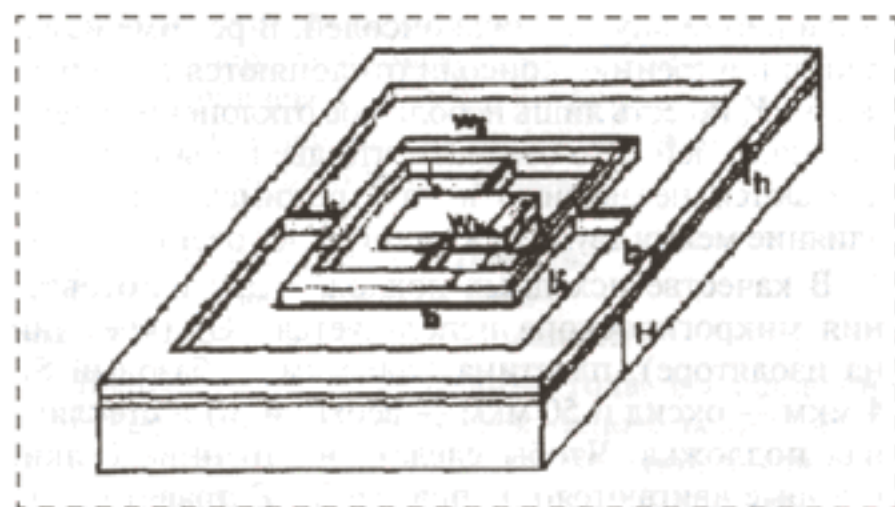


Рис. 2. Конструкция микрогироскопа

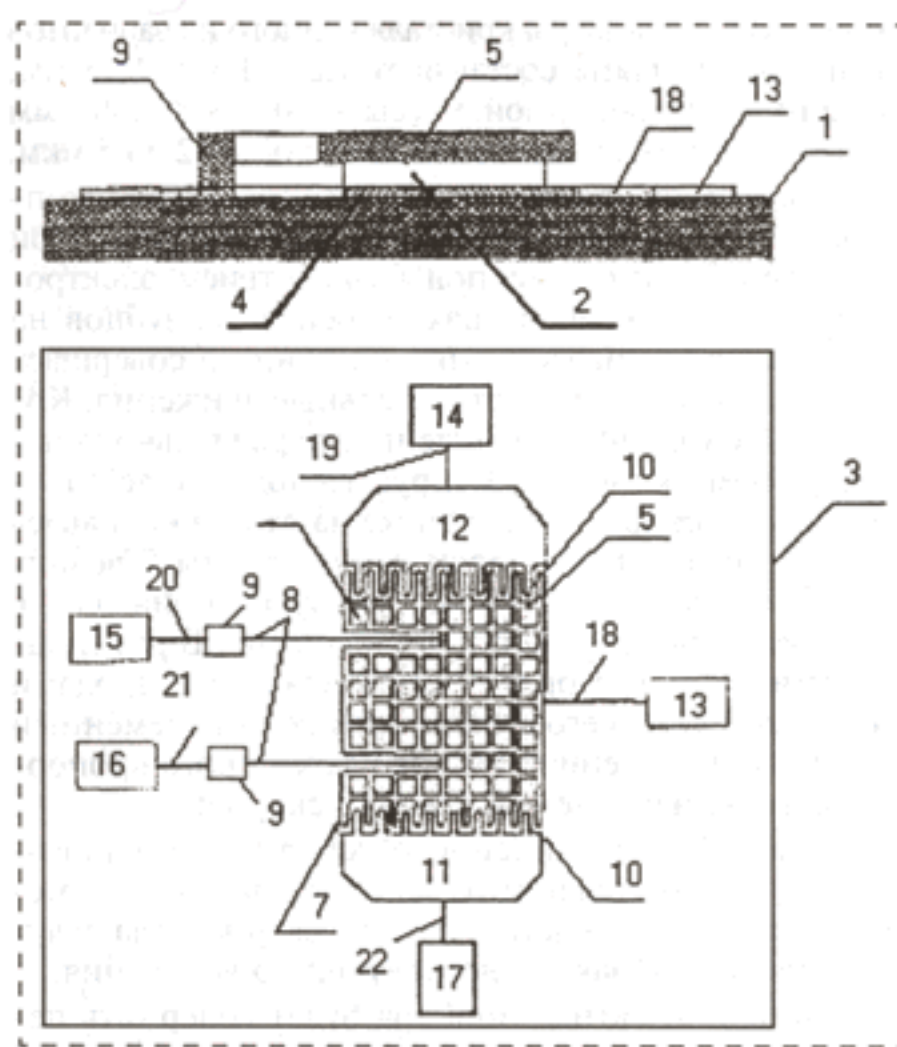


Рис. 3. Общий вид чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа-акселерометра

которой размещены элементы электроники и сборки узла чувствительного элемента 2.

Инерционный узел чувствительного элемента консольного типа состоит из пластины 5 в форме квадрата (на основе кремния или металла), на поверхности которого равномерно распределены сквозные отверстия 6, выполненные в форме многоугольника. Боковые стороны пластины 5 выполнены в виде гребенчатых зубцов 7.

Элементы подвеса инерционной массы представляют собой две параллельные упругие консоли 8, жестко закрепленные с одной стороны на опорах 9, основания которых жестко закреплены на плате 1. С другой стороны консоли 8 соединены с пластиной. Соединение выполнено на линии геометрического центра пластины инерционной массы, а сами консоли располагаются в параллельных разрезах пластины. Консоль с поперечным сечением в форме квадрата является оптимальной с точки зрения технологичности изготовления и настройки измерительных характеристик устройства. неподвижные электроды 10 электростатической системы возбуждения расположены на опорах 11 и 12, которые закреплены на плате 1.

На плате 1 сформированы электроды 4 датчика угла и момента и пять контактных площадок 13—17, соединенных с помощью пяти токопроводящих дорожек 18—22 с электродом датчика угла и датчика момента, электродами электростатической системы возбуждения 11 и 12 и электродами инерцион-

ной массы 5. Размеры кристалла одного из вариантов исполнения платы составляют $1,8 \times 1,8 \times 1,15$ мм, пластины инерционной массы — $0,308 \times 0,308$ мм при зазоре между пластиной и платой от 2 до 5 мкм.

Микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр работает следующим образом. При включенном питании под воздействием электростатических сил в зазорах гребенчатых зубцов на частоте источника питания пластина 5 совершает боковые возвратно-поступательные движения. Когда относительно направления, параллельного направлению консолей 8 упругого подвеса, действует угловая скорость, на той же частоте в направлении, ортогональном плоскости пластины 5, возникают кориолисовы силы, которые приводят в колебательное движение эту пластину. В результате изменяется зазор и емкость между электродами датчика угла. На его выходе возникает переменный сигнал (напряжение), амплитуда которого пропорциональна измеряемой угловой скорости.

При действии линейного ускорения в направлении, ортогональном плоскости пластины 5, межэлектродная емкость и сигнал датчика угла будут изменяться по закону действующего ускорения.

Выходной сигнал прибора будет содержать периодическую составляющую, амплитуда которой пропорциональна входной угловой скорости основания, и постоянную составляющую, пропорциональную его линейному ускорению. Это позволяет обеспечивать одновременно измерение угловой скорости и линейного ускорения с помощью одного прибора. Разделение сигналов по каналам гироскопа и акселерометра проводится по частотному признаку с использованием фильтрации.

В работе [7] представлен микрогироскоп, который имеет независимые консоли для режимов управления и измерения. Такие приборы разработаны для того, чтобы уменьшить взаимовлияние режимов управления и измерения. Вид сверху и поперечные сечения приведены на рис. 4.

Колебательная масса перемещается горизонтально вдоль оси X с помощью электростатических сил. Вертикальные колебания под действием силы Кориолиса (при угловом вращении вокруг оси Y) определяются путем измерения емкости между колеблющейся пластиной и измерительным электродом. В отсутствие силы Кориолиса движение колебательной массы является горизонтальным. Однако в действительности это движение не строго горизонтально, вследствие механических напряжений в структуре, возникших в процессе изготовления микрогироскопа.

Структура имеет независимые пары балок для режимов управления и измерения. Масса осциллятора соединена с рамкой, которая поддерживается четырьмя балками, закрепленными на подложке. Осцилятор имеет размеры $800 \times 1200 \times 50$ мкм. Внутренние балки — шириной 20 мкм и высотой 10 мкм, а внешние балки — шириной 5 мкм и вы-

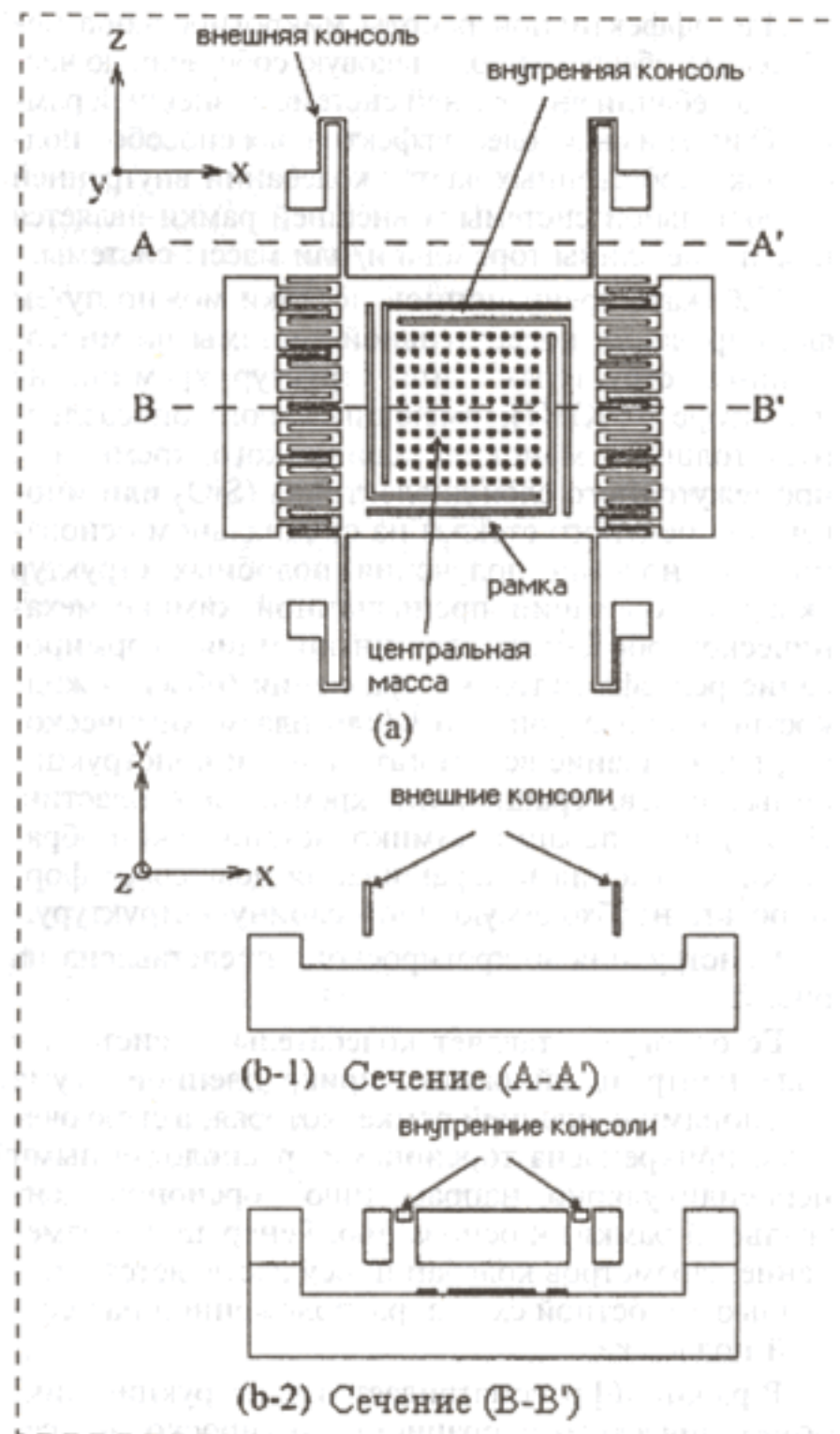


Рис. 4. Вид сверху и поперечные сечения микрогироскопа

сотой 50 мкм. Гироскоп управляется гребенчатыми электродами. Под колебательной массой есть два электрода для определения угловой скорости. В управляющем режиме внешние консоли отклоняются в направлении X , но есть лишь небольшое отклонение внутренних консолей. В режиме измерения внутренние консоли отклоняются в направлении Y , но есть лишь небольшое отклонение внешних консолей. Это означает, что две пары консолей двигаются независимо в двух режимах и взаимовлияние между двумя режимами будет очень слабым.

В качестве исходных подложек для изготовления микрогироскопа используется SOI (кремний на изоляторе), пластина (200 мкм — базовый Si, 4 мкм — оксид и 50 мкм — верхний Si) и стеклянная подложка. Чтобы сделать внутренние балки, которые двигаются в направлении Z , травят около 40 мкм верхнего кремния с помощью реактивного

ионного травления. Чтобы сделать зазор между двумя электродами и кремниевыми массами, стеклянную подложку травят на 2 мкм в HF. После осаждения слоев Au и Cr на стеклянной подложке с помощью жидкостного травления формируют два электрода. Затем пластина SOI и стеклянная пластина соединяются вместе с помощью анодного соединения. Базовый кремний и изоляционные слои удаляют жидкостным травлением в TMAN и HF соответственно. В конце реактивным ионным травлением снимается верхний слой кремния на стеклянной подложке для формирования осциллятора. РЭМ-фотография изготовленного микрогироскопа представлена на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

Резонансные частоты и амплитуда колебаний были измерены с помощью измерителя с двухмерным смещением лазера. При измерении микрогироскопа его помещали в вакуумную камеру, которая уменьшает затухание колебаний в воздухе. Давление в камере было ниже 100 Па.

Структурная схема обработки сигнала для гироскопа показана на рис. 6.

Изменение емкости между измеряемым электродом и массой осциллятора определяется при помощи МОП-транзистора (FET), который функционирует как C—V-преобразователь. Выходной сигнал гироскопов измерялся путем подстройки частоты колебаний с помощью источника постоянного напряжения. Разрешение гироскопа составило 0,07°/с при ширине зоны 10 Гц.

В патентах США [8—11] сделан ряд предложений по улучшению конструкции микрогироскопа колебательного типа.

В работе [12] и [13] представлен микрогироскоп вращательного типа. В отличие от ранее представленных микрогироскопов в нем вынужденное колебание массы является не поступательным, а вращательным.

На рис. 7 представлен схематический вид этого гироскопа (см. третью сторону обложки).

Механический сенсорный элемент состоит из гребенчатых приводов, которые образуют спицы внутреннего колеса, и внешней прямоугольной структуры, называемой вторичным осциллятором. Вся подвижная структура электростатически при-

водится во вращательное колебание вокруг оси Z четырьмя гребенчатыми приводами (первичные колебания). Остающиеся четыре гребенчатых конденсатора используются, чтобы определить первичное колебание. Когда устройство вращается вокруг оси X, возникают силы Кориолиса, которые вызывают вращательное колебание вокруг оси Y (вторичные колебания). В этом направлении высокая жесткость лучевого подвеса подавляет колебание внутреннего колеса. Только прямоугольная структура может следовать силам Кориолиса, потому что она отделена от внутреннего колеса консолями. Колебания вторичного осциллятора вокруг оси Y определяются по изменению емкости между вторичной колебательной системой и электродами подложки.

Подавление движения внутреннего колеса вне плоскости предотвращает любое изменение в перекрытии гребней в направлении Z. Таким образом, подавляются нежелательные изменения приводящей силы, которые повышали бы нелинейность выходных характеристик.

Этот микрогироскоп был изготовлен по технологии поверхностной микромеханики. В качестве структуроформирующего слоя используется поликремний толщиной 10,3 мкм. Большая толщина достигается использованием эпитаксиального осаждения поликремния. В дополнение к функциональному слою поликремния внизу имеется второй тонкий слой поликремния, который служит в качестве межсоединений.

Комплементарные несущие сигналы генерируются бистабильной схемой. Когда вторичный осциллятор не колеблется вокруг оси Y, вторичные конденсаторы сбалансированы и на выходе сигнал отсутствует. Когда вторичный осциллятор приводится в движение силами Кориолиса, его конденсаторы становятся разбалансированными. Далее выходной сигнал поступает на схему обработки сигнала.

Тесты были проведены с сенсором, помещенным в вакуумную камеру, при давлении 10^4 Па. Вращающийся столик внутри камеры соединен с внешним двигателем феррожидкостным межслойным соединением. Электрические сигналы передаются скользящими кольцами. Средний квадратичный шум на входе при нулевой скорости, измеренный с помощью высокочастотного фильтра (ВЧФ) первого порядка с частотой 50 Гц, соответствует разрешению 0,05 °/с. С включенным двигателем значение действующего шума сенсора равно 0,15—0,20 °/с.

Чувствительность сенсора приблизительно равна 8 мВ/г(рад/с) с выходным сигналом сенсора 2,5 В при нулевой скорости на входе. Нелинейность выходного сигнала на полной шкале времени составила меньше, чем 0,3 %.

Как уже упоминалось, указанные выше измерения были проведены при давлении 10^{-2} мбар (1 Па).

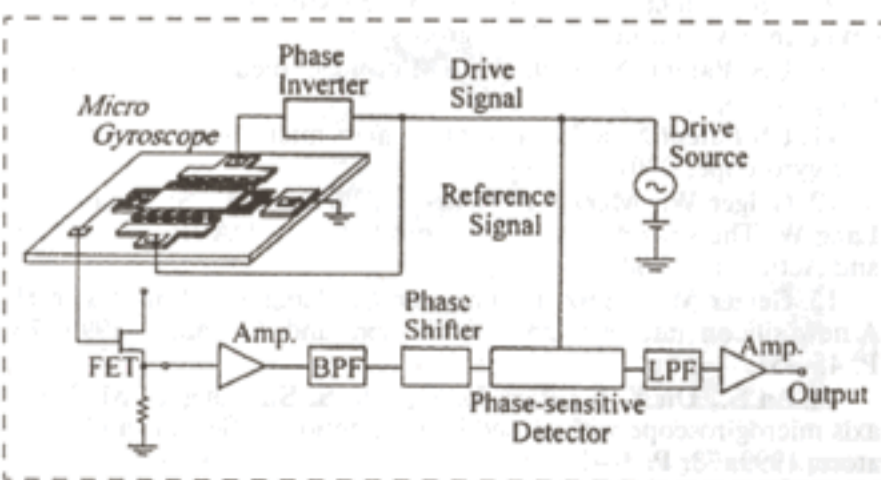


Рис. 6. Структурная схема обработки сигнала гироскопа

Дальнейшее снижение давления приводит к более высокому фактору качества и меньшему броуновскому шуму. В принципе, это дает возможность улучшить рабочие характеристики сенсора или позволяет иметь такие же характеристики при меньших размерах сенсора. Амплитуда первичных колебаний гироскопа ограничена стопперами до 1° , что используется как защита от перегрузки и для управления амплитудой вибрации без электрической управляющей схемы. При приводном напряжении, равном 10 В, достигается максимальное отклонение для давления приблизительно 10^2 Па.

При увеличении давления амплитуда вибрации и чувствительность уменьшаются, приводя к худшему разрешению. В диапазоне $10^2 \dots 10^3$ Па скоростной эквивалент шума увеличивается от 0,05 до $0,5^\circ$. При давлении $1 \cdot 10^5$ Па его значение $\sim 7^\circ/\text{с}$. Зависимость от давления показывает, что даже при умеренном вакууме получается высокое разрешение, которое может быть важным в отношении надежности вакуумного корпусирования гироскопа. По сравнению с другими микромеханическими гироскопами возможны высокие давления, потому что у него сравнительно большие масса и момент инерции, которые сохраняют броуновский шум маленьким.

В работе [14] представлен более сложный вариант микрогироскопа колебательного типа. На рис. 8 и 9 (см. третью сторону обложки) представлены микрофотографии этого гироскопа.

Резонирующая структура реализована при помощи технологии микромеханики с толстым поликремневым слоем. Микрогироскоп основан на угловой вибрации четырех плоскостей. Управляемое гребенкой вращательное тело наклоняется к каждой входной оси, параллельной подложке, и наклонное движение определяется по изменению емкости между нижним электродом и структурой. Резонансные частоты согласованы с помощью источника постоянного напряжения. Для максимизации силы Кориолиса используется масса толщиной 7 мкм и зазор 2 мкм гребенки. Размер структуры составил $0,9 \times 0,9$ мм². Сила Кориолиса пропорциональна массе колеблющегося элемента, скорости колебаний и угловой скорости. Угол наклона, который пропорционален скорости, модулируется скоростью. Чтобы получить угловую скорость, выходной сигнал демодулируется. Для высокой чувствительности вибрационный гироскоп должен функционировать в сильном вакууме, поскольку Q-фактор (добротность) при нормальном атмосферном давлении очень низок.

Двухнаклонный режим дает возможность датчику определять угловую скорость по двум осям одновременно. В частности, структура использует простой балансирующий торсионный преобразователь для уменьшения собственной нелинейности

сенсора емкостного типа. Из эксперимента получено эквивалентное поле шума $0,1^\circ/\text{с}$.

Подобный микрогироскоп рассмотрен и в патенте [15].

Из приведенного обзора ясно, что микрогироскопы — достаточно сложные устройства. Они могут быть изготовлены как по технологии объемной микромеханики с глубоким травлением кремния, так и по технологии поверхностной микромеханики, где в качестве структурообразующего слоя выступает поликристаллический кремний. В зависимости от требуемых параметров и технологических возможностей в качестве исходного варианта берется тот или иной тип микрогироскопа. При этом процесс разработки такого устройства должен включать оптимизацию конструкции (линейных размеров и толщин слоев) и технологии изготовления (оптимизация температурных режимов для минимизации механических напряжений) экспериментальными методами и методами математического моделирования с целью получения максимальной чувствительности устройства к угловому вращению и максимальной стабильности функционирования устройства.

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—6.
2. Peterson K. E. // Proc. IEEE. 1982. № 70. P. 420—457.
3. NEXUS. Market analysis for microsystems, 1996—2002 // MST News. 1998, № 3. P. 38—41.
4. Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 41—46.
5. Погалов А. И., Тимошенко В. П., Тимошенко С. П., Чаплыгин Ю. А. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 36—41.
6. Ачильдиев В. М., Дрофа В. Н., Рублев В. М. Микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр // Микросистемная техника. 2001. № 5. С. 8—10.
7. Mochida Y., Tamura M., Ohwada K. A micromachined vibrating rate gyroscope with independent beams for the drive and detection modes // Sensors and Actuators. 2000. 80. P. 170—178.
8. US Patent № 5,747,690. Vibratory microgyroscope, 1998.
9. US Patent № 5,753,817. Microgyroscope with vibratory structure having a multitude of grooves, 1998.
10. US Patent № 5,992,233. Micromachined Z-axis vibratory rate gyroscope, 1999.
11. US Patent № 6,250,156. Dual-mass micromachined vibratory rate gyroscope, 2001.
12. Geiger W., Merz J., Fischer T., Folkmer B., Sandmaier H., Lang W. The silicon angular rate sensor system DAVED // Sensors and Actuators. 2000. 84. P. 280—284.
13. Geiger W., Merz J., Folkmer B., Lang W., Sandmaier H. A new silicon rate gyroscope // Sensors and Actuators. 1999. 73. P. 45—51.
14. An S., Oh Y. S., Park K. Y., Lee S. S., Song C. M. Dual-axis microgyroscope with closed loop detection // Sensors and Actuators. 1999. 73. P. 1—6.
15. US Patent № 6,067,858. Micromachined vibratory rate gyroscope, 2000.

УДК 621.3

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
Секция прикладных проблем
при Президиуме РАН
microsystems@caravan.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ В РОССИИ

Рассматриваются перспективы создания новых элементов микросистемной техники, отнесенной к критическим технологиям Федерального уровня на 2001—2010 гг.

Минобразования России провело дополнительный конкурс в 2002 г. на размещение заказа на выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по подпрограмме "Электроника" научно-технической программы "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники".

Дополнительный конкурс проводится по следующим тематическим направлениям раздела "Микро- и наносистемная техника" подпрограммы "Электроника" (E-mail: cmid@eltech.ru):

- фундаментальные основы микро- и наносистемной техники;
- специальные технологии микросистемной техники;
- процессы нанотехнологии;
- методы нанодиагностики;
- компоненты микро- и наносистемной техники;
- микро- и наномшины.

Минобразования России в марте 2000 г. утвердило "Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования. Направление подготовки дипломированного специалиста 654100 Электроника и микроэлектроника", в который включена подготовка инженеров по новой специальности — 201900 "Микросистемная техника" [15].

В 2001 г. Российский фонд технологического развития (РФТР) Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации провел конкурс на тему "Разработка приборов нового поколения на базе микроэлектромеханических систем" (E-mail: gubarev@minstp.ru).

Конкурс проводился по следующим направлениям:

- Микромшины — источники энергии и движения, силовые приводы и механизмы.
- Микробиохимические системы — микродозаторы, микронасосы, микроклапаны, микрореакторы и микроферментаторы.
- Микротелекоммуникационные системы — управляемые микроэлектромеханические ра-

диокомпоненты, адаптивная микроэлектромеханическая "скамья".

- Аналитические микросистемы.
Разрабатываемые приборы предназначены для использования в медицине и биохимии, телекоммуникациях, промышленной автоматике, аэрокосмической промышленности, автомобильном транспорте, мониторинге окружающей среды.

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

- Микроэлектронные технологии.
- Технологии телекоммуникаций.
- Технологии вычислительных систем.
- Радиоэлектронные, микроволновые и акустоэлектронные технологии.

В перечень конкурсных проектов по разделу "Микроэлектронные технологии" (в части микросистемной техники и нанoeлектроники) вошли следующие проекты:

- Разработка технологии производства микромеханических элементов для микросистемной техники по кремниевой технологии.
- Разработка базовой технологии производства микромеханических элементов для микросистемной техники по стекловолоконной технологии.
- Разработка приборно-технологического базиса производства интеллектуальных нанотехнологических комплексов для создания наноэлементов и терабитных микромеханических запоминающих устройств.
- Разработка приборно-технологического базиса зондовых и ионных нанотехнологий формирования элементов с размерами менее 10 нм.
- Разработка приборно-технологического базиса формирования нанотехнологических элементов на основе нанотрубных углеродных структур.

В России термин "микросистемная техника" стал использоваться в официальных документах после принятия в 1996 г. перечня критических технологий Федерального уровня. В приоритетные направления развития науки и техники на 2001—2010 гг. (раздел производственных технологий) в состав критических технологий Федерального уровня включена микросистемная техника.

В России проблемы микросистемной техники освещает созданный в 1999 г. ежемесячный междисциплинарный научно-технический и научно-производственный журнал "Микросистемная техника", выпускаемый при содействии Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации, Минобразования России и Российской академии наук. Задачей журнала является освещение современного состояния и перспектив развития микросистемной техники (МСТ); рас-

смотрение вопросов разработки и внедрения микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Аннотации статей на русском и английском языках помещены в каждом номере журнала, кроме того, с аннотациями можно ознакомиться на сайте журнала в Интернете (<http://www.microsystems.ru>). Сайт поддерживает и стимулирует создание устойчивого сообщества российских разработчиков и потребителей в области МСТ вокруг журнала "Микросистемная техника".

В ноябре 2001 г. издательством "Новые технологии" совместно с Институтом проблемных исследований Российской академии естественных наук выпущено электронное издание архива журналов "Микросистемная техника" за 1999—2000 гг. на CD-R компакт-диске. На диске размещены также электронные цветные версии печатных статей в формате PDF, а также полная издательская версия. Электронный архив журналов снабжен единым интерфейсом по разделам и статьям, позволяющим легко осуществлять поиск по номерам и разделам журнала.

В настоящее время российскими специалистами получены интересные результаты в области МСТ. В табл. 1 и 2 приведены основные изделия МСТ, разрабатываемые на предприятиях России и определяющие развитие российской микросистемной техники.

По мнению экспертов, развитие микросистемной техники для научно-технического прогресса может иметь такие же последствия, какие оказало появление микроэлектроники на становление

и современное состояние ведущих областей науки и техники.

Для оценки состояния и перспектив развития микроэлектромеханических систем можно ввести коэффициент качества, позволяющий оценить уровни интеграции МЭМС и представленный в виде произведения TM , в котором T — число транзисторов, M — число механических компонентов [2]. Проиллюстрируем возможности микросистемной техники. Например, для серийно выпускаемого акселерометра, изготавливаемого по технологии с топологическими нормами 2—10 мкм (содержащего 100—200 транзисторов и 1 механический элемент) получим $TM = 10^2$, а для динамического управления поверхностью экрана дисплея (содержащего 1 млн. механических элементов экрана и 1 млн. управляющих транзисторов) получим $TM = 10^{12}$. Большое число электронных и механических компонентов открывает новую эпоху в создании микросистемной техники при существующем уровне технологии в микроэлектронике (1—10 мкм).

Основой развития микроэлектромеханических систем является микроэлектронная технология, которая применяется практически во всех изделиях на основе кремния [4, 7, 19].

В России также осваивается LIGA-технология [10]. Физико-технологические вопросы, требующие понимания и разрешения, примеры изделий и области применения процесса разрабатываются специалистами Курчатовского источника синхротронного излучения (КИСИ).

Кроме того, в России (г. Саратов) предложен и реализован новый метод создания трехмерных

Таблица 1

Назначение микросистем для техники нового поколения

Класс изделий МСТ	Назначение	
	Общегражданское	Специальное
Сенсорные микросистемы	Миниатюрные системы ориентации, навигации и управления	
	Автомобильный и ж/д транспорт	Аэрокосмические и ракетно-артиллерийские системы
	Мультисенсоры, интеллектуальные сенсоры, сенсоры с обратной связью, акселерометры, миниатюрные автономные системы навигации (совмещенные с космическими GPS системами), модули контроля положения антенных фазированных решеток, системы катапультирования и индивидуального наведения	
Микроэлектромеханические системы и машины, микросистемы энергообеспечения	Миниатюрная управляемая элементная база	
	Микромеханизмы; миниатюрные управляемые конденсаторы, резисторы, зеркала, модуляторы; элементы микропривода, микрооптика, микродвигатели, микрогенераторы, автономные миниатюрные источники энергии, микротурбины, микросистемы рекуперации энергии	
Аналитико-технологические микросистемы	Миниатюрные аналитико-диагностические чипы и микрохимические реакторы	
	Биотехнология, медицина, нефтехимия, пищевая промышленность, микробиология, наноэлектроника	Химическая защита, обнаружение, исследование и утилизация особо опасных веществ, медицина
	Миниатюрные автономные системы для диагностики организма и замещения органов, миниатюрные аналитические приборы, микрореакторы, микро- и наноинструмент, микрорегуляторы, микронасосы	
Миниатюрные робототехнические системы	Миниатюрные автономные управляемые самодвижущиеся системы	
	Микророботы для диагностики: медицина, ядерная энергетика, химическая промышленность	Микророботы для разведки и боевых действий на земле, воде, воздухе и космосе

Ведущие российские предприятия по направлению "Микросистемная техника"

Класс изделий МСТ	Головные российские предприятия-разработчики
Сенсорные микросистемы	Научно-производственный комплекс "Технологический центр" МИЭТ, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (СПбГЭТУ), Таганрогский государственный радиотехнический университет (ТГРТУ), Раменское приборостроительное конструкторское бюро (РПКБ), Физико-технологический институт РАН
Микроэлектромеханические системы и машины, микросистемы энергообеспечения	Центр микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПбГУАКП), Институт автоматики и электрометрии СО РАН (ИАЭ СО РАН), Институт физики микроструктур РАН, Государственный научно-исследовательский институт физических проблем им. Лукина, Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и "Микрон", Центральный научно-исследовательский институт робототехники и кибернетики
Аналитико-технологические микросистемы	Институт аналитического приборостроения РАН, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Центр микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Государственный научно-исследовательский институт биологического приборостроения, Российский научный центр "Курчатовский институт", Курчатовский источник синхротронного излучения (КИСИ)
Миниатюрные робототехнические системы	Институт проблем механики РАН, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики, Центральный научно-исследовательский институт робототехники и кибернетики
Моделирование	Московский государственный институт электронной техники (МИЭТ), Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Институт математики СО РАН, Институт математического моделирования РАН

микроэлектромеханических систем [1]. Основой этого метода являются технологии получения и обработки стекловолокна и стекловолоконных систем. Продемонстрирована возможность получения недорогих микронных и субмикронных стеклянных структур с практически неограниченным аспектным отношением. Получены как чисто стеклянные, так и стеклянно-металлические субмикронные системы. Рассмотрены наиболее перспективные направления в использовании предложенной технологии, в частности, для микророботов и микроприводов.

Направления разработок микроэлектромеханических систем объединены, прежде всего, применяемыми материалами, среди которых основными являются:

- кремний (во всех институтах России);
- карбид кремния (г. Санкт-Петербург) [12];
- сегнетоэлектрические пленки (г. Новосибирск, г. Ростов-на-Дону, г. Санкт-Петербург) [5, 14].

Последние достижения получены в работах Института автоматики и электрометрии СО РАН по созданию высокоэнергоемких микродвигателей на основе тонких сегнетоэлектрических пленок. Рассмотрен принцип работы шаговых лепестковых микродвигателей, основанный на эффекте электростатического наката металлических пленок на поверхность сегнетоэлектрика [5]. Такие микродвигатели, изготавливаемые с помощью микро-

электронной технологии, отличаются исключительно высокой энергоемкостью (свыше 0,3 Дж/м² при напряжениях 10–50 В) и прецизионностью перемещения (шаг от 1 нм до 100 мкм).

В СПбГЭТУ разработаны не только карбидокремниевые сенсоры, имеющие мировую известность, но и рассмотрены приборы на основе карбида кремния, которые благодаря термической устойчивости последнего и его термомеханической совместимости с рядом материалов, обладающих диэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами, способны работать в экстремальных условиях, а по своим параметрам относятся к микросистемной технике. Это инфракрасные излучатели, термоанемометрические датчики, термомикрореакторы, различные термонагревательные элементы [12].

Кроме того, рассмотрены принципы построения и основные технические характеристики микроакселерометра на поверхностных акустических волнах с частотной формой выходного сигнала. Приведены кинематическая схема акселерометра дифференциального типа, различные варианты топологии кристалла, возможные способы изготовления [14].

В МИЭТ традиционная микроэлектронная технология используется для создания различных сенсоров и разрабатываются технологии поверхностной микромеханики, многокристальных модулей, специализированных аналого-цифровых интегральных схем преобразования сигналов senso-

ров [22]. Кроме того, в этом институте разработан интегральный микрогироскоп колебательного типа на основе многослойных структур кремния и стекла. Предложена конструкция, реализуемая на основе многослойных структур, позволяющая методами интегральной технологии создать устройство, обладающее высокими точностными характеристиками [19]. Составлена и проанализирована эквивалентная схема паразитных элементов микрогироскопа. Представлены методики определения модуля упругости и параметров напряженно-деформированного состояния многослойных структур, предложен способ определения рационального соотношения между параметрами слоев.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана разрабатывают навигационные приборы, изготовленные на базе монокристаллического кремния (в частности, конструкции маятниковых узлов семи акселерометров), измерительные узлы датчиков угловой скорости, а также технологические процессы изготовления измерительных узлов навигационных приборов из монокристаллического кремния. Исследована возможность использования компенсационного акселерометра с кремниевым маятником в качестве геофонического сенсора [11]. Конструируется микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр, выполненный в виде маятника с емкостным датчиком угла и электростатическим датчиком момента. Показывается, что выходной сигнал прибора будет содержать составляющие, пропорциональные входной угловой скорости и линейному ускорению.

В Раменском приборостроительном конструкторском бюро (РПКБ) разработан кремниевый компенсационный акселерометр и разомкнутый акселерометр с частотным выходом, а также испытаны макетные образцы электростатического акселерометра и мультисенсорного датчика [18].

В СПбГУАКП исследуются особенности и различия технологии микроэлектромеханических и микроэлектронных систем. Выявлены недостаточность средств микроэлектроники для решения проблем микроэлектромеханических систем и необходимость создания новых базовых технологий на примере технологии изготовления вибрационного микромеханического гироскопа [4].

В ТГРТУ проводятся работы в области построения микроэлектронных сенсорных систем для решения ряда конкретных задач в системах посадки гидросамолетов [8].

В ряде институтов России проводится моделирование МСТ и предлагаются методики расчета механических напряжений и температурных полей, а также тепловых режимов микроэлектромеханических систем.

В настоящее время увеличилось число российских научных коллективов, занимающихся наномеханикой — наноинструментами и нанотрубками [3, 16], фотонными кристаллами [20].

Обобщая современное состояние в области стимулов и факторов, способствующих развитию микро-системной техники в России, выделим важнейшие:

- наличие научной и технологической культуры, сформировавшейся в период становления и развития микро- и оптоэлектроники [8, 18, 20, 22];
- наличие базового оборудования, производственных мощностей и организационной инфраструктуры микроэлектронного производства, пригодных для реализации на них объектов микро-системной техники;
- повышение активности рынка сенсорных систем различного функционального назначения и конструктивного исполнения;
- расширение рынка оптических коммутаторов для оптоволоконных линий связи;
- создание микромеханических фильтров радиочастот с более высокой добротностью по сравнению с электрическими схемами;
- тенденции к интеграции процессов микро- и биотехнологии [6];
- тенденции к активизации рынка в области миниатюрных недорогих диагностических систем обеспечения жизнедеятельности человека на основе концепции экономической целесообразности массовой профилактики заболеваний;
- формирование рынка оборудования для технологий на микроуровне (аналогичных микроэлектронным) за счет широкого развития биотехнологии и ужесточения требований к работе с радиоактивными, токсичными, взрывоопасными веществами, что определяет переход на использование сверхмалых количеств веществ в ограниченных объемах.

Список литературы

1. Белоглазов В. И., Суховеев С. П., Суетин Н. В. Создание микронных и субмикронных трехмерных структур с использованием стекловолночных технологий // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 4—9.
2. Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 41—46.
3. Быков В. А. Микро-механика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 21—33.
4. Джашитов В. Э., Паикратов В. М., Лестев А. М., Попова И. В. Расчет температурных и технологических погрешностей микро-механических гироскопов // Микросистемная техника. 2001. № 3. С. 2—10.
5. Дятлов В. Л., Косцов Э. Г. Высокоэнергетические микро-двигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 22—31.
6. Зимица Т. М., Лучинин В. В., Крапивина Е. В., Ресин А. С. Микросистемная техника и проблемы биомедицинского анализа // Микросистемная техника. 2000. № 3. С. 18—30.
7. Иващенко Е. И., Цветков Ю. Б. Метод размерного stop-равления кремния в производстве изделий микро-механики // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 16—20.
8. Каляев И. А., Котов В. Н., Клидухов В. Г., Кухаренко А. П. Микроэлектронные сенсорные системы: опыт создания и применения // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 32—35.
9. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микро-системной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.

10. Колясников В. А., Рахимбабаев Т. Я. Синхротронное излучение в микротехнологии // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 9—13.
11. Коновалов С. Ф., Лагтева Т. Н., Медведева И. И. и др. Опыт разработки навигационных приборов на базе монокристалла кремния // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 19—25.
12. Корляков А. В., Лучинин В. В., Никитин В. В. Применение SiC-микронагревательных систем в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 27—31.
13. Кригер Ю. Г., Игуменов И. К. Физические принципы молекулярной электроники // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 45—47.
14. Лукьянов Д. П., Лучинин В. В., Скворцова В. Ю. Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах // Микросистемная техника. 2001. № 2. С. 3—7.
15. Лучинин В. В., Таиров Ю. М. К вопросу об организации подготовки инженерных кадров по специальности "Микросистемная техника" // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 3—6.
16. Минаев В. В., Неволлин В. К., Петрик В. И. Нанотрубки из углеродной смеси высокой реакционной способности // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 41—42.

17. Мальцев П. П., Пономарев К. М., Степанов Ю. И. "Умная пыль" на основе микросистемной техники // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 40—45.
18. Паршин В. А., Петрашко В. В., Соломатин А. К., Соловьев В. М., Харитонов В. И. Некоторые вопросы технологии изготовления кремниевых акселерометров // Микросистемная техника. 2001. № 5. С. 3—5.
19. Погалов А. И., Тимошенко В. П., Тимошенко С. П., Чаплыгин Ю. А. Разработка микрогирометров на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 36—41.
20. Старков В. В., Аристов В. В., Желтиков А. М., Магницкий С. А., Тарасишин А. В. Создание фотонных кристаллов методами глубокого анодного травления кремния // Микросистемная техника. 2001. № 9. С. 37—41.
21. Цыганов С. А., Тихонов И. П. Семинары РФФИ — старт инновационного процесса // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 34—35.
22. Шелепин Н. А. Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных приборов // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 41—43.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.865.8

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф.,
М. М. Князьков, Л. Н. Кравчук, В. Н. Соловцов,
Институт проблем механики РАН, г. Москва

МИКРОСЕНСОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МИНИАТЮРНЫХ РОБОТОВ ВНУТРИ ТРУБ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ*

Приведены результаты исследований управляемых движений миниатюрных роботов, перемещающихся внутри труб малых диаметров. Управление формируется на основе информации, получаемой от микросенсорных устройств, установленных на борту роботов. Экспериментальные исследования выполнялись с различными приводными системами и движителями миниатюрных роботов — на колесной платформе, с электромагнитным "пушпульным" движителем и с приводной системой, состоящей из двух миниатюрных электродвигателей, соединенных с корпусом робота посредством упругих нитей. Микродатчики предназначались для измерения скорости, силы (давления), температуры и расстояния. Микротелекамеры использовались для получения диагностической информации о состоянии внутренней поверхности труб.

Введение

Рассматриваемые роботы с диагностическими микродатчиками на борту предназначены для движения внутри труб малых диаметров в диапазоне от нескольких миллиметров до десятков сантиметров с целью выполнения технической диагностики ма-

шин и агрегатов нефтехимической и газовой промышленности, энергетических объектов, проведения регламентных и ремонтных работ трубопроводов малых диаметров, а также применения в технологических процессах высокоточной обработки изделий для энергетических систем [1].

Предлагаемые к использованию микродатчики могут входить в состав систем управления роботами для обеспечения высокоточных движений. Бортовые микротелекамеры необходимы для получения визуальной информации о состоянии внутренних поверхностей труб [2]. Эта информация затем подвергается микропроцессорной обработке. В качестве диагностических устройств могут применяться микродатчики, построенные на иных принципах, например, ультразвуковые — для выявления внутренних трещин, электромагнитные и другие, реализующие методы неразрушающего контроля [3].

Реализация микропроцессорного управления движением миниатюрных роботов внутри труб малых диаметров представляет собой сложную научно-техническую задачу в связи с малыми размерами изделий и ограниченным пространством, в котором происходит движение, необходимостью повышения автономности управления и учета особенностей миниатюризации конструкции и специфики принципа действия механической системы робота [4].

В данной работе приводятся результаты исследования управляемых движений миниатюрных роботов внутри труб малых диаметров на основе полученной информации о параметрах движения робота, о состоянии поверхности, вдоль которой выполняется движение и диагностической информации.

Экспериментальные исследования проводились на изготовленных образцах миниатюрных роботов с различными механическими системами.

*Исследования выполнялись при поддержке РФФИ, грант № 02-01-00205.

10. Колясников В. А., Рахимбабаев Т. Я. Синхротронное излучение в микротехнологии // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 9—13.
11. Коновалов С. Ф., Лагтева Т. Н., Медведева И. И. и др. Опыт разработки навигационных приборов на базе монокристалла кремния // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 19—25.
12. Корляков А. В., Лучинин В. В., Никитин В. В. Применение SiC-микронагревательных систем в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 27—31.
13. Кригер Ю. Г., Игуменов И. К. Физические принципы молекулярной электроники // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 45—47.
14. Лукьянов Д. П., Лучинин В. В., Скворцова В. Ю. Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах // Микросистемная техника. 2001. № 2. С. 3—7.
15. Лучинин В. В., Таиров Ю. М. К вопросу об организации подготовки инженерных кадров по специальности "Микросистемная техника" // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 3—6.
16. Минаев В. В., Неволлин В. К., Петрик В. И. Нанотрубки из углеродной смеси высокой реакционной способности // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 41—42.

17. Мальцев П. П., Пономарев К. М., Степанов Ю. И. "Умная пыль" на основе микросистемной техники // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 40—45.
18. Паршин В. А., Петрашко В. В., Соломатин А. К., Соловьев В. М., Харитонов В. И. Некоторые вопросы технологии изготовления кремниевых акселерометров // Микросистемная техника. 2001. № 5. С. 3—5.
19. Погалов А. И., Тимошенко В. П., Тимошенко С. П., Чаплыгин Ю. А. Разработка микрогирометров на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 36—41.
20. Старков В. В., Аристов В. В., Желтиков А. М., Магницкий С. А., Тарасишин А. В. Создание фотонных кристаллов методами глубокого анодного травления кремния // Микросистемная техника. 2001. № 9. С. 37—41.
21. Цыганов С. А., Тихонов И. П. Семинары РФФИ — старт инновационного процесса // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 34—35.
22. Шелепин Н. А. Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных приборов // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 41—43.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.865.8

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф.,
М. М. Князьков, Л. Н. Кравчук, В. Н. Соловцов,
Институт проблем механики РАН, г. Москва

МИКРОСЕНСОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МИНИАТЮРНЫХ РОБОТОВ ВНУТРИ ТРУБ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ*

Приведены результаты исследований управляемых движений миниатюрных роботов, перемещающихся внутри труб малых диаметров. Управление формируется на основе информации, получаемой от микросенсорных устройств, установленных на борту роботов. Экспериментальные исследования выполнялись с различными приводными системами и движителями миниатюрных роботов — на колесной платформе, с электромагнитным "пушпульным" движителем и с приводной системой, состоящей из двух миниатюрных электродвигателей, соединенных с корпусом робота посредством упругих нитей. Микродатчики предназначались для измерения скорости, силы (давления), температуры и расстояния. Микротелекамеры использовались для получения диагностической информации о состоянии внутренней поверхности труб.

Введение

Рассматриваемые роботы с диагностическими микродатчиками на борту предназначены для движения внутри труб малых диаметров в диапазоне от нескольких миллиметров до десятков сантиметров с целью выполнения технической диагностики ма-

шин и агрегатов нефтехимической и газовой промышленности, энергетических объектов, проведения регламентных и ремонтных работ трубопроводов малых диаметров, а также применения в технологических процессах высокоточной обработки изделий для энергетических систем [1].

Предлагаемые к использованию микродатчики могут входить в состав систем управления роботами для обеспечения высокоточных движений. Бортовые микротелекамеры необходимы для получения визуальной информации о состоянии внутренних поверхностей труб [2]. Эта информация затем подвергается микропроцессорной обработке. В качестве диагностических устройств могут применяться микродатчики, построенные на иных принципах, например, ультразвуковые — для выявления внутренних трещин, электромагнитные и другие, реализующие методы неразрушающего контроля [3].

Реализация микропроцессорного управления движением миниатюрных роботов внутри труб малых диаметров представляет собой сложную научно-техническую задачу в связи с малыми размерами изделий и ограниченным пространством, в котором происходит движение, необходимостью повышения автономности управления и учета особенностей миниатюризации конструкции и специфики принципа действия механической системы робота [4].

В данной работе приводятся результаты исследования управляемых движений миниатюрных роботов внутри труб малых диаметров на основе полученной информации о параметрах движения робота, о состоянии поверхности, вдоль которой выполняется движение и диагностической информации.

Экспериментальные исследования проводились на изготовленных образцах миниатюрных роботов с различными механическими системами.

*Исследования выполнялись при поддержке РФФИ, грант № 02-01-00205.

1. Некоторые перспективные направления развития миниатюрных роботов с бортовыми микродатчиками

Для передвижения микророботов применяют различные двигатели — пьезоэлектрические, электромеханические, электромагнитные и др. В этих роботах микродатчики предназначены для получения информации о параметрах движения роботов, а также о таких параметрах внешней среды, как давление, температура; визуальной информации, информации о внутреннем состоянии исследуемых объектов.

Пьезодвигатель состоит из тонких керамических пластин, которые изгибаются, когда к ним подается электрическое напряжение, и возвращаются к первоначальной форме, если напряжение снято. Подобная технология применяется, например, для создания вибрации в пейджере. Исследования показывают, что пьезоэлектрический способ передвижения имеет преимущество по сравнению с передвижением по обычной технологии. Пьезоэлектрические двигатели способны к превращению свыше 90 % электрической энергии в механическую, а электрический двигатель имеет коэффициент полезного действия приблизительно 60 %.

Микроробот оборудован системами управления и восприятия окружающей обстановки. "Мозгом" робота является специально созданная микросхема, которая управляет подачей напряжения на пьезокристаллы. На теле робота установлены различного вида датчики. В качестве источника энергии используется батарейка от наручных часов, энергии которой достаточно для прохождения микророботом нескольких сот метров, что подтверждается разработками ученых из университета Вандербильт, город Нешвил, штат Теннесси (см. рис. 1, на четвертой стороне обложки). Созданный ими маленький насекомоподобный робот размером 2—3 см найдет применение для военных и разведывательных целей, так как может передвигаться в трубах и вентиляционных шахтах [5].

Созданные группой шведских ученых из Линкопингского университета микророботы размером $670 \times 170 \times 240$ мкм в отличие от большинства аналогичных устройств могут работать в токопроводящих жидкостях (крови, урине и т. д.) благодаря покрытию полупроводниковой начинки слоем особого полимера — полипиррола (poly pyrrole). "Классические" кремниевые микророботы при работе в жидкостях быстро выходят из строя.

Детали, выполненные из полипиррола, способны сокращаться подобно мускулам при прохождении через них электрического тока. Это свойство использовано в единственном манипуляторе робота, который, действуя наподобие человеческой руки микроскопических размеров, может работать даже с отдельными клетками. Кроме того, устройство можно оборудовать сенсорным блоком, превратив его в микролабораторию, способную путе-

ществовать внутри живого организма или в трубах малого сечения [6].

Шведские ученые изготовили 140 опытных экземпляров и продемонстрировали их возможности по перемещению маленьких стеклянных бусин. Областью применения новых роботов исследователи видят прежде всего медицину, где роботы смогут сыграть роль хирургического инструмента для бескровных операций как крупных, в ходе которых группа роботов будет действовать сообща, так и локальных, на клеточном уровне.

Ученые лаборатории SNL — подразделения Минэнерго США, сконструировали несколько автономных роботов, объем которых не превышает 1 см^3 . Скорость перемещения робота — 0,5 м/мин, энергии батарей хватает на 15 мин движения [7].

Группы дистанционно управляемых микромашин смогут проникать внутрь зданий по вентиляционным шахтам и трубопроводам (рис. 2, см. на четвертой стороне обложки). Они станут выявлять взрывные устройства, заложенные в местах, труднодоступных для человека, а также вести разведку территории. Вычислительная мощность процессора такого робота аналогична мощности первых ПК (тактовая частота до 1 МГц и ПЗУ порядка 8 Кбайт). Пока действующая модель робота снабжена только датчиками температуры, в дальнейшем планируется оснастить ее микрофоном, радиопередатчиком, устройствами дистанционного управления и инфракрасными датчиками движения. Установить же видеокамеру и получать изображения в масштабе реального времени вследствие технической сложности пока не удастся, хотя отдельные кадры от микрофотокамеры принимать можно.

Первые модели роботов создавались на колесном ходу, но теперь используются гусеницы. Это позволяет роботам более устойчиво передвигаться по неровной поверхности.

В настоящее время уже широко применяются датчики, разработанные на основе МЭМС (Micro-Electro-Mechanical System) и МОЭМС (Micro-Optical-Electro-Mechanical System) [3]. Нашли они применение и в микросенсорных системах управления движением микророботов внутри труб.

Среди наиболее важных особенностей миниатюрных систем, построенных с применением микродатчиков, отметим следующие: незначительные затраты материалов и малое потребление электрической энергии, высокая эксплуатационная эффективность, малая стоимость, высокая надежность, возможность решения интеллектуальных задач посредством распределенных микросистем.

К таким микродатчикам относятся датчики ускорения, скорости, пути, температуры, измерения и регулировки вращающего момента, давления.

Ниже приводятся характеристики типовых, наиболее часто применяемых датчиков, которые предназначены для оснащения миниатюрных роботов для движения внутри труб малых диаметров.

Датчик температуры. Микродатчики температуры реализуют в основном двумя типами преобразователей: термоэлектрическим и терморезисторным. Термоэлектрический метод преобразования требует наличия разности температур. Терморезисторы такого термостатирования не требуют. Они выполняются различными технологическими приемами на базе металлических и полупроводниковых материалов. При необходимости измерения небольших перепадов температуры полупроводниковые терморезисторы имеют лучшие метрологические характеристики, такие как, малое энергопотребление, микрогабариты, высокие динамические характеристики.

Некоторые датчики давления и температуры [3], кроме тензорезистивного моста, содержат два диффузионных терморезистора. Терморезисторы имеют габаритные размеры в плане 400×20 мкм, сопротивление $1600 \div 3200$ Ом.

Датчик температуры применяется в качестве чувствительного элемента микрорознда для измерений пульсаций температуры газодинамических потоков.

Прототип датчика состоит из чипа чувствительного элемента давления и температуры, подмембранная полость вакуумирована и закрыта крышкой из монокристаллического кремния.

Диапазон измеряемой температуры составляет $34 \div 42$ °С. Диапазон выходного сигнала равен 10 мВ при напряжении питания моста 3 В. Погрешность измерения не превышает $0,2$ °С.

Датчик Холла. Кроме основной функции — измерения напряженности магнитного поля, датчик Холла может быть применен для измерения вращающего момента в электродвигателях постоянного тока, используемых в роботах-трубоходах [19].

Регулирование вращающего момента обеспечивает рациональное использование аккумуляторных батарей, расположенных на борту робота, и жесткость механических характеристик электродвигателя. Кроме того, датчик Холла дает команду на остановку электродвигателя в случае превышения некоторого предполагаемого значения вращающего момента, т. е. при наличии значительных препятствий на пути робота.

Применение датчика Холла в качестве воспроизводящей головки в датчике скорости позволяет получить выходной сигнал, независимый от скорости передвижения ленты. Предъявляются значительно меньшие требования к экранированию датчика скорости.

Многоканальный ультразвуковой дефектоскоп. При движении робота происходит непрерывное обследование всей внутренней поверхности трубы с помощью нескольких датчиков ультразвуковой дефектоскопии, которые расположены по окружности внутреннего диаметра трубы [2].

При обнаружении одним из нескольких датчиков дефекта происходит остановка робота. Автоматически включается видеокамера и проводится те-

леинспекция дефектного участка трубы. Картина видеонаблюдения или передается на стационарный блок наблюдения или записывается в цифровом виде в оперативную память робота, после чего продолжается движение робота.

Место дефекта определяется по времени движения робота от момента запуска трубного робота до момента остановки. Для получения точной информации о месте дефекта необходимо, чтобы робот двигался всегда с постоянной скоростью, для чего на роботе устанавливается датчик скорости, который поддерживает заранее установленную скорость.

Датчик скорости. Эти датчики имеют несколько разновидностей [12], одна из них состоит из прозрачного диска с темными рисками, расположенными равномерно по радиусу, и оптоновой пары, с которой снимаются импульсы при вращении этого диска. Другой разновидностью датчика скорости является магнитная головка, которая скользит по магнитной ленте, с записанными на ней импульсами. Магнитная головка при вращении вала выдает n импульсов за определенный промежуток времени, т. е. происходит замер скорости вращения колес. Далее информация с магнитной головки пары поступает на счетчик, на котором заранее записан код скорости. Поступающие импульсы считывают этот код до значения номинальной разности, соответствующей заданной скорости. Если полученный код будет отличаться от номинального значения, происходит коррекция скорости и восстановление до номинального значения за счет изменения величины обратной связи, воздействующей на регулятор скорости.

По истечении времени, требуемого для выполнения этих работ, что контролируется таймером микропроцессора, дается команда на продолжение движения мини-робота.

С помощью микропроцессоров рассчитывается временной интервал для включения реверса движения робота при аварийной ситуации и посредством датчика скорости определяется путь, пройденный миниатюрным роботом-трубоходом.

2. Механические системы миниатюрных роботов для движения внутри труб

В качестве основной модели миниробототехнического комплекса была выбрана колесная платформа с четырьмя парами ведущих колес, движение на которые через понижающий обороты редуктор передавалось от электродвигателя постоянного тока. Для увеличения трения между колесами и поверхностью трубы, по которой предполагалось движение робота, на колеса были одеты резиновые обода. Для стабилизации положения робота и принятия им на всем протяжении движения по трубе вертикального положения для него была принята форма цилиндра, на поверхности которого под углом 120° были установлены дополнительные подпружиненные четыре колеса (два на каждой сторо-

не цилиндрической поверхности), которые скользили по стенкам трубы. Такая конструкция создавала большую устойчивость робота при движении внутри труб различного диаметра — от 10 до 50 мм. За счет изменения вылета подпружиненных колес данный миниробототехнический комплекс становился универсальным и мог быть легко перестроен на трубы различного диаметра. Еще лучшие результаты были получены при использовании не четырех, а шести подпружиненных колес: по два на каждой стороне, под углом 90° (рис. 3, см. четвертую сторону обложки).

Несмотря на хорошие результаты, полученные при движении данного миниробототехнического комплекса в трубах по горизонтальной поверхности, была разработана конструкция робота на колесной платформе, позволяющая передвигаться и по вертикальным стволам труб и представляющая собой колесную платформу с двумя независимыми колесами, движение на которые через понижающий обороты редуктор передавалось от электродвигателей постоянного тока. Колеса имели сферическую форму и являлись частью редуктора с большой площадью соприкосновения с внутренней поверхностью трубы, что позволяло иметь значительное сцепление колес робота с внутренней поверхностью трубы. Колеса были подпружинены и имели на внешней поверхности материал с высоким коэффициентом трения (резиновые прокладки), что позволяло роботу передвигаться по трубам с переменным внутренним сечением. Изменение внутренних размеров часто случается при длительной эксплуатации труб вследствие нароста передаваемых по ним реагентов или вследствие ремонта труб — наложения внутренних накладок и т. д. Такая конструкция позволяла роботу передвигаться по трубам как в горизонтальном, так и вертикальном направлении. Установленные на платформе робота два независимых электродвигателя позволяли осуществлять повороты на угол до 90° в горизонтальном направлении. Составленный из нескольких таких колесных платформ состав с гибкой связью между платформами и большой степенью свободы значительно увеличивал возможности по движению робота, а также давал возможность установки микродатчиков и микропроцессорных систем (рис. 4).

Кроме моделей робота-трубохода, перемещение которого внутри трубы осуществляется за счет вращения приводных колес (классическая схема), была предложена и изготовлена модель мини-робота, движение которого основано на поступательном перемещении вдоль трубы выдвижного поршня и подтягивания к нему механизма перемещения этого поршня. Если в одну сторону поршень и механизм его привода движутся довольно легко, то в другую за счет формы и коэффициента трения материала упоров движение практически отсутствует. Таким образом, робот может перемещаться в трубе

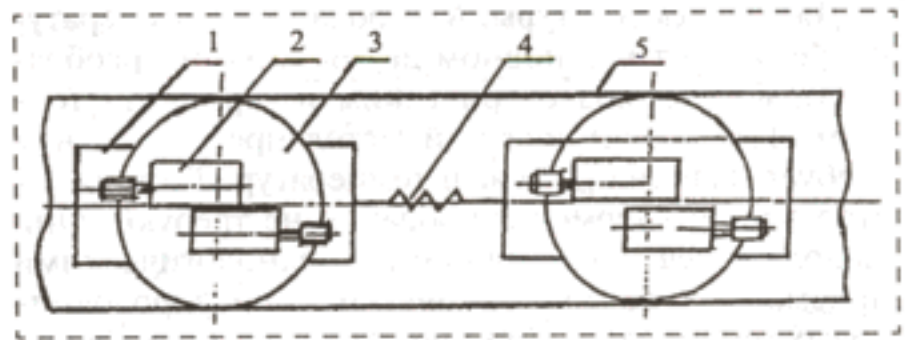


Рис. 4. Схема мобильного робота для движения в трубе: 1 — платформа; 2 — электродвигатель; 3 — колесо-редуктор; 4 — гибкая сцепка; 5 — труба

малого диаметра импульсами, частота которых может меняться в широких пределах. В отличие от робота с приводными колесами, поршневой робот не требует стабилизации положения, так как его упоры скользят по всему внутреннему периметру стенок трубы. В качестве механизма перемещения поршня использован электромагнит (рис. 5), который под действием импульсов напряжения, подаваемых на его обмотку, подтягивает якорь электромагнита, а заодно и поршень робота, а при отсутствии импульсов пружина, надетая на якорь электромагнита, старается вернуть его в исходное положение. Но так как якорь за счет материала упора поршня остается на месте, то продвигается вперед катушка электромагнита, установленная в корпусе робота, и происходит движение его вдоль трубы.

В качестве механизма перемещения поршня был использован также электродвигатель (рис. 6), вращающий винт, на который посажена маточная гайка. Перемещаясь, маточная гайка передает движение поршню. Электродвигатель, вращаясь в разные стороны, перемещает то поршень в поступа-

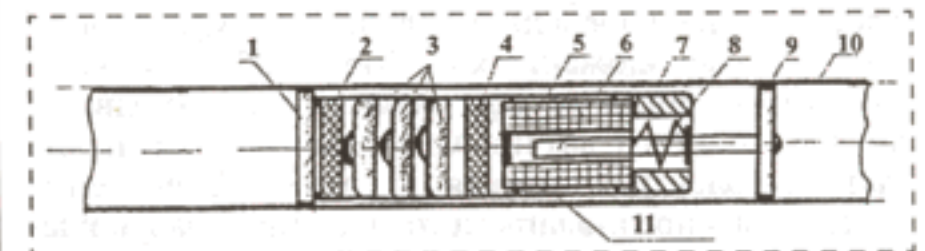


Рис. 5. Механизм перемещения транспортного модуля робота электромагнитом:

1 — фланец с элементом торможения от обратного хода; 2 — приемник инфракрасного излучения; 3 — аккумуляторы; 4 — схема управления; 5 — катушка электромагнита; 6 — сердечник электромагнита; 7 — упорное кольцо; 8 — пружина; 9 — поршень; 10 — труба; 11 — корпус робота

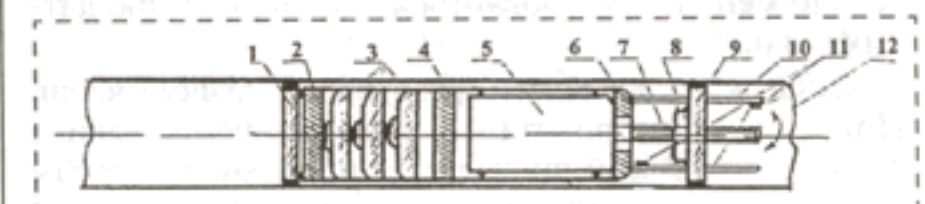


Рис. 6. Механизм перемещения транспортного модуля робота электродвигателем:

1 — фланец с элементом торможения от обратного хода; 2 — приемник инфракрасного излучения; 3 — аккумуляторы; 4 — схема управления; 5 — электродвигатель; 6 — корпус робота; 7 — винт; 8 — маточная гайка; 9 — поршень; 10 — направляющие; 11 — датчики ограничения движения поршня; 12 — труба

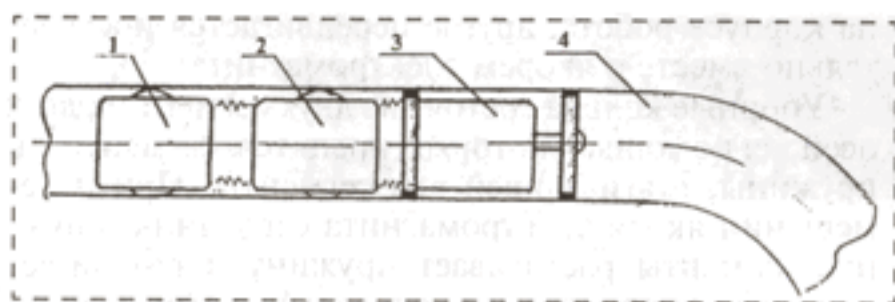


Рис. 7. Схема мобильного робота для движения в трубе: 1 — схема инфракрасного датчика и управления; 2 — аккумулятор; 3 — электромагнит; 4 — труба

тельном направлении, то механизм привода этого поршня. Происходит поступательное движение миниатюрного микробота. Размеры трубы, по которой может перемещаться робот, ограничены размерами электродвигателя и маточной гайки. Скорость перемещения данной конструкции зависит от частоты вращения электродвигателя, его механических характеристик, а также от значения импульсного напряжения разной полярности. На рис. 7 представлен автономный мобильный робот такого типа.

3. Способы реализации управляемых движений миниатюрных роботов в трубах

Для управления роботом-трубоходом была применена система автоматического управления (рис. 8), которая обладает способностью приспосабливаться к изменению окружающей среды, а также улучшать свою работу по мере накопления опыта.

Система автоматического управления (САУ) роботом-трубоходом имеет высокую точность и возможность реализации очень сложных алгоритмов управления, какие только доступны современным микропроцессорным системам.

В систему входит блок поддержания заданной скорости и вращающего момента силового механизма миниатюрного трубного робота при внеш-



Рис. 8. Структурная схема управления миниатюрным роботом-трубоходом

нем воздействии на этот робот сил инерции, тяжести и трения. Кроме того, САУ обеспечивает остановки и реверсивное движение миниатюрного робота-трубохода при превышении допустимых значений воздействия, которые могут привести к разрушению робота: температуры, вращающего момента.

Система также обеспечивает остановки миниатюрного робота-трубохода для проведения диагностических или ремонтных работ, при срабатывании датчика-дефектоскопа или датчика расстояния [15, 16].

Миниатюрные роботы, предназначенные для движения в трубах и выполнения ряда профилактических и ремонтных работ, по способу реализации движения могут быть активными или пассивными.

Активные роботы — это роботы, которые оснащены бортовыми механизмами для передвижения самого робота, а также рядом устройств для выполнения ремонтных и профилактических работ. Они потребляют электроэнергию, подводимую к роботу через проводную связь от источника питания, от аккумуляторов, установленных на борту, или в виде электромагнитных волн от внешнего источника (индуктора), который передвигается по наружным поверхностям исследуемых труб синхронно с роботом. В качестве индуктора служит трансформатор с первичной обмоткой, вторичная обмотка находится на борту робота. Снимаемое со вторичной обмотки напряжение выпрямляется, стабилизируется и подается на питание силовых механизмов робота и устройств диагностики.

Пассивные роботы на борту не имеют традиционных силовых механизмов (электромагнитов, электродвигателей), приводимых в действие при помощи источников постоянного тока. Такие роботы являются частью асинхронного электродвигателя, где индуктор, который передвигается по наружным стенкам трубы, является статором электродвигателя, а робот — ротором асинхронного двигателя, катящимся по внутренним стенкам трубы.

В зависимости от вида электромагнитных волн робот совершает поступательное или вращательное движение, он не имеет диагностической аппаратуры и предназначен только для выполнения ремонтных работ. Навесные механизмы на его борту выполняют различные механические работы, а приводом этих механизмов является сам робот.

Управляемые пассивные миниатюрные роботы, как правило, применяются для движения в трубах, выполненных не из ферромагнитного материала (стекло, пластмасса, пластик, металл — медь, алюминий и т. д.).

Пассивные роботы применяют для выполнения ремонтных работ в трубах, уложенных в коллекторах или в трубах открытой прокладки.

Принцип работы пассивного робота основан на взаимодействии электромагнитных волн от внешнего источника электромагнитных полей, который плавно передвигается по всей длине внешней по-

верхности исследуемой трубы и магнитного потока самого робота [17]. При подаче от внешнего источника электромагнитных полей вращающегося магнитного потока за счет взаимодействия этого поля с магнитными полями, созданными токами, протекающими через корпус пассивного робота, происходит перемещение по спирали пассивного робота по стенкам трубы. Корпус пассивного робота выполнен из ферромагнитного материала.

Управляемое движение активных миниатюрных роботов в трубах из ферромагнитного материала как и большинства роботов пушпульного типа основан на поступательном перемещении вдоль трубы якоря и подтягивания к нему корпуса робота. Во время выдвигания якоря или подтягивания катушки электромагнита совместно с корпусом за счет электромагнитов, расположенных на торце якоря и корпуса робота, происходит поочередное закрепление со сдвигом на 180° то корпуса, то якоря робота на стенках трубы, по которой движется робот. За счет фазового сдвига импульсов, подаваемых на катушки электромагнитов закрепления и катушки электромагнита передвигания робота, происходит изменение направления его движения.

Электромагниты для создания упоров во время движения робота вдоль трубы состоят из четырех явнополюсных наконечников, имеющих форму сегментов с радиусом, близким к диаметру исследуемой трубы, и четырех катушек с сердечниками, на которые крепятся сегменты полюсов. Во время подачи на катушки электромагнитов импульсов напряжения за счет создания электромагнитных полей происходит примагничивание наконечников электромагнитов к внутренним стенкам трубы и закрепление то одной, то другой части робота с целью создания упора для перемещения или якоря, или катушки электромагнита.

При движении в трубах, выполненных из неферромагнитного материала (пластика, цветных металлов, стекла, керамики и т. д.), где невозможно примагничивание полюсных наконечников к стенкам трубы, создание упора в нужные моменты времени происходит за счет прижатия тормозных колодок, поверхность которых покрыта материалом с большим коэффициентом трения (резина, кожа и т. д.), к поверхности трубы за счет пружин, прижимающих колодки к стенкам трубы. При подаче импульсов напряжения на катушку электромагнита происходит втягивание двух сердечников, расположенных в двух противоположных направлениях. Такая система позволяет роботу зависать в вертикальных стволах при отсутствии напряжения, в аварийных ситуациях.

Другой моделью робота-трубохода с реверсивным движением является образец миниатюрного робота, где фиксация корпуса или выдвигного якоря робота происходит за счет самого якоря электромагнита перемещения робота. Он имеет два упорных кольца. Одно находится неподвижно

на корпусе робота, другое передвигается поступательно вместе с якорем электромагнита.

Упорные кольца состоят из двух сегментов, двух осей, с помощью которых крепятся сегменты, и пружины, стягивающей эти сегменты. При перемещении якоря электромагнита сердечник в нужные моменты растягивает пружину и раздвигает сегменты с тормозными колодками, которые фиксируют корпус робота в трубе.

Растяжение и сжатие пружины, а следовательно, и сжатие, и растяжение тормозных колодок происходят за счет вырезов на свободном конце якоря. Растяжение и сжатие пружины и тормозных колодок на подвижном упорном кольце происходят за счет неподвижных усов, установленных на корпусе робота с противоположной стороны. Усы расположены под углом к оси якоря и при перемещении якоря эти усы раздвигают в нужный момент тормозные колодки.

Для того чтобы поменять направление движения робота, необходимо повернуть якорь электромагнита на 90° , тогда на тормозные колодки неподвижного упора будут действовать выступы, расположенные на некотором расстоянии от выступов для движения в другую сторону. Аналогично сжатие и растяжение колодок будет и на подвижном упоре. Происходит сдвиг фазы действия неподвижного и подвижного упоров, что обеспечивает реверсивное движение миниатюрного робота в трубах.

Для поворота якоря на 90° на электромагнит, состоящий из двух катушек, подаются два импульса со сдвигом 90° .

При движении миниатюрного робота катушки электромагнита включаются последовательно.

4. Результаты экспериментальных исследований

На примере управления миниатюрным роботом колесного типа были проведены исследования следующих динамических режимов:

- режима пуска;
- режима торможения;
- режима изменения частоты вращения.

Перечисленные режимы являются основными при движении миниатюрных роботов в трубопроводах, от них в большой степени зависит создание алгоритмов и системы управления движением.

Во всех этих динамических режимах основными параметрами являются частота (скорость) вращения n и сила тока I электродвигателя. Возможность определения этих параметров в данный момент времени является достаточным условием для проведения всех перечисленных динамических режимов [18]. Измерение частоты вращения проводилось с помощью датчика скорости, а силы тока — с помощью образцового сопротивления.

Режим пуска электродвигателя был исследован тремя возможными способами:

- прямым, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к автономному источнику питания;

- реостатным, при котором в цепь якоря включается пусковой реостат для ограничения тока;
- путем плавного повышения напряжения, которое подается на обмотку якоря.

Снятие пусковой характеристики $n = f(t)$ электродвигателя с целью определения времени его разбега и выхода на номинальный режим частоты вращения и зависимости силы тока $I = f(t)$, как и других динамических режимов, проводилось с помощью гальванического осциллографа Н-300 на осциллографическую бумагу и фотопленку.

Гальванический осциллограф Н-300 состоит из набора гальванометров, осветительной лампы и лентопротяжного механизма, скорость которого может меняться в широких пределах, что позволяет заснять на пленку быстротекущие процессы.

Принцип работы гальванического осциллографа основан на отклонении луча, отраженного от гальванометра при подаче на него измерительного сигнала, и проецировании его на пленку, установленную в лентопротяжном механизме. Чем больше подводимое к гальванометру напряжение, тем больше угол отклонения луча, а следовательно, и амплитуда сигнала, проецируемого на пленку. Сочетание отклоненного луча и движения пленки дает картину динамического процесса как пускового, так и ряда других режимов. Схема подключения гальванического осциллографа Н-300 к мини-роботу для движения в трубах приведена на рис. 9.

Графики изменения частоты вращения и силы тока электродвигателя приведены на рис. 10, 11. Как видно из графиков наиболее быстро происходит набор частоты вращения и снижение тока якоря при прямом пуске электродвигателя, но имеется большой всплеск тока в первый момент времени, что отрицательно сказывается на автономном источнике питания. При двух других способах пуска время разбега двигателя значительно увеличивается и спад силы тока происходит за больший период времени, хотя амплитуда тока значительно меньше.

При втором способе пуска происходит потеря мощности на пусковом резисторе, поэтому второй

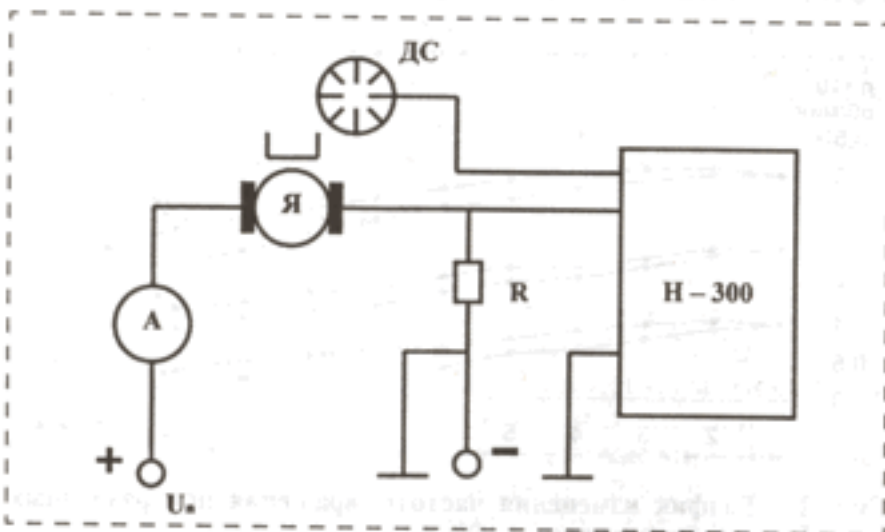


Рис. 9. Схема стенда для исследования динамических режимов электродвигателей роботов-трубоходов

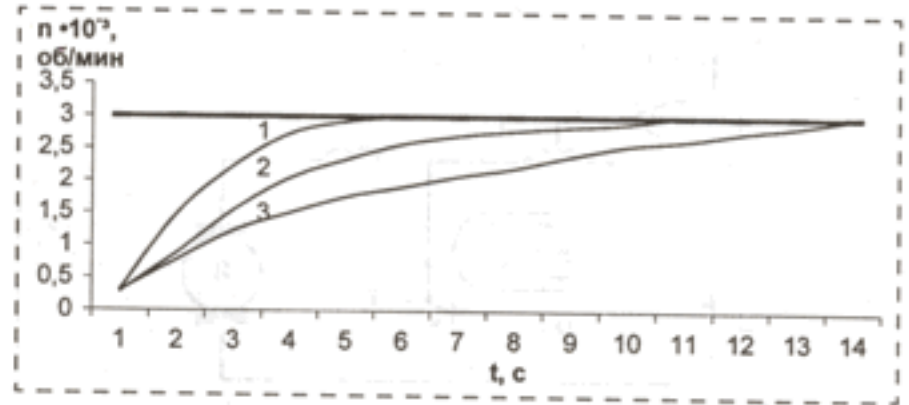


Рис. 10. График изменения частоты вращения двигателя при пуске: 1 — прямой пуск; 2 — реактивный пуск; 3 — пуск при повышении напряжения

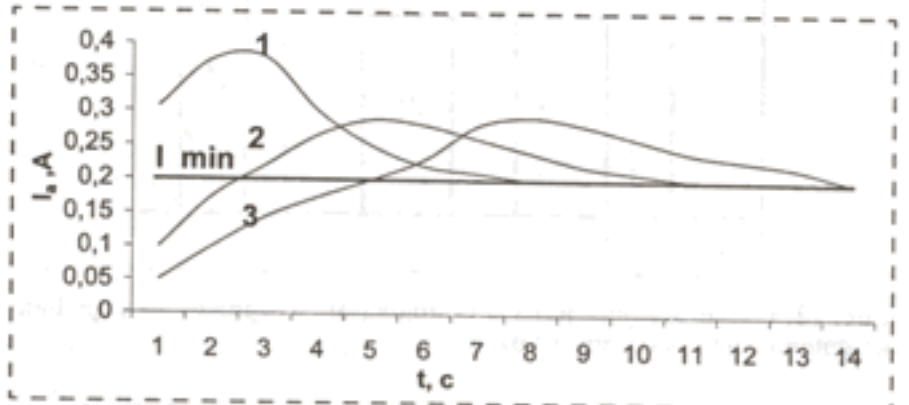


Рис. 11. График изменения силы тока при пуске двигателя

способ наименее экономичен. При использовании автономного источника питания наиболее приемлемым является способ пуска путем плавного повышения напряжения за счет импульсного управления. При этом на двигатель с помощью импульсного прерывателя (рис. 12) периодически подаются импульсы напряжения определенной частоты с переменным коэффициентом регулирования напряжения:

$$\alpha = \tau/T;$$

$$U_a = U_{cp} = U\tau/T,$$

где τ — время подачи напряжения; T — период следования импульсов.

Режим торможения был исследован тремя существующими способами:

- рекуперативное торможение — генераторное торможение с отдачей электрической энергии в источник питания;
- динамическое или реостатное торможение — генераторное торможение с гашением выработанной энергии в реостате, подключенном к обмотке якоря;
- электромагнитное торможение — торможение противовключением.

Рекуперативное и динамическое торможения проводились при работе двигателя от импульсного прерывателя.

Импульсное управление позволяет осуществлять рекуперативное торможение при значении ЭДС двигателя E , меньшего, чем напряжение источника питания, т. е. почти до полной остановки.

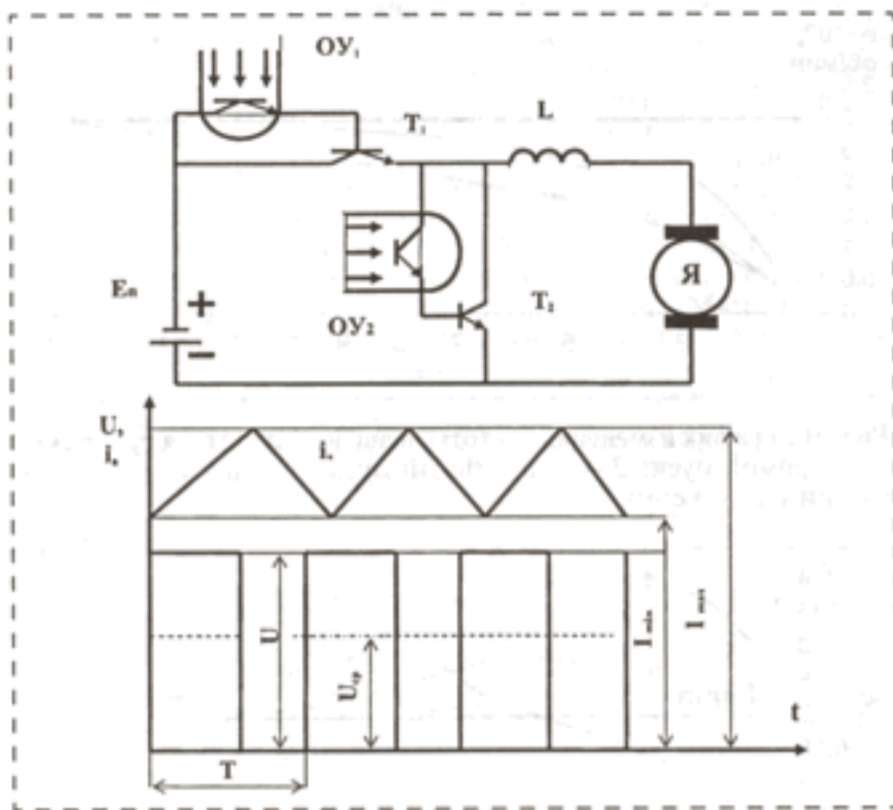


Рис. 12. Схема импульсного регулирования напряжения и график изменения напряжения и тока

В этом режиме импульсный прерыватель — транзистор T , включается параллельно якорю двигателя. Вследствие этого увеличивается ток I_a , происходит снижение частоты вращения. По мере снижения частоты вращения n и ЭДС E для поддержания требуемого значения $I_{a\text{ср}}$ увеличиваем частоту регулятора f при частотно-импульсном регулировании или длительность импульса τ при широтно-импульсном регулировании.

Динамическое торможение осуществляется аналогично, однако в схеме вместо источника питания включается реостат, в котором гасится энергия, отдаваемая электродвигателем.

На рис. 13, 14 представлены графики изменения тока и частоты вращения от начала торможения до полной остановки электродвигателя для всех способов торможения. Из них видно, что наиболее эффективным способом торможения является способ торможения противовключением, при этом возникают большие амплитуды токов якоря, которые негативно влияют на автономный источник питания, приводя его к быстрому разрушению. Рекуперативное и динамическое торможения немногим эффективнее естественного торможения за счет сил трения, хотя эти два метода требуют значительного потребления энергии.

Изменение частоты вращения двигателя постоянного тока согласно формуле

$$n = [U - I_a(R_a + R_g)] / c_e \Phi$$

возможно тремя способами:

- включением добавочного резистора R_g в цепь якоря;
- изменением магнитного потока Φ ;
- изменением питающего напряжения.

Так как магнитный поток Φ для электродвигателя постоянен и не подлежит регулировке, то режим изменения частоты вращения был исследован

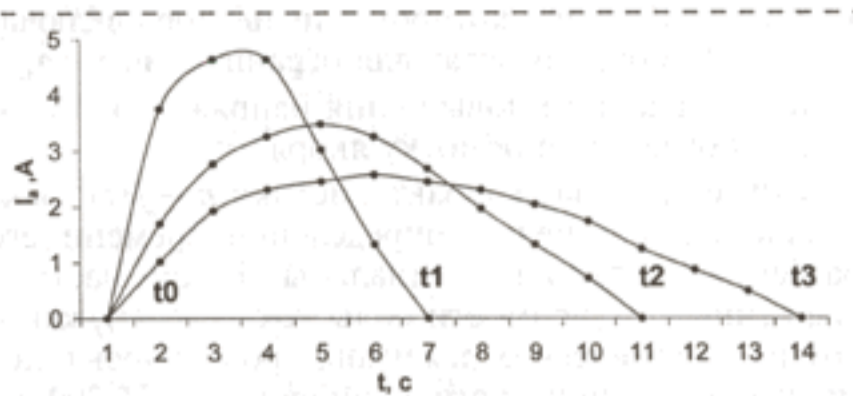


Рис. 13. График изменения силы тока при торможении двигателя

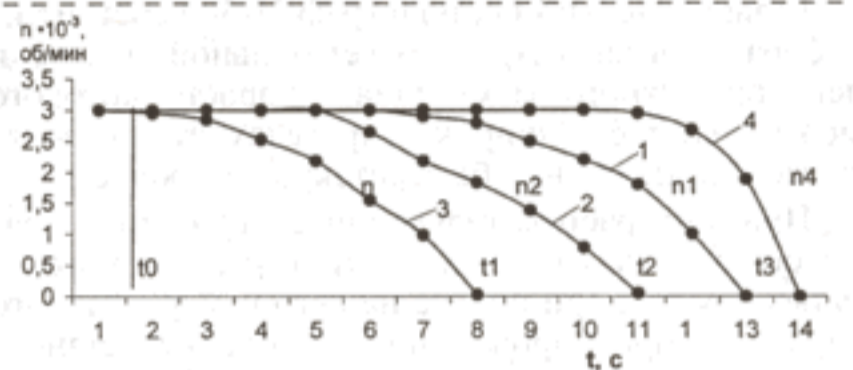


Рис. 14. График изменения частоты вращения при торможении двигателя:

1 — рекуперативное торможение; 2 — динамическое торможение; 3 — электромагнитное торможение; 4 — торможение за счет сил трения

двумя способами: включением добавочного резистора и изменением питающего напряжения. Изменение напряжения осуществлялось за счет изменения либо продолжительности периода T при $\tau = \text{const}$ (частотно-импульсное регулирование), либо времени τ при постоянном T (широтно-импульсное регулирование). Использовалось также и комбинированное регулирование, при котором изменяются как T так и τ .

На рис. 15 приведены графики изменения частоты вращения при различных напряжениях, подводимых к якорю электродвигателя, и при различных дополнительных сопротивлениях, включенных в обмотку якоря.

Все скоростные характеристики двигателя при обоих способах практически одинаковы, но при реостатном регулировании имеются значительные потери мощности на дополнительном резисторе.

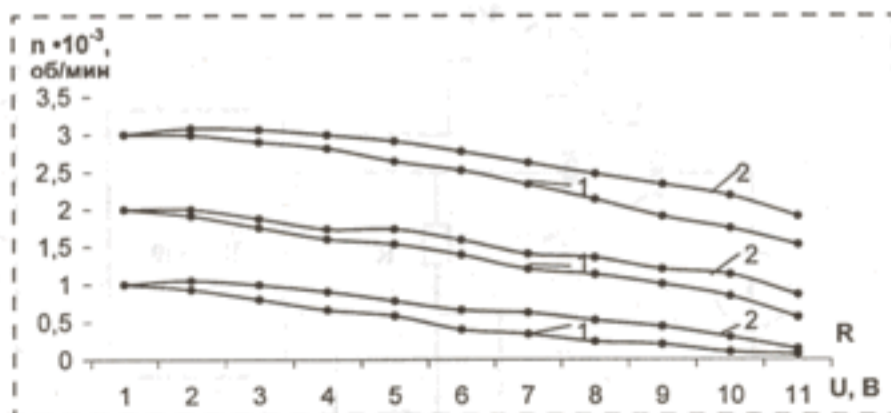


Рис. 15. График изменения частоты вращения при различных способах регулирования:

1 — включением добавочного сопротивления; 2 — изменением питающего напряжения

Поэтому при использовании автономного источника питания, наиболее предпочтителен способ изменения напряжения на зажимах якоря за счет импульсного управления.

Заключение

Приведены результаты исследований, направленные на разработку управляемых инспекционных мини-роботов, предназначенных для движения в трубах малого диаметра.

Разработана система автоматического микро-сенсорного управления роботом с применением микросенсоров.

Обоснован параметрический ряд микродатчиков, примененных для управления роботом-трубоходом при его перемещении в трубах малого диаметра. Рассмотрены типовые конструкции управляемых роботов для движения их внутри труб с изменением направления движения. Представлены динамические характеристики миниатюрных роботов на колесной платформе.

Дальнейшие исследования по разработке управляемых трубоходов и созданию систем управления на базе многопроцессорных структур будут направлены на повышение уровня адаптации и интеллектуализации при выполнении поставленных технологических задач.

Список литературы

1. Myers D. Pipe and duct applications for CLAWAR machines // Proceed. of 4th International Conference on Climbing and Walking Robot, Professional Engineering Publishing Ltd., UK, 2001. P. 1045—1052.
2. Воробьев Е. И., Дроздов В. А., Мальцевский В. В., Балакирева Т. Н. Робототехническая система для диагностики состояния оборудования, резервуаров и трубопроводов химических, нефтехимических и газовых производств // Технология. Сер. Гибкие производственные системы и робототехника: Межотр. Научн.-техн. сбор. М.: ВИМИ, МНТК "Робот". 1994. Вып. 1—2. С. 52—59.

3. Телец В. А., Никифоров А. Ю. Микроэлектронные преобразователи физических величин и компоненты датчиков — перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 6—12.

4. Мальцев П. П., Никифоров А. Ю. Технологии и изделия микроэлектромеханики // Микросистемная техника. 2001. № 10. С. 18—24.

5. Vanderbilt engineers build robotic bugs that can go the distance / By David F. Salisbury. December 1, 2000. Vanderbilt Center for Intelligent Mechatronics: <http://fourier.vuse.vanderbilt.edu/cim/cim.htm>

6. The Artificial Intelligence and Integrated Computer Systems Division. Department of Computer and Information Science Linköping University, Sweden. <http://google.yahoo.com/bin/query0?p=Linkoping+Universitet&hq=site:www.liu.se>

7. Лаборатория SNL — подразделения Минэнерго США. http://www.srcc.msu.su/num_anal/eng_math/pack/packag.htm

8. Вешников В. Б., Князьков М. М., Соловцов В. Н. Управляемое движение миниатюрных роботов внутри труб // Материалы VIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, 2001.

9. Градецкий В. Г., Пушкин М. М. Исследование динамических процессов в микроботах // Материалы VIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, 2001.

10. Васильев А. А., Калинин С. В., Кравчук Л. Н., Самохвалов Г. В. Механические системы внутритрубных роботов // Материалы VIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, 2001.

11. Черноусько Ф. Л. Динамика управляемых движений многозвенников по плоскости // Материалы VIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, 2001.

12. Кулешов В. С., Лакота Н. А. и др. Дистанционно-управляемые роботы и манипуляторы / Под ред. Е. П. Попова. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.

13. Градецкий В. Г., Кравчук Л. Н., Пушкин М. М. Динамические процессы в многозвенных микросистемах // Микросистемная техника. 2000. № 4.

14. Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калинин С. В., Кравчук Л. Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001.

15. Антомонов Ю. Т. Автоматическое управление с применением вычислительных машин. Л.: Судпромиздат, 1962.

16. Ту Т. Цифровые и импульсные системы автоматического управления. М.: Машиностроение, 1964.

17. Хрущев В. В. Электрические микромашин. Л.: Высшая школа, 1976.

18. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1976.

19. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы. М.: Энергия, 1971.

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ

"МОЛОДЫЕ УЧЕНЫЕ — НАУКЕ, ТЕХНОЛОГИЯМ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ"

"МОЛОДЫЕ УЧЕНЫЕ — 2002"

1—4 октября 2002 г., г. Москва

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Российская Академия Наук,
Российский Фонд фундаментальных исследований,
Министерство образования Российской Федерации,
Международный центр обучающих систем ЮНЕСКО,
Московский государственный институт радиотехники,
электроники и автоматики (технический университет) — МИРЭА
Московский государственный университет сервиса,
Открытое Акционерное Общество "ОК-ЛОЗАТ"

Ситов А. С. — председатель (Россия)
Лучников А. П. — ученый секретарь (Россия)
Бержанский В. Н. — г. Симферополь (Украина)
Кадыров С. М. — г. Ташкент (Республика Узбекистан)
Кулешов В. Е. — г. Москва (Россия)
Круминьш А. — г. Рига (Латвия)
Пешков С. И. — г. Москва (ЮНЕСКО)
Плескачевский Ю. М. — г. Гомель (Республика Беларусь)
Преображенский В. Л. — г. Лиль (Франция)
Семенов П. И. — г. Москва (Россия)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Быков И. — г. Киев, Васильев А. Г. — г. Москва, Воротилов К. А. — г. Москва,
Демидов К. Е. — г. Москва, Захаров А. К. — г. Москва, Камилджанов Б. И. —
г. Ташкент, Коржавый А. П. — г. Калуга, Крашенинников А. И. — г. Москва,
Мальцев П. П. — г. Москва, Марин В. П. — г. Москва, Морозов А. И. — г. Москва,
Рогачев А. В. — г. Гомель, Романов М. П. — г. Москва, Рычков А. А. — г. Санкт-
Петербург, Сахненко В. П. — г. Ростов-на-Дону, Сидоркин А. С. — г. Воронеж,
Соколов В. В. — г. Москва, Струк В. А. — г. Гродно, Суржинов А. П. — г. Томск

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ:

- Научные проблемы прикладной физики.
- Современные инженерно-физические наукоемкие технологии.
- Новые материалы и технологии будущего.
- Информационные высокие технологии.

На конференцию приглашаются молодые ученые, инженеры, аспиранты для рассмотрения вопросов физики, технологии и математического моделирования процессов высоких наукоемких технологий, обеспечивающих гармоничное устойчивое развитие современного общества.

Доклад в электронном виде (запакованный архиватором ZIP или RAR) с указанием научного направления высылается по E-mail: fisika@pochtamt.ru — Лучникову Александру Петровичу

Справки: Уч. секр.: Тел./Факс. (095) 306-26-64 (с 9.00 до 23.00)

МИРЭА: Тел. (095) 433-00-44, факс 434-92-87 (с 10.00 до 18.00)

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.3+538.945

Вл. М. Мухортов, д-р физ.-мат. наук,
Институт общей физики РАН,
В. А. Следков, канд. физ.-мат. наук,
Ростовский-на-Дону Госуниверситет,
В. М. Мухортов, канд. физ.-мат. наук,
ФГУП "Ростовский-на-Дону
научно-исследовательский институт радиосвязи"

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ В СОВРЕМЕННОЙ АППАРАТУРЕ СВЯЗИ (Перспективы применения и состояние исследований).

Часть I

Высокотемпературные сверхпроводники уже используются более 14 лет. Приведен обзор достижений в изготовлении малогабаритных резонаторов и пассивных СВЧ фильтров за последние семь лет. Показано, что достижения в этой области в ближайшее время приведут к широкому использованию высокотемпературных сверхпроводниковых устройств в современной аппаратуре связи.

Элементная база для аппаратуры связи на основе ВТСП

По мере резкого увеличения информационных потоков необходимо постоянно решать проблему улучшения основных параметров систем связи: дальность, число каналов и помехозащищенность. Особо актуальны в современных системах связи вопросы увеличения избирательности и создания приемных трактов с максимально низкой шумовой температурой. Параметры традиционных фильтров достигли своего предела и не позволяют увеличить число каналов и обеспечить защиту от интерференционных помех. Качественный скачок при разумной стоимости обеспечивается созданием СВЧ устройств на основе высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов. По оценкам специалистов, только использование пассивных СВЧ устройств на ВТСП позволяет снизить шумовую температуру на два порядка, на порядок сузить рабочие полосы, в десятки раз снизить мощность передатчиков систем связи. Например, по оценкам специалистов фирмы *Superconductor Technologies*, простая замена фильтра на диэлектрических резонаторах на ВТСП-фильтр дает расширение радиуса ячейки сотовой системы связи при полосе пропускания 5 МГц до 15,4 % или увеличение площади на 33,2 % при лучших шумовых характеристиках, а для полосы пропускания 15 МГц — увеличение до 24,5 % площади.

К 1994 г. ведущими зарубежными фирмами были разработаны основные технологические процессы, позволяющие получать тонкие пленки ВТСП с приемлемыми

параметрами для проведения НИР по созданию макетов пассивных элементов СВЧ техники. В настоящее время на основе применения ВТСП-материалов созданы все наиболее важные узлы систем связи. Каждый из узлов имеет уникальные параметры по сравнению с устройствами, использующими обычные материалы электронной техники. В ближайшие несколько лет ожидается завершение основного этапа формирования идеологии создания СВЧ систем, построенных на технологии ВТСП, и появление их первых образцов с принципиально новыми характеристиками. Увеличивающееся число публикаций по этой тематике показывает, что экспоненциальная шкала прогресса в реализации устройств будет продолжаться еще много лет, прежде чем достигнет своего фундаментального предела как в использовании свойств материала, так и в области проектирования.

К настоящему времени преимущества ВТСП-технологии при создании СВЧ техники продемонстрированы на многих устройствах вплоть до элементов антенно-фидерного тракта. Это позволяет приступить к созданию функциональных блоков, содержащих в едином охлаждаемом корпусе несколько соединенных между собой модулей как с ВТСП-элементами, так и полупроводниковыми приборами. Создание таких блоков позволит получить существенный энергетический выигрыш и уменьшить габаритные размеры, а кроме того должно привести к серьезным изменениям в архитектуре систем. Сегодня совершенно ясно, что качественные изменения в техническом уровне аппаратуры приема и обработки информации становятся возможными только на основе широкого комплексирования элементов ВТСП, полупроводниковых приборов и нового подхода к системной идеологии создаваемых средств связи.

Методики проектирования ВТСП-устройств для наиболее распространенных диапазонов частот освещены так поверхностно, что воспользоваться ими практически невозможно. Основные расчеты выполняются мощными коммерческими программами, позволяющими с высокой точностью проводить полноволновый анализ трехмерных волноведущих структур. Для сохранения передового уровня в создании ВТСП-устройств современной аппаратуры связи необходимо разработать аналогичную методику анализа и синтеза многосвязных микрополосковых проводников, расположенных на границе слоев с различной диэлектрической проницаемостью.

Анализ направлений исследований позволяет сделать крайне важный вывод о том, что в ведущих странах мира взят курс на создание полностью криогенной малогабаритной аппаратуры для приема, передачи и цифровой обработки сигналов. Реализация этих исследований может настолько кардинально изменить ситуацию в эфире и на рынке технических средств связи, что существующие сейчас в нашей стране системы радиоконтроля не смогут контролировать потоки информации.

Настоящий обзор достижений ВТСП-технологий в области создания новейшей элементной базы для аппаратуры связи предназначен для определения перспектив и программы внедрения данной технологии в СВЧ системах.

Полевые испытания базовых телефонных станций (БТС) сотовой связи, использующих ВТСП-фильтры, доказали их надежность и преимущества [1] в сравнении

с БТС, построенными по обычной технологии. Эти преимущества заключаются в следующем:

- чувствительность возросла на 2 дБ;
- подавление помех от смежных каналов увеличилось с 18 до 60 дБ;
- минимальное отношение полезных сигналов к интерференционным возросло с 13 до 20 дБ;
- среднее отношение полезных сигналов к интерференционным возросло с 16 до 24 дБ;
- число БТС, необходимое для обслуживания контрольной местности, уменьшилось с 23 до 16.

Существенные преимущества обеспечило использование ВТСП при конструировании входных мультиплексоров для бортовой аппаратуры космического базирования [2]. Обычный волноводный четырехканальный мультиплексор со средней частотой 4 ГГц имеет массу 26,2 кг и объем 51 дм³, а его тонкопленочный ВСП-аналог имеет массу 9,2 кг и объем 7,9 дм³ вместе с криогенным холодильником. Без холодильника масса ВСП-мультиплексора составляет всего 4,2 кг. При усложнении аппаратуры и увеличении числа каналов выигрыш по массогабаритным параметрам этого устройства будет еще больше.

Применение ВТСП в понижающем преобразователе на частоту 7,4 ГГц для бортовой аппаратуры на спутнике [3] позволило снизить шумовую температуру до 50 К. Это преимущество ВТСП позволяет сохранить чувствительность приемной аппаратуры при уменьшении размера антенны приблизительно в два раза [4].

Несмотря на положительные результаты испытаний и существенную выгоду от использования ВТСП телекоммуникационного оборудования его внедрение вначале шло медленно, поскольку потребовалось преодолеть психологический барьер, чтобы начать эксплуатацию столь необычной аппаратуры и подготовить обслуживающий персонал с соответствующей квалификацией. Однако рынок ВТСП электронного оборудования начал заметно расти [5]. Так, в 1998 г. его объем возрос более чем на 30 % по сравнению с 1997 г. и достиг объема 40 млн. долл. США, а доля телекоммуникационного оборудования в нем увеличилась с 3 до 8 %.

Значительное увеличение публикаций, посвященных разработке ВТСП элементной базы для радиоэлектроники, свидетельствует о продолжении финансирования НИР и ОКР в области ВТСП-технологий. Приведенные в этих статьях результаты охватывают почти все элементы радиоаппаратуры:

- резонаторы;
- приемные полосовые фильтры;
- передающие полосовые фильтры;
- заграждающие фильтры;
- перестраиваемые фильтры;
- функциональные блоки из нескольких модулей;
- антенны и суммирующие устройства;
- криогенные холодильники.

Проанализируем разработанные за последние годы ВТСП-элементы различных типов, чтобы оценить влияние полученных результатов на развитие техники связи в ближайшем будущем.

Резонаторы

В современной аппаратуре связи наибольшее распространение получили резонаторы двух типов: объемные и микрополосковые. Первые имеют большие габаритные размеры, но обеспечивают максимальную добротность и рабочую мощность и применяются в основном при конструировании высокостабильных генераторов, а также в качестве передающих фильтров. Миниатюрные

микрополосковые резонаторы используются в приемниках для конструирования многоэлементных фильтров. Исследование [6, 7] объемного резонатора, состоящего из сапфирового стержня с ВТСП экранирующими поверхностями на основе пленок $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ показали, что на частоте 5,55 ГГц его ненагруженная добротность $Q = 2 \cdot 10^6$ при $T = 90$ К, а $R_s = 0,08$ мОм. Эти значения сохранялись при увеличении мощности до 500 Вт.

Исследования [8] двухмодовых резонаторов на полусферах из $LaAl_2O_3$ для создания четырехполосных полосовых фильтров показали, что на частоте 3,7 ГГц при $T = 77$ К можно обеспечить нагруженную добротность $Q = 110\,000$ при рабочих мощностях до 35 Вт. Механически перестраиваемые резонаторы [9, 10] при добротности 100 000 и температуре 77 К обеспечивают перестройку частоты в диапазоне 1,93–1,99 ГГц при подводимой мощности до 72 Вт [11].

На дисковых резонаторах [12] микрополоскового типа с волной TM_{010} при использовании $LaAl_2O_3$ толщиной 0,5 мм в резонаторе диаметром 21,0 мм достигнута добротность 70 000 на частоте 3,5 ГГц при 77 К, а при диаметре резонатора 41,0 мм получен резонанс на частоте 1,8 ГГц при $Q = 18\,000$. Микрополосковые резонаторы, предназначенные для увеличения рабочей мощности фильтра, предложены в [13, 14]. На частоте 6,0 ГГц такие резонаторы с полосой 0,7 % выдерживали мощность до 115 Вт при $T = 77$ К.

В перечисленных типах микрополосковых резонаторов улучшение добротности достигнуто уменьшением плотности токов путем увеличения размеров ВТСП-проводников, что не всегда приемлемо при конструировании реальной аппаратуры. Поэтому в [15–17] предложены миниатюрные резонаторы, содержащие свернутые меандром или двойной спиралью узкие полосковые проводники. Такие проводники уменьшают излучение резонаторов, благодаря чему их добротность на частоте 830 МГц увеличивается до 400 000. В работе [18] сообщается об увеличении добротности резонатора с 35 000 до 50 000 на частоте 1,8 ГГц при $T = 60$ К путем создания в нем двойной симметрии.

ВТСП-резонаторы используются не только в СВЧ диапазоне, но и на более низких частотах. В работах [19, 20] сообщается о создании микрополосковых резонаторов (20×10 мм) с $Q = 40\,000$ на частоте 24,5 МГц при $T = 77$ К. Аналогичные резонаторы, изготовленные из посеребренной меди, имели добротность $Q = 9$.

Таким образом, в результате проведенных за рубежом исследований за последние годы созданы и запатентованы новые конструкции ВТСП-резонаторов, существенно превосходящие по добротности ранее известные.

Приемные фильтры

Основные усилия разработчиков приемных ВТСП-фильтров за последние годы были направлены на создание многоэлементных фильтров, обеспечивающих максимальную прямоуглольность частотной характеристики. При использовании медных проводников микрополосковые резонаторы в силу их низкой добротности применялись только в широкополосных фильтрах, где потери не так сильно зависят от добротности резонаторов. Поэтому многоэлементные фильтры, обеспечивающие максимальную прямоуглольность, создавались на основе коаксиальных линий и волноводов.

Использование ВТСП-материалов позволило сделать прорыв и в этой области только после освоения методов их расчета. Микрополосковые проводники, расположенные в трехслойной среде с неоднородным диэлектрическим заполнением, представляют собой сложную

многосвязную структуру, и расчет фильтров с использованием таких структур является крайне сложной задачей. Первые расчеты [21] десятиполюсного микрополоскового ВТСП-фильтра на $YBaCuO$ -пленке с полосой 5 % (75 МГц) от центральной частоты на средней частоте 1,75 ГГц позволили изготовить фильтр, который имел вносимые потери в полосе пропускания меньше 0,5 дБ с затуханием более 70 дБ при отстройке на 20 МГц от края рабочей полосы. Пятиполюсный фильтр аналогичной конструкции с рабочей полосой 0,5 % (50 МГц) на центральной частоте 9,1 ГГц имел вносимые потери в полосе пропускания меньше 1 дБ и обеспечивал затухание более 70 дБ при отстройке на 120 МГц от края полосы. Одиннадцатиполюсный микрополосковый фильтр [22] с рабочей полосой 11,5 МГц с центральной частотой 1,778 ГГц при $T = 65$ К имел вносимые потери в полосе пропускания меньше 0,6 дБ, а потери на отражение — менее 12 дБ и крутизну скатов приблизительно 20 дБ/МГц.

Несомненный интерес представляет другой тип миниатюрных резонаторов на сосредоточенных элементах [23], содержащий емкости на концах и параллельный контур в середине, а процедура синтеза фильтров на таких резонаторах описана в [24, 25].

В AMPS-системе сотовой связи спектр частот шириной 25 МГц разделен на четыре неравных полосы по две для каждого A и B оператора [26]. Для выделения этих полос с низким уровнем интермодуляции требуются высококачественные фильтры с полюсами затухания, расположенными рядом с полосой пропускания. В работе [27] предложена структура из трехрезонаторных блоков с отрицательными и положительными связями между крайними резонаторами, формирующими полюса затухания. Схематично изложен порядок процедуры синтеза фильтров с такими структурами, сформированными из ранее предложенных миниатюрных резонаторов на полусосредоточенных элементах, представляющих собой частотно зависимую индуктивность [23]. Приведены расчетные и экспериментальные частотные характеристики шести- и десятиполюсных квазиэллиптических фильтров, пропускающих полосы частот 851,7–853,3 МГц и 847–863 МГц соответственно и имеющих полюса затухания выше и ниже полос пропускания. Оба фильтра изготовлены на $LaAlO_3$ -подложке толщиной 0,5 мм. В работе [15] также схематично описана процедура синтеза полосового фильтра, полюса затухания которого формируются введением связей между несмежными резонаторами. Благодаря компактным резонаторам восьмиполюсный фильтр, обеспечивающий в полосе частот 824–835 МГц потери на отражение 25 дБ и имеющий два полюса затухания, удалось разместить на MgO -подложке размером $18 \times 34 \times 0,5$ мм.

Узкополосные квазиэллиптические фильтры, имеющие полосы 0,25; 0,58 и 0,84 % на центральных частотах 1972,5; 1715,2 и 1777,5 МГц соответственно, построены из резонаторов на квазисосредоточенных элементах, свернутых двойным кольцом [18]. Такие резонаторы имеют двойную симметрию, которая обеспечивает малые потери на излучение. Все фильтры изготовлены на $YBaCuO$ -пленке, нанесенной на подложки $LaAlO_3$ толщиной 0,5 мм. Четырехполюсный квазиэллиптический фильтр с размерами 20×20 мм при $T = 77$ К обеспечивает полосу 5 МГц на центральной частоте 1972,5 МГц и имеет минимальные потери 0,4 дБ. Девятиполюсные фильтры с размерами $39 \times 22,5$ мм при $T = 55$ К обеспечивают полосы 10 и 15 МГц на центральной частоте 1715,2 и 1777,5 МГц соответственно и имеют минимальные потери 0,25 дБ, а потери на отражение 15–20 дБ. Для полосы частот 1770–1785 МГц разработан восьмиполюс-

ный фильтр на свернутых прямоугольным кольцом полуволновых микрополосковых резонаторах [16, 28, 29].

Вывод. Проведенный обзор показывает, что для наиболее распространенных диапазонов частот, используемых в сотовой связи, высококачественные приемные полосовые фильтры уже разработаны и ведется активная работа по их совершенствованию. Однако в опубликованных работах методики проектирования ВТСП-фильтров с эллиптическими частотными характеристиками, описываемыми полиномами Золотарева, либо вообще не раскрыты, либо освещены так поверхностно, что воспользоваться ими практически невозможно. Основные расчеты выполняются мощными коммерческими программами, позволяющими с высокой точностью проводить полноволновый анализ трехмерных волноведущих структур. Таким образом, для сохранения передового уровня в создании ВТСП-фильтров для современной аппаратуры связи необходимо разработать аналогичную методику анализа и синтеза многосвязных микрополосковых проводников, расположенных на границе слоев с различной диэлектрической проницаемостью.

Передающие фильтры

Передающие фильтры и диплексоры обычно стоят после выходных усилителей, мощность которых может достигать 100 Вт, поэтому потери в них должны быть настолько малы, чтобы их разогрев не препятствовал поддержанию низкой температуры, при которой сохраняется сверхпроводимость. Требования к крутизне скатов передающих фильтров обычно значительно ниже, чем у приемных фильтров, поэтому они содержат меньше резонаторов.

Результаты исследования ВТСП-фильтров [30], выполненных на круглых микрополосковых резонаторах, в которых возбуждается TM_{010} мода показали, что они имеют на частоте 4 ГГц $Q = 50\,000$ при $T = 77$ К. Такая добротность достигнута после того, как резонансы других высших мод были разнесены выше и ниже основного резонанса подбором формы боковых стенок корпуса. Двухполюсный фильтр, в котором связь между резонаторами осуществлена через отверстие в экране, при $T = 77$ К имеет прямые потери менее 0,02 дБ, а четырехполюсный фильтр с центральной частотой 4 ГГц в полосе 40 МГц имеет прямые потери 0,1 дБ и потери на отражение 20 дБ. При входной мощности 60 Вт в каждом резонаторе рассеивалось менее 0,1 Вт [11]. Расчет показывает, что девятиполюсный 1 %-ный фильтр может при тех же условиях выдержать мощность не менее 1 кВт.

Конструкции вышеупомянутых фильтров [8, 11, 30] довольно сложны, поскольку резонаторы расположены один над другим и связаны между собой по вертикали. Поэтому исследованы [13] более простые фильтры, у которых микрополосковые резонаторы имеют форму шестиугольника и расположены планарно на одной подложке $LaAl_2O_3$. Изготовлены двухполюсный 1 %-ный и трехполюсный 1,3 %-ный фильтры с центральной частотой 6,04 ГГц. Размеры подложек 35×17 и 41×17 мм соответственно. При $T = 77$ К двухполюсный фильтр выдержал мощность 115 Вт, а трехполюсный — 74 Вт [14] без деградации частотных характеристик.

Таким образом, к настоящему моменту разработаны выходные полосовые ВТСП-фильтры для передатчиков с выходной мощностью до 100 Вт. Использование ВТСП позволяет уменьшить потери в фильтрах и снизить мощность выходных усилителей. Это позволяет экономить энергию, расходуемую на питание усилителей, что особенно важно для аппаратуры космического базирования.

Заграждающие фильтры

В предыдущих разделах рассмотрены только полосовые фильтры, но в современной технике связи необходимы и заграждающие фильтры. Например, АМРС-А и АМРС-В фильтры для сотовых телефонных станций должны иметь очень узкие полосы заграждения (менее 0,2 %) внутри полосы пропускания [26]. Созданию заграждающих ВТСП-фильтров посвящено гораздо меньше работ. В [31] приведены результаты проектирования заграждающего фильтра на компланарном волноводе. Фильтр содержит восемь связанных линий, расположенных на LaAlO_3 -подложке толщиной 0,5 мм и размером $19,5 \times 9,5$ мм и формирующих семиполосный фильтр с чебышевской частотной характеристикой. При $T = 20$ К фильтр обеспечивает заграждение выше 28 дБ в полосе 1,48–1,58 ГГц и потери менее 1,2 дБ. Расчетное заграждение 40 дБ не достигнуто из-за наличия паразитных связей между входом и выходом.

Для создания заграждающего фильтра с высокой крутизной скатов его нужно проектировать с эллиптическими характеристиками. Известные ранее конструкции заграждающих фильтров оказались непригодны для реализации в микрополосковом исполнении. Микрополосковая ВТСП-конструкция заграждающего фильтра с псевдоэллиптическими характеристиками опубликована и запатентована сравнительно недавно [32]. Для увеличения добротности резонаторы имеют специальную форму: микрополосок согнут пополам и свернут спиралью, благодаря чему уменьшается излучение. Для ликвидации паразитных связей каждый резонатор размещен на отдельной плате, окруженной защитным экраном. Приведены экспериментальные частотные характеристики шестиполосного фильтра, имеющего полосу заграждения 845–856,5 МГц и полосу пропускания 800–900 МГц. Фильтр обеспечивает заграждение выше 30 дБ, а в полосе пропускания имеет потери менее 1 дБ при потерях на отражение менее 20 дБ.

Перестраиваемые фильтры

Во многих случаях, например для уменьшения шума широкополосного приемника, необходимы узкополосные перестраиваемые фильтры. Однако выполненные по обычной технологии фильтры с электронной перестройкой имеют большие потери и поэтому не обеспечивают уменьшения шума. ВТСП-технологии открывают новые возможности в создании высококачественных перестраиваемых фильтров. В [33] приведены результаты исследования ВТСП-резонатора, перестраиваемого магнитным полем. YBCO -микрополосковый проводник нанесен на LaAlO_3 -подложку и сверху к нему прижата поликристаллическая ферритовая подложка. Изменением магнитного поля от 0 до 300 Э резонансная частота менялась от 7,25 до 7,5 ГГц, т. е. приблизительно на 3 %. При $T = 20$ К во всем диапазоне перестройки резонатор имел добротность около 2500. Коэффициент качества перестраиваемого резонатора, вычисленный по формуле

$$K = 2df/Qf,$$

где df — полоса перестройки; Q — ненагруженная добротность; f — средняя частота, равнялся 175. Для ВТСП-резонаторов, перестраиваемых нелинейным диэлектриком, значение этого коэффициента находится в пределах от 20 до 50. В этой же работе исследован микрополосковый резонатор из ниобия, нанесенный на поликристаллическую ферритовую подложку. При $T = 4$ К и 3 %-ной полосе перестройки (от 11,1 до 11,5 ГГц) такой резонатор имел $Q = 5000$ и $K = 288$.

В [34] исследован ВТСП-фильтр, перестраиваемый электрическим полем. На LaAlO_3 -подложку толщиной 0,5 мм нанесен слой сегнетоэлектрика SrTiO_3 толщиной 2 мкм, на который напылена пленка YBaCuO , из которой сформирован трехполосный фильтр на компланарном волноводе. Измерения параметров фильтра проведены при $T = 4$ К. При изменении напряжения от 0 до 125 В средняя частота фильтра увеличивалась от 2,4 до 2,9 ГГц, а потери уменьшались от 10 до 2 дБ. Такой компланарный волновод длиной 25 см, шириной среднего полоска 13 мкм и шириной зазора 20 мкм исследован как фазовращатель при $T = 76$ К. При напряжении 10 В фазовращатель обеспечивал относительный фазовый сдвиг 180° на частоте 1 ГГц.

В [35] исследован перестраиваемый диплексор, выполненный на основе ВТСП микрополосковой линии. На LaAlO_3 -подложку толщиной 0,25 мм нанесен слой SrTiO_3 толщиной 0,3 мкм, поверх которого выращена пленка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ толщиной 0,35 мкм. Диплексор состоит из пары двухполосных фильтров, перестраиваемых электрическим полем в 10 %-ной полосе частот K -диапазона (18–22 ГГц), и сумматора. Измерения при $T = 77$ К показали, что подача напряжения ± 400 В обеспечивает сдвиг полосы частот на 1,7 ГГц. Потери в фильтре диплексора достигали 3 и 2,5 дБ. Разработанный диплексор используется в качестве дискриминатора перестраиваемого гетеродина, разрабатываемого в *Lewis Research Center*.

* * *

Опубликованные к настоящему моменту работы по перестраиваемым ВТСП-фильтрам свидетельствуют о том, что работы по этой тематике находятся на начальной стадии и параметры созданных фильтров далеки от совершенства. Однако даже эти первые образцы находят применение в разрабатываемой аппаратуре связи.

Список литературы

1. Jedamzik D., Menolascino R., Pizarroso M., Salas B. Evaluation of HTS Sub-Systems for Cellular Basestations // *IEEE Transactions on Appl. Supercond.* June 1999. Vol. 9. № 2. P. 4022–4025.
2. Raafat R. Mansour, Shen Ye, Van Dokas, Bill Jolley, Glenn Thomson, Wai-Cheung Tang, Chandra M. Kudsia. Design Considerations of Superconductive Input Multiplexers for Satellite Applications // *IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques.* July 1996. Vol. 4. № 7. P. 1213–1227.
3. Hamid H. S. Javadi, James G. Bowen, Daniel L. Rascoe, Robert R. Romanofsky, Chris M. Chorey, Kul B. Bhasin. Jet Propulsion Laboratory/NASA Lewis Research Center Space Qualified Hybrid High Temperature Superconducting/Semiconducting 7.4 Ghz Low-Noise Downconverter for NRL HTSSE-II Program // *IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques.* July 1996. Vol. 44. № 7. P. 1279–1287.
4. David G. Smith, Vinod K. Jain. Superconducting Filters for Wireless Communications: A Reappraisal // *IEEE Transactions on Appl. Supercond.* June 1999. Vol. 9. № 2. P. 4030–4031.
5. Alex I. Braginski. Superconducting Electronics Coming to Market // *IEEE Transactions on Appl. Supercond.* June 1999. Vol. 9. № 2. P. 2825–2835.
6. Zhi-Yuan Shen, Charles Wilker, Philip Pang, William L. Holstein and Dennis J. Kountz. High Tc Superconductor-Sapphire Microwave Resonator with Extremely High Q-Values up to 90K // *IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques.* December 1992. Vol. 40. № 12. P. 2424–2431.
7. Fletcher R., Cook J. Measurement of surface impedance versus temperature using a generalized sapphire resonator technique // *Rev. Sci. Instrum.* August 1994. 65 (8). P. 2658–2666.
8. Norbert Klein, Stefan Schornstein, Indra S. Ghosh, Detlev Schemion, Michael Winter, Claudio Zuccaro. High-Q Dielectric Resonator Devices at Cryogenic Temperatures // *IEEE Transactions on Appl. Supercond.* June 1999. Vol. 9. № 2. P. 3573–3576.
9. Aminov B. A., Piel H., Hein M., Kaiser T., Muller G., Baumfalk A., Chaloupka H. J., Kolesov S., Medelius H., Wikborg E. YBaCuO Disk Resonator Filters Operating at High Power // *IEEE Transactions on Appl. Supercond.* June 1999. Vol. 9. № 2. P. 4185–4188.

10. Aminov B. A., Baumfalk A., Chaloupka H. J., Hein M., Kaiser T., Kolesov S., Piel H., Medelius H., Wikborg E. High-Q Tunable YBCO Disk Resonator Filters for Transmitter Combiners in Radio Base Stations // 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TU4E-1.

11. Alfredo C. Anderson, Hui Wu, Zhengxiang Ma, Paul A. Polakos, Paul M. Mankiewich, Andrew Barfknecht, Todd Kaplan. Transmit Filters for Wireless Basestations // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. № 2. P. 4006—4009.

12. Gunter Muller, Benedikt Aschermann, Heinz Chaloupka, Wolfgang Diets, Markus Getta, Bernd Gurzinski, Matthias Hein, Michael Jeck, Thomas Kaiser, Sergej Kolesov, Helmut Piel, Hardy Schlick, Rainer Theisejans. Double-Sided YBa₂Cu₃O_{7-d} Films for Planar High-Power Filters // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1997. Vol. 7. № 2. P. 1287—1290.

13. Zhi-Yuan Shen, Charles Wilker, Philip Pang, Dean W. Face, Charles F. Carter III, Camille M. Harrington. Power Handling Capability Improvement of High-Temperature Superconducting Microwave Circuits // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1997. Vol. 7. № 2. P. 2446—2453.

14. Shen Ye, Raafat R. Mansour. A Novel Split-Resonator High Power HTS Planar Filter // 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TU4C-2. 1997.

15. Gregory L. Hey-Shipton. Efficient Computer Design of Compact Planar Band-Pass Filters Using Electrically Short Multiple Coupled Lines // 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TH2D-2. 1999.

16. Hong J. S., Lancaster M. J., Jedamzik D., Greed R. B. 8-Pole Superconducting Quasi — Elliptic Function Filter for Mobile Communications Application // 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TU4E-2. 1998.

17. Tsuzuki G., Suzuki M., Sakakibara N., Ueno Y. Novel Superconducting Ring Filter // 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TU4E-5. 1998.

18. Reppel M., Chaloupka H. Novel Approach for Narrowband Superconducting Filters // 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TH2D-6. 1999.

19. Ma Q. Y. RF Applications of High Temperature Superconductors in MHz Range // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. № 2. P. 3565—3568.

20. Erzhen Gao, Shapur Sahba, Hui Xu, Q. Y. Ma. A Superconducting RF Resonator in HF Range and its Multi-pole Filter Applications // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. № 2. P. 3066—3069.

21. Marcilhac B., Lemaitre Y., Mansart D., Mage J. C. Development of Superconductive Microwave Filters for Mobile Communications and Filter Banks // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. № 2. P. 4014—4017.

22. Hong Teuk Kim, Byoung-Chul Min, Young Hwan Choi, Seung-Hyun Moon, Seung-Min Lee, Byungdu Oh. A Compact Narrowband HTS Microstrip Filter for PCS Applications // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. № 2. P. 3909—3912.

23. Zhang D., Liang G. C., Shih C. F., Johansson M. E., Withers R. S. Narrowband Lumped-Element Microstrip. Filter Using Capacitively-Loaded Inductors // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Dec. 1995. Vol. 43. P. 3030—3036.

24. Qiang Huang, Ji-Fuh Liang, Dawei Zhang, Guo-Chun Liang. Direct Synthesis of Tubular Bandpass Filters with Frequency-Dependent Inductors // 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TU4E-3. 1998.

25. Yoshida K., Sashiyama K., Nishioka S., Shimakage H., Wang Z. Design and Performance of Miniaturized Superconducting Coplanar Waveguide Filters // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. № 2. P. 3904—3907.

26. Soares E. R., Raihn K. F., Davis A. A., Alvarez R. L., Marozick P. J., Hey-Shipton G. L. HTS AMPS-A and AMPS-B Filters for Cellular Receive Base Stations // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. № 2. P. 4018—4021.

27. Ji-Fuh Liang, Chein-fu Shin, Qiang Huang, Dawei Zhang, Guo-Chun Liang. HTS Microstrip. Filters With Multiple Symmetric and Asymmetric Prescribed Transmission Zeros // 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TH2D-3. 1999.

28. Jia-Sheng Hong, Michael J. Lancaster, Jean-Claude Mage. Cross-Coupled HTS Microstrip Open-Loop Resonator Filter on LAO Substrate // 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TH2D-5. 1999.

29. Hammond R. B., Scalapion D. J., Schreffler J. R. and Willemsen B. A. HTS Wireless Filters: Past, Present and Future Performance // Microwave Journal. 1998. 10. P. 94—107.

30. Baumfalk A., Chaloupka H., Kolesov S., Klauda M., Neumann C. HTS Power Filters for Output Multiplexers in Satellite Communications // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. № 2. P. 2857—2861.

31. Wallage S., Tauritz J. L., Tan G. H., Hadley P., Mooij J. E. High Tc Superconducting CPW Bandstop Filters for Radio Astronomy Front Ends // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 7. № 2. P. 3489—3491.

32. Edward R. Soares. Design and Construction of High Performance HTS Pseudo-Elliptic Band-Stop Filters // 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TH2D-4. 1999.

33. Oates D. E., Dionne G. F. Tunable Superconducting Resonators Using Ferrite Substrates // 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Report TU4C-3. 1997.

34. Findikoglu A. T., Jia Q. X., Reagor D. W. Superconductor/Nonlinear-Dielectric Bilayers for Tunable and Adaptive Microwave Devices // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1997. Vol. 7. № 2. P. 2925—2928.

35. Miranda F. A., Subramanyam G., Van Keuls F. W., Romanofsky R. R. AK-Band (HTS, Gold)/Ferroelectric Thin Film/Dielectric Diplexer for a Discriminator-Locked Tunable Oscillator // IEEE Transactions on Appl. Supercond. June 1999. Vol. 9. № 2. P. 3581—3584.

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ СИМПОЗИУМ

"ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ И ЭЛЕКТРЕТНЫЙ ЭФФЕКТ В ДИЭЛЕКТРИКАХ" (ЭЛЕКТРЕТ — 2002)

26—30 ноября 2002 года, г. Москва

ОРГАНИЗАТОРЫ

Российская Академия Наук, Российский Фонд фундаментальных исследований, Министерство образования Российской Федерации, Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) — МИРЭА

ОРГКОМИТЕТ

Васильев А. Г. — г. Москва (МИРЭА) — председатель
Лучников А. П. — г. Москва (МИРЭА) — ученый секретарь
Анненков Ю. М. — г. Томск (ТПУ)
Беляев В. В. — г. Москва
Бойцов В. Г. — г. Санкт-Петербург (РПТУ),
Гольдаде В. А. — г. Гомель (НАНБ)
Ефашкин Г. В. — г. Москва (МГИЭМ)
Клинских А. Ф. — г. Воронеж (ВГУ)
Лопатин В. В. — г. Томск (ТПУ)
Лучейкин Г. А. — г. Москва (МГАПИ)
Мионов В. С. — г. Минск (НАНБ)
Попов О. Н. — г. Москва (МГИЭМ)
Рычков А. А. — г. Санкт-Петербург (РПТУ),

Сахненко В. П. — г. Ростов-на-Дону (РГУ)

Шильников А. В. — г. Волгоград (ВГАСА)

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

- Электрофизика поверхности активированных диэлектриков, трибоэлектризация.
- Электрическая релаксация и электретный эффект в диэлектрических пленках.
- Процессы поляризации в жидкокристаллических пленках.

На конференцию приглашаются ученые, инженеры, аспиранты для рассмотрения вопросов механизмов электрических процессов поляризации, электропереноса заряда и математического моделирования, обуславливающих электретный эффект в диэлектриках (пленках и слоистых структурах).

Конференция (ЭЛЕКТРЕТ—2002 г.) будет проводиться в рамках Международной научно-технической конференции "ТОНКИЕ ПЛЕНКИ И СЛОИСТЫЕ СТРУКТУРЫ" (ПЛЕНКИ—2002) с 26—30 ноября 2002 г. в г. Москве.

Условия участия в работе конференции (ЭЛЕКТРЕТ—2002) — см. Информационное извещение — 1 для конференции (ПЛЕНКИ—2002).

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 539.4:669.3

В. Н. Чувильдеев, д-р физ.-мат. наук, А. В. Нохрин, И. М. Макаров,
Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского,

В. И. Копылов, канд. техн. наук,
Физико-технический институт НАН Республики Беларусь (г. Минск)

РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ В НАНО- И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ РКУ-ПРЕССОВАНИЯ

Описаны результаты экспериментальных исследований процессов рекристаллизации в нано- и микрокристаллических меди и никеле, полученных методами равноканального углового (РКУ) прессования. Приведены данные о зависимости среднего размера зерна от температуры и длительности изотермических отжига, скорости нагрева и степени деформации. Приведены данные о зависимости температуры начала рекристаллизации от времени отжига, скорости нагрева и числа циклов РКУ-прессования.

Показано, что вблизи точки начала рекристаллизации процесс роста зерен носит необычный характер — на фоне достаточно стабильной микрокристаллической матрицы существенно укрупняются лишь отдельные зерна. Показано, что в этих условиях функция распределения зерен по размерам становится бимодальной и средний размер зерна экспоненциально нарастает со временем.

Введение

Микрокристаллические (МК) материалы, полученные специальными методами интенсивного пластического деформирования, обладают целым рядом уникальных физико-механических свойств [1–3]. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что многие особенности поведения МК материалов обусловлены их особой структурой, в первую очередь, большой протяженностью межзеренных границ и их неравновесностью [1–5].

Одной из особенностей МК металлов, полученных методами интенсивного пластического деформирования, является существенная нестабильность их структуры при нагреве. В частности, температура рекристаллизации в МК материалах оказывается существенно ниже обычной температуры рекристаллизации чистых

металлов ($\sim 0,4 \pm 0,5 T_m$ [6], T_m — абсолютная температура плавления) и составляет $T_1 = 0,28 \pm 0,35 T_m$ [7–10]. Кроме того, рекристаллизация в МК материалах носит весьма бурный характер: скорость роста зерен при $T \geq T_1$ достигает 10^{-5} см/с, а энергия активации роста зерен оказывается существенно более низкой, чем энергия активации процессов зернограничной самодиффузии [8].

Несмотря на большое число работ, посвященных экспериментальным исследованиям процессов рекристаллизации и роста зерен в МК материалах [2, 3, 7–10], в литературе отсутствуют адекватные теоретические модели, позволяющие рассчитывать температуру начала рекристаллизации и описывать закономерности роста зерен в этих материалах.

Целью настоящей работы являются экспериментальные ис-

следования процесса рекристаллизации в МК металлах.

Материалы и методика проведения эксперимента

В качестве объектов исследования выбраны медь технической чистоты М1 (99,98 % Cu, 0,005 % Fe, 0,005 % Pb, 0,004 % Zn, 0,002 % Sb, 0,002 % Ni, 0,001 % Bi, 0,002 % Sn) и никель технической чистоты НП-1 (99,88 % Ni, 0,04 % Fe, 0,03 % Si, 0,01 % Mg, 0,005 % Zn, 0,01 % C, 0,015 % Cu, 0,002 % Mn, 0,001 % Pb, 0,001 % Bi, 0,001 % Sb, 0,001 % Sn). Образцы размерами $14 \times 14 \times 165$ мм меди и никеля с зерном исходного размера 50 и 30 мкм соответственно были подвергнуты пластическому деформированию по технологии равноканального углового (РКУ) прессования [1] с числом циклов $N = 2, 4, 8, 12$ и 16 , соответствующих истинной деформации $e = 2,1; 2,4; 2,8; 3,2$ и $3,5$. Предварительно образцы были подвергнуты рекристаллизационному отжигу при температуре $0,9 T_m$ (30 мин) в вакууме.

РКУ-прессование осуществлялось при нормальной температуре в инструменте с углом пересечения рабочего и выходного каналов $2\Phi = \pi/2$. Однородность деформации простого сдвига контролировалась на каждом цикле РКУ-прессования с помощью поперечных рисок, механически нанесенных в плоскости течения образца. Использовался максимально жесткий режим РКУ-прессования (режим "D") [1]. При этом режиме заготовка на каждом цикле поворачивается на угол $\pi/2$ вокруг своей продольной оси. Такой режим позволяет обеспечивать наиболее интенсивное измельчение зеренной структуры.

Интенсивность сдвиговой деформации за цикл РКУ-прессования составляла $\Delta\Gamma = 2$. Истин-

ная (логарифмическая) деформация при этом вычисляется с помощью выражения $\epsilon = A \operatorname{Arsh} \Gamma/2$. Скорость деформирования (или скорость проталкивания заготовки из рабочего в выходной канал) составляла 0,4 мм/с. При этом скорость деформации не превышала 1 с^{-1} .

После РКУ-обработки образцы разрезались на пластинки и отжигались при температурах в интервале от 100–500 °С с продолжительностью выдержек от 5 мин до 10 ч. Отжиги образцов проводились в воздушной печи. Температура отжига выдерживалась с точностью 2–3 °С. Образцы охлаждались на воздухе. Длительность отжига контролировалась с точностью $\pm 10 \text{ с}$.

Для структурных исследований использовались методы оптической микроскопии (ОМ) (металлографии), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Структурные исследования методом ПЭМ были выполнены на просвечивающих электронных микроскопах JEM2000EX и JMX200CX при ускоряющих напряжениях 200 и 120 кВ соответственно. Снимки делались с площади не менее 5 мкм^2 . Фольги для электронномикроскопических исследований готовились стандартными методами на приборе для струйной электрополировки.

Для ОМ (оптический микроскоп NEOFOT-32) и АСМ (универсальный воздушный атомно-силовой микроскоп "Assigex-2100", контактный режим) поверхность образцов меди последовательно подвергалась механической шлифовке и полировке, а также электролитическому полированию в электролите $\text{CrO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$ при напряжении 8–10 В и плотности тока 0,2–0,4 А/см². Селективное травление зеренной структуры в течение 10 с осуществлялось путем последовательного травления поверхности шлифа 4 %- и 10 %-ными растворами HNO_3 в дистиллированной воде

и спирте (обеспечивающим общее выявление дефектной структуры металла (дислокаций, границ зерен, двойников и т. д.) и 10 %-ным раствором персульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ в дистиллированной воде (обеспечивающим селективное выявление границ зерен).

Описание экспериментальных результатов

Структура МК металла в состоянии после РКУ-прессования. На рис. 1 приведены изображе-

ния структуры МК меди М1 и МК никеля НП-1 в состоянии после РКУ-прессования с различной степенью деформации.

На представленных рисунках видно, что увеличение числа циклов РКУ-обработки приводит к формированию более однородной макроструктуры металла, а также к формированию более однородной и равноосной зеренной микроструктуры. Число циклов РКУ-прессования, при котором формируется однородная

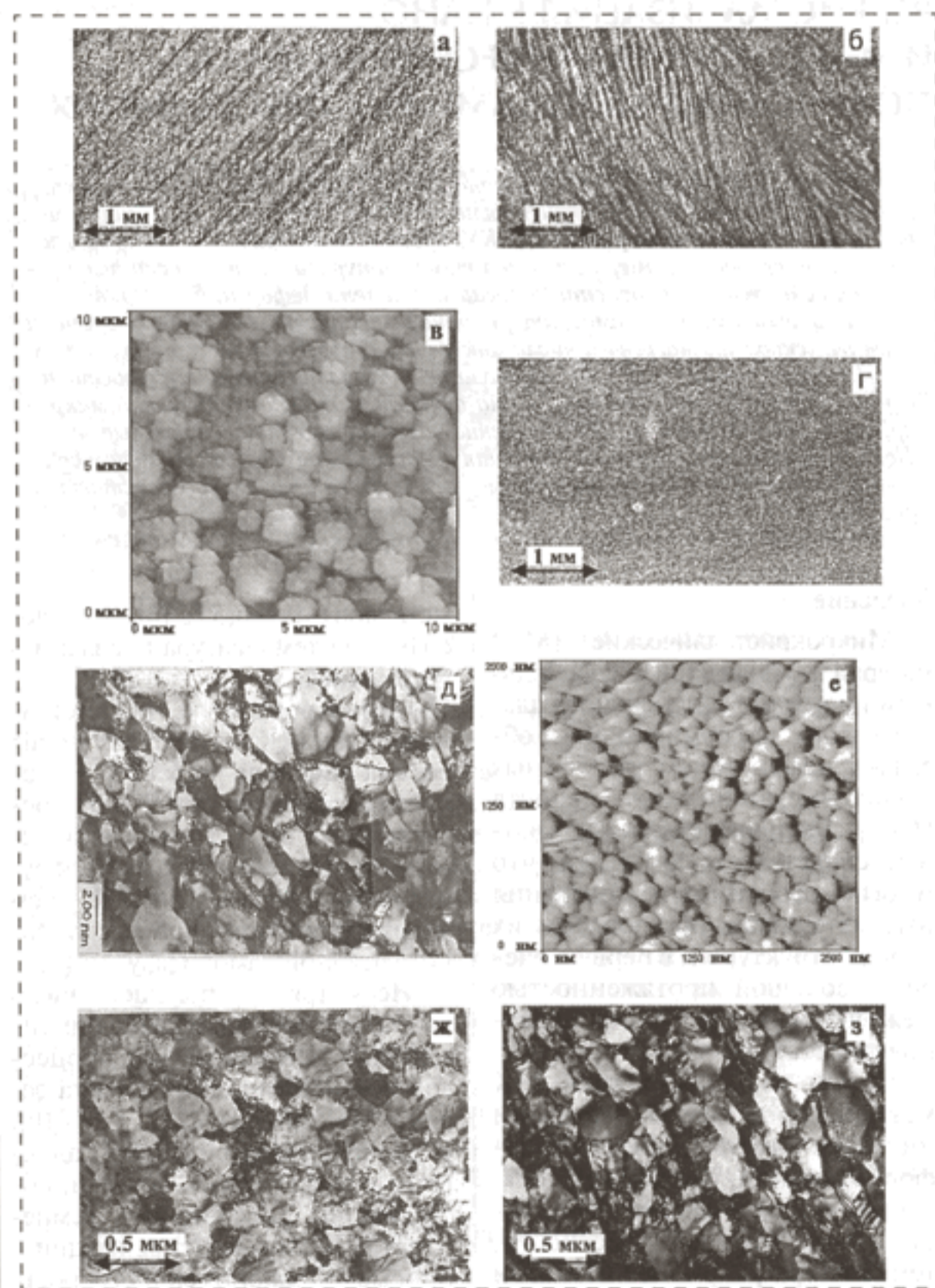


Рис. 1. Структура МК меди (а–ж) и никеля (з) в состоянии после РКУ-прессования с различной степенью деформации (числом циклов РКУ-обработки): а – N = 2 (ОМ); б – N = 4 (ОМ); в – N = 4 (АСМ); г – N = 12 (ОМ); д – N = 12 (ПЭМ); е – N = 12 (АСМ); ж – N = 16 (ПЭМ); з – N = 8 (ПЭМ)

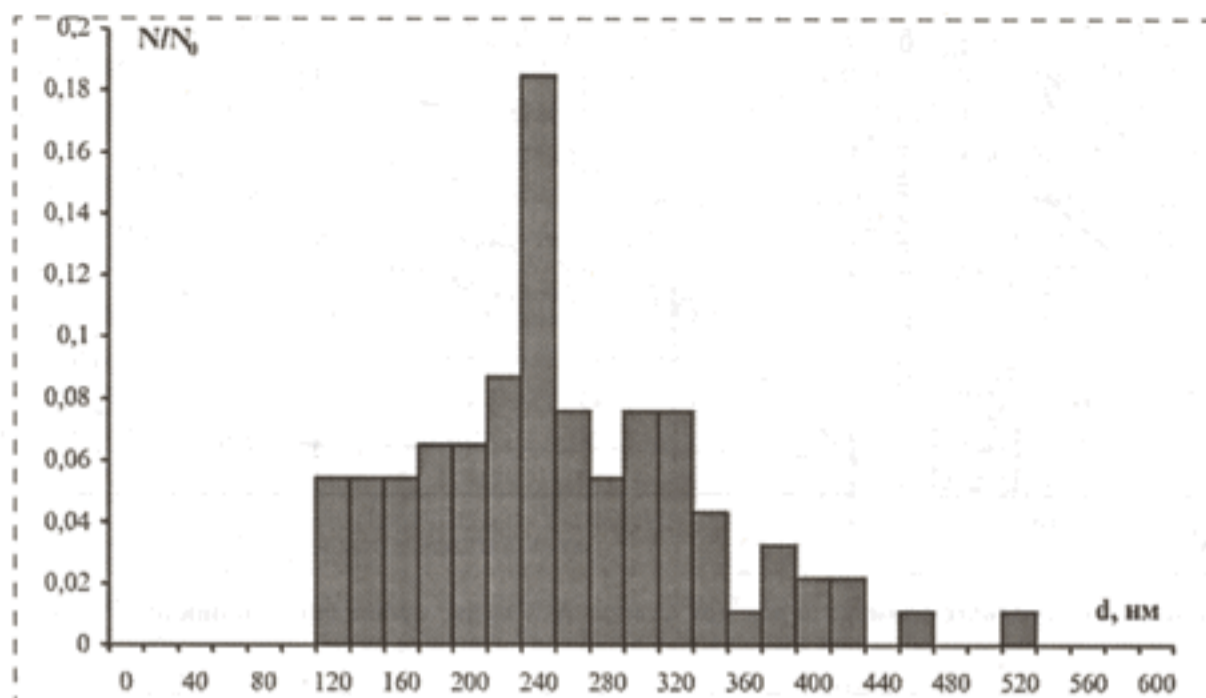


Рис. 2. Гистограмма распределения зерен в структуре МК меди М1 в состоянии после 12 циклов РКУ-обработки в координатах "размер зерна d — относительная частота N/N_0 " (АСМ)

макро- и микроструктура, равно 8—12 (рис. 1, ε).

При степени пластической деформации, соответствующей 12 циклам РКУ-прессования, в меди формируется зеренная структура со средним размером зерна 200—250 нм. В качестве примера на рис. 2 представлены гистограммы распределения зерен по размерам d (" $N_j/N_0 - d_j$ ", где N_j — число зерен с размером d_j , N_0 — полное число МК зерен).

Зависимость среднего размера зерна от времени и температуры изотермического отжига (медь, никель). На рис. 3—5 приведены экспериментальные зависимости среднего размера зерна от времени и температуры отжига МК ме-

ди и никеля, подвергнутых различному числу циклов РКУ-прессования. На рис. 3 представлены температурные и временные зависимости среднего размера зерна для МК меди М1, подвергнутой 12 циклам РКУ-прессования (полученные по данным АСМ), на рис. 4 — аналогичные зависимости для МК меди, прошедшей 16 циклов РКУ-обработки (по данным ПЭМ), на рис. 5 — временные зависимости среднего размера зерна, полученные при изотермических отжигах МК Ni, подвергнутого четырем и восьми циклам РКУ-прессования.

На рис. 3 и 4 видно, что зависимость среднего размера зерна от времени и температуры отжи-

га имеет трехстадийный характер. На первой стадии в интервале температур 20—150 °С размер зерна МК меди ($N = 16$) не изменяется (рис. 4); на второй стадии при $T > T_1 \sim 150$ °С ($N = 16$)—180 °С ($N = 12$) наблюдается бурный рост зерен; на третьей стадии при $T > T_2 \sim 180$ °С ($N = 16$)—280 °С ($N = 12$) имеет место более медленный рост зерен МК меди.

В табл. 1 приведены значения температур T_1 и T_2 для МК меди М1 ($N = 8$) и МК никеля НП-1 ($N = 8$) для различных времен изотермического отжига.

Зависимость среднего размера зерна от температуры и скорости нагрева (никель). График зависимости среднего размера зерна в МК никеле ($N = 8$) от температуры при различных скоростях нагрева V_H приведен на рис. 6. На ри-

сунке видно, что при $V_H^I = 1$ °С/с

и при $V_H^{II} = 100$ °С/с кривые $d(T)$ имеют трехстадийный характер.

На первой стадии ($T < T_1$) роста зерен не наблюдается. На второй стадии ($T_1 < T < T_2$) наблюдается интенсивный рост зерен. На третьей стадии ($T > T_2$) зависимость $d(T)$ становится более полой. Как видно на рис. 6, температура начала интенсивного роста зерен T_1 зависит от скорости нагрева и для $V_H^I = 1$ °С/с

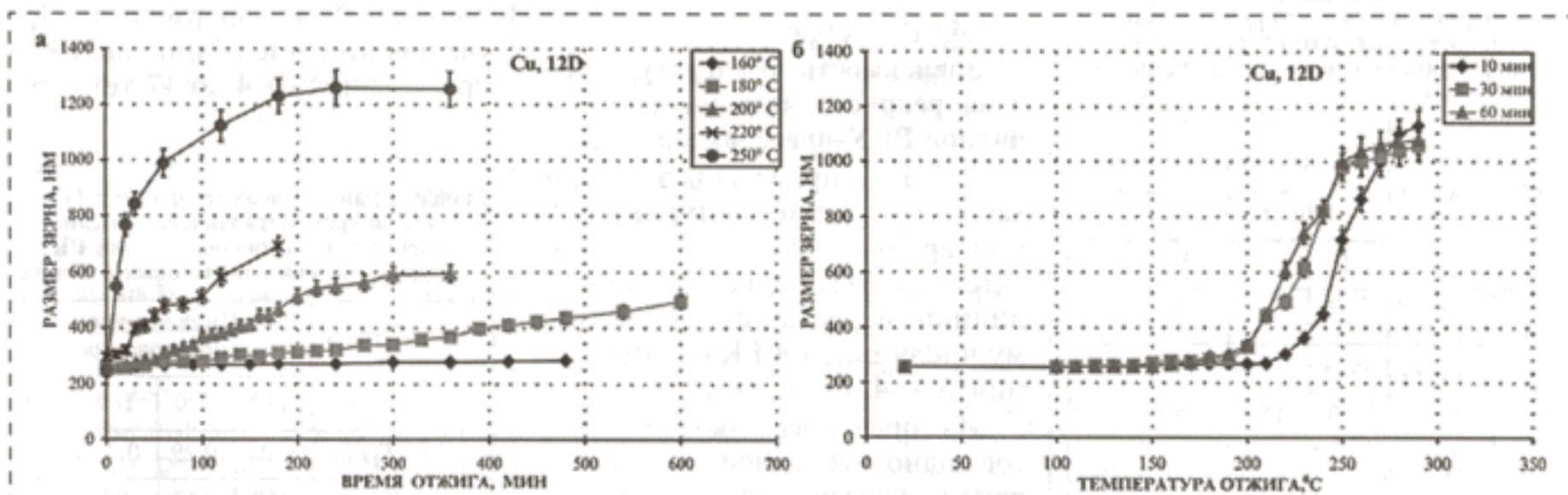


Рис. 3. Температурные (а) и временные (б) зависимости среднего размера зерна при отжиге МК меди, подвергнутой 12 циклам РКУ-прессования (АСМ)

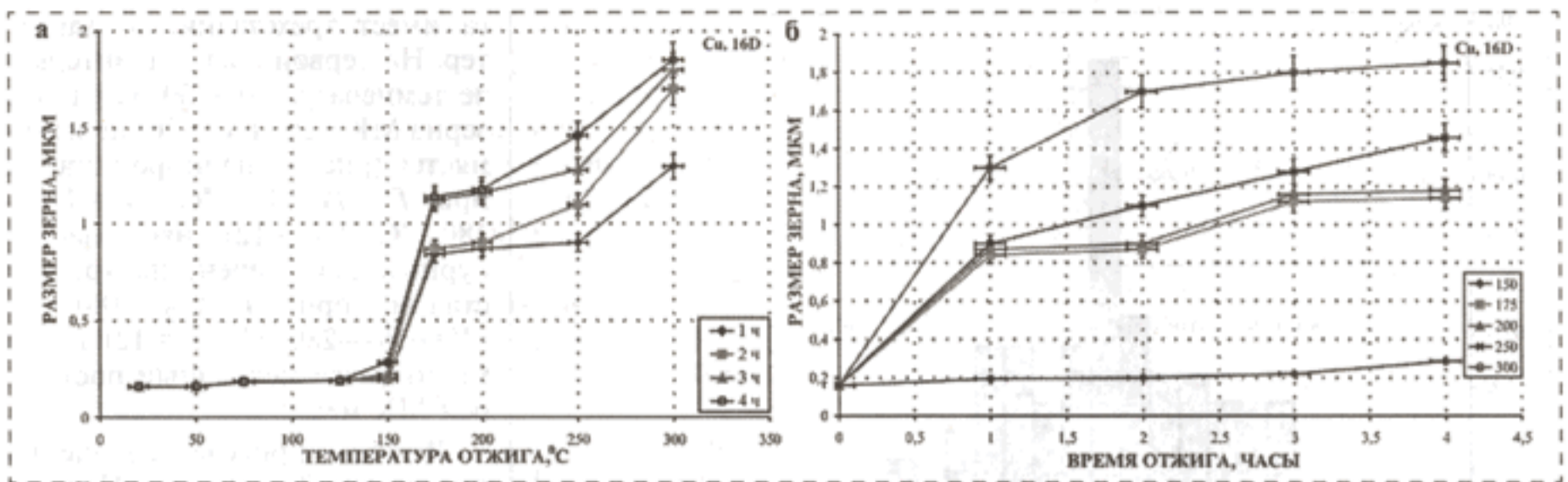


Рис. 4. Температурные (а) и временные (б) зависимости среднего размера зерна при отжиге МК меди, прошедшей 16 циклов РКУ-обработки (ПЭМ)

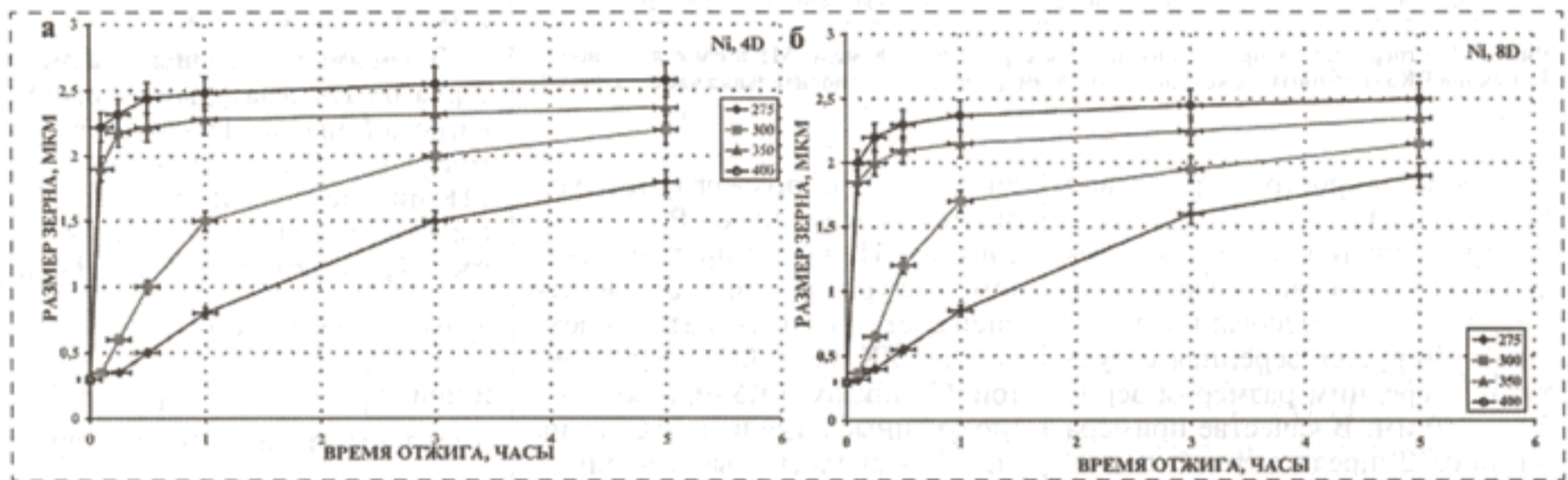


Рис. 5. Временные зависимости среднего размера зерна при отжиге МК Ni, подвергнутого 4 (а) и 8 (б) циклам РКУ-прессования

составляет 300 °С, а для $V_n^{II} = 100$ °С/с — 350 °С. Скорость роста зерен при разных скоростях нагрева также различается весьма заметно: размеры зерен

Таблица 1

Экспериментальные значения температуры начала (T_1) и окончания (T_2) аномального роста зерен в микрокристаллической меди и никеле

Температура	Материал				
	°С	Cu (N = 8)		Ni (N = 8)	
		Время отжига, ч			
T_1	°С	120	100	250	200
	T_1/T_m	0,29	0,28	0,30	0,27
T_2	°С	170	150	300	280
	T_2/T_m	0,33	0,31	0,33	0,32

Примечание. N — число циклов прессования.

при обеих скоростях различаются на десятки процентов, а время нагрева — на два порядка. При $V_n^I = 1$ °С/с средняя скорость роста зерен на второй стадии составляет $\dot{d} = 1,6 \cdot 10^{-6}$ см/с, а при $V_n^{II} = 100$ °С/с скорость $\dot{d} = 1,4 \cdot 10^{-4}$ см/с.

Зависимость температуры начала рекристаллизации от числа циклов РКУ-прессования (медь).

В табл. 2 приведены значения характерных температур T_1 и T_2 при времени выдержки 1 ч для МК меди М1, подвергнутой различной деформации (различному числу циклов РКУ-прессования N = 4, 8, 12, 16).

Из представленных результатов видно, что зависимость температуры начала рекристаллизации от числа N циклов РКУ-прессования является немонотонной. Так,

при увеличении числа циклов РКУ-прессования от 4 до 12 температура T_1 возрастает от 110 до 180 °С, а при дальнейшем увеличении числа циклов до N = 16 температура T_1 уменьшается до 150 °С.

Аналогичный характер имеет зависимость температуры T_2 от степени РКУ-деформации. При увеличении числа циклов РКУ-прессования от 4 до 12 темпера-

Таблица 2

Значения характерных температур T_1 и T_2 для микрокристаллической меди, подвергнутой различной степени РКУ-деформации, при одночасовых отжигах

Температура	°С	Число циклов прессования			
		110	120	180	150
T_1	°С	110	120	180	150
	T_1/T_m	0,28	0,29	0,33	0,31
T_2	°С	160	170	280	180
	T_2/T_m	0,32	0,33	0,41	0,33

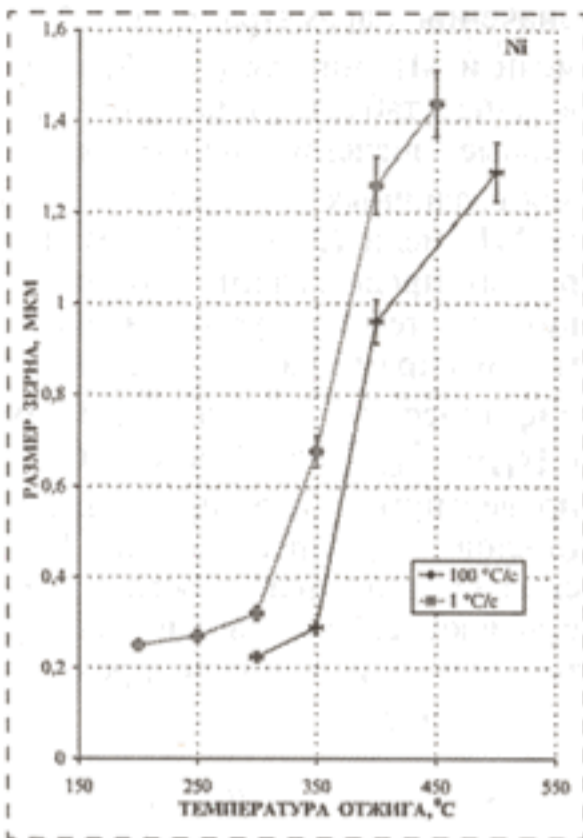


Рис. 6. Зависимость среднего размера зерна никеля ($N = 8$) от температуры при различных скоростях нагрева (ПЭМ)

тура T_2 существенно возрастает (от 160 до 280 °C), а при увеличении числа циклов до 16 наблюдается снижение T_2 до 180 °C.

Эффект аномального роста зерен (медь, никель). Детальные исследования структуры, формируемой после отжига, проведенных при температуре 150–400 °C, показывают, что на второй стадии отжига ($T_1 < T < T_2$) процесс рекристаллизации носит необычный характер — на фоне достаточно стабильной МК матрицы со средним размером зерна 0,2–0,5 мкм существенно укрупняются лишь отдельные зерна. Их размеры примерно в 5–10 раз превышают средний размер зерен матрицы. Относительная площадь, занимаемая такими зернами при $T \geq T_1$, составляет 10 % и при дальнейшем увеличении температуры отжига продолжает возрастать.

При увеличении температуры до $T \approx T_2$ площадь рекристаллизованной структуры достигает 80 %, в дальнейшем процесс рекристаллизации осуществляется обычным образом за счет увеличения размеров крупных рекристаллизованных зерен.

В качестве примера аномального роста зерен на рис. 7 приве-

дены изображения структур МК меди М1 ($N = 12$) и никеля НП-1 ($N = 8$) после одночасовых изотермических отжигов в температурном интервале 200–350 °C.

На рис. 8 приведена гистограмма, характеризующая распределение зерен по размерам в условиях аномального роста (МК медь, $N = 12$, 280 °C, 1 ч). Распределение можно считать бимодальным.

Обобщение экспериментальных результатов

Зависимость температуры начала рекристаллизации от времени отжига. Анализ температур-

ных зависимостей среднего размера зерна для МК меди М1 ($N = 8$ — табл. 1, $N = 12$ — рис. 3 и $N = 16$ — рис. 4) показывает, что с увеличением времени отжига температура рекристаллизации немонотонно уменьшается. Так, для МК меди ($N = 16$) увеличение времени отжига от одного до четырех часов приводит к уменьшению температуры рекристаллизации T_1 от 150 до 125 °C (см. рис. 4). В случае МК меди М1 ($N = 12$) увеличение времени отжига от 10 до 60 мин приводит к уменьшению температуры T_1 на 40 °C (от 220 до 180 °C, см. рис. 3).

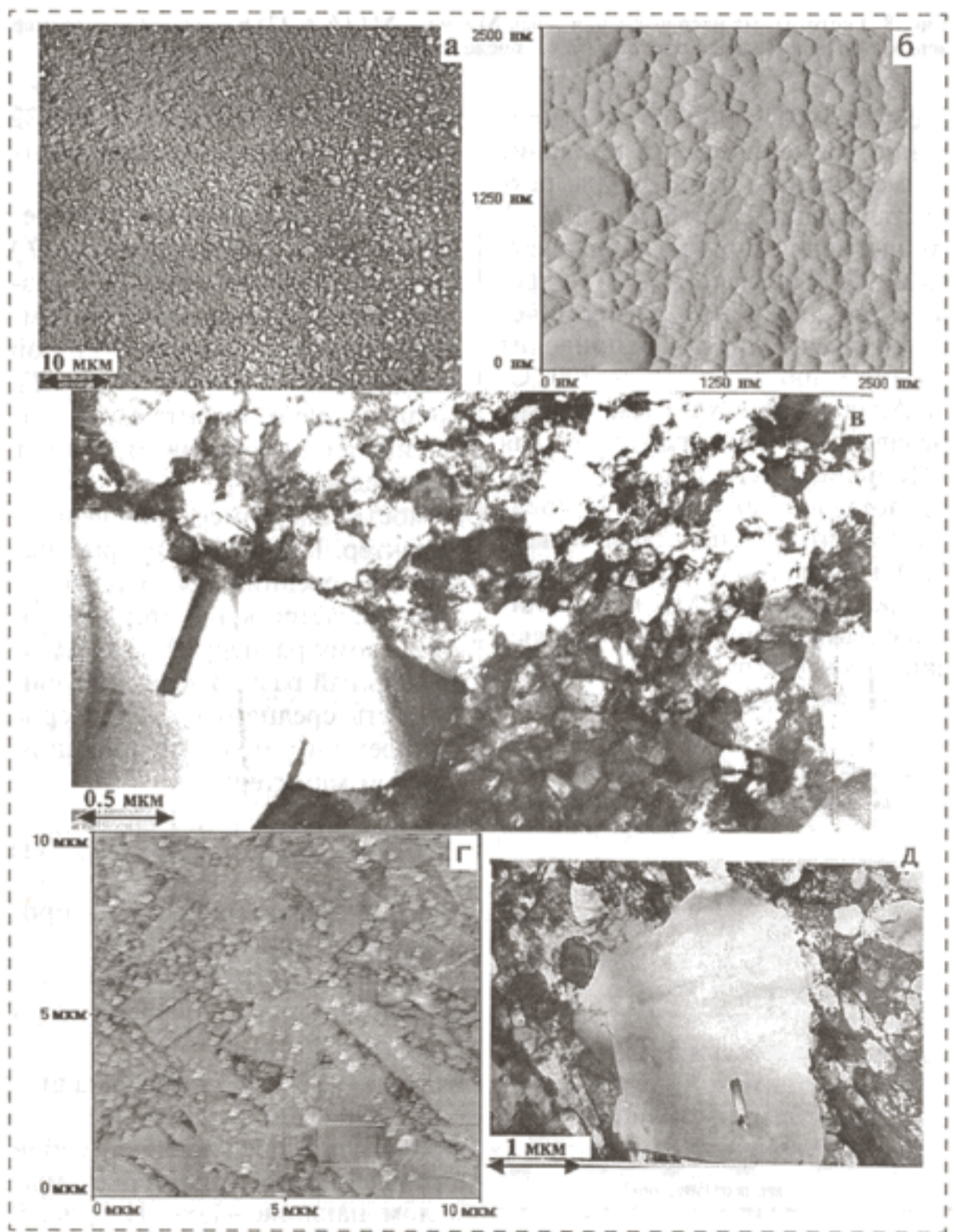


Рис. 7. Структура МК Cu и Ni после одночасовых отжигов: а — МК Cu 200 °C (ОМ); б — МК Cu 200 °C (АСМ); в — МК Cu 250 °C (ПЭМ); г — МК Cu 280 °C (АСМ); д — МК Ni 350 °C (ПЭМ)

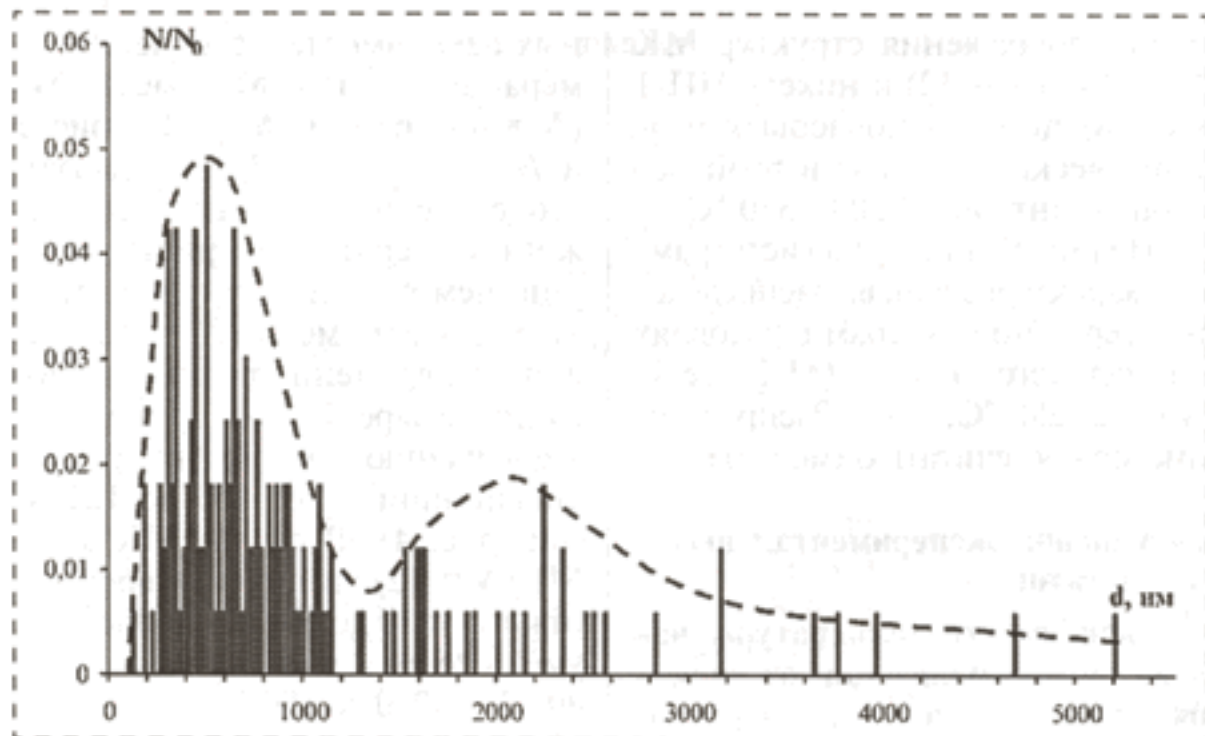


Рис. 8. Гистограмма распределения зерен МК меди М1 ($N = 12$) в координатах "размер зерна d —относительная частота N/N_0 " после отжига $280\text{ }^\circ\text{C}$ (1 ч) (АСМ)

В случае МК меди ($N = 8$) увеличение времени отжига приводит к уменьшению температуры рекристаллизации T_1 от 120 до $100\text{ }^\circ\text{C}$. Аналогичная картина наблюдается и в МК никеле ($N = 8$) — увеличение времени изотермического отжига от 1 до 5 ч приводит к снижению T_1 от 250 до $200\text{ }^\circ\text{C}$.

Анализ данных по температуре начала рекристаллизации T_1 для МК меди и МК никеля ($N = 8$), представленных в табл. 1, показывает, что температуры начала (T_1) и окончания (T_2) аномально роста зерен для МК меди и никеля, выраженные в гомологических температурах T_1/T_m и T_2/T_m , составляют $0,30$ и $0,33$ (для одно-

часовых отжигов) и $0,28$ и $0,32$ (для пятичасовых отжигов) соответственно.

Аномальный рост зерен. Определим закон роста зерен $\bar{d}(t, T)$ (т. е. зависимость среднего размера зерна \bar{d} от времени t и температуры T отжига) на второй стадии отжига при $T_1 < T < T_2$. Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что в этих условиях ($T_1 < T < T_2$) зависимость $\bar{d}(t)$ имеет необычный характер. При больших временах отжига средний размер зерна приближается к некоторому постоянному размеру $D \gg d_0$ (d_0 — начальный размер зерен) и зависимость среднего размера зерна от времени имеет экспоненциальный характер:

$$\bar{d}(t) = d_0 + D[1 - \exp(-t/\tau_1)], \quad (1)$$

где τ_1 — характерное время протекания данного процесса.

В этом нетрудно убедиться, построив зависимости

$$\ln\left[1 - \frac{\bar{d} - d_0}{D}\right] - t,$$

которые на второй стадии представляют собой прямые линии, характеризуемые углом наклона $\sim 1/\tau_1$. На рис. 9 представлены данные зависимости для МК меди М1 ($N = 12$).

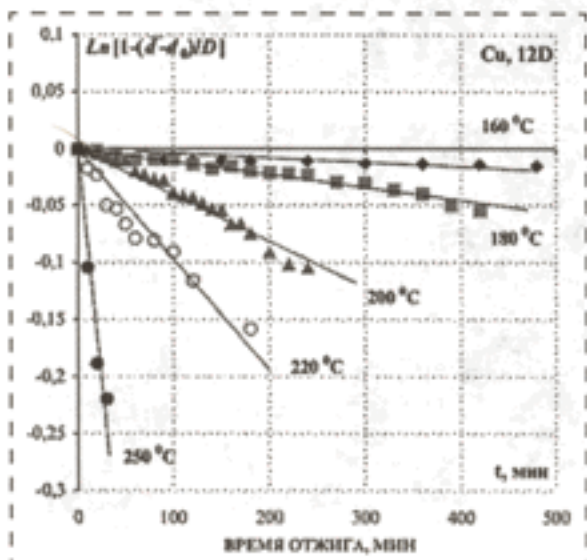


Рис. 9. Зависимость среднего размера зерна в МК меди М1 ($N = 12D$) в полулогарифмических координатах на второй стадии отжига

Значения параметра τ_1 для МК меди и МК никеля ($N = 8$) приведены в табл. 3, а в табл. 4 — числовые значения параметра τ_1 для различных температур отжига МК меди ($N = 8, 12, 16$). На рис. 10 представлены соответствующие температурные зависимости параметра τ_1 в полулогарифмических координатах $\ln[\tau_1] - T_m/T$ для МК Cu и Ni, подвергнутых различному числу циклов РКУ-прессования. Поскольку эти зависимости представляют собой прямые линии, то связь τ_1 и T можно представить в виде

$$\tau_1 = \tau_1^0 \exp[Q_1/(kT)]. \quad (2)$$

Обращает на себя внимание параллельность линий $\ln(\tau_1) - T_m/T$, построенных для МК меди и никеля.

Из представленных данных (рис. 10, табл. 3) видно, что угол наклона прямых зависит от числа

Таблица 3
Характерные значения параметра τ_1 , вычисленные на основе анализа экспериментальных зависимостей $\bar{d}(t)$ при различных температурах отжига

Cu ($N = 8$)		Ni ($N = 8$)	
Температура, $^\circ\text{C}$	τ_1, c	Температура, $^\circ\text{C}$	τ_1, c
160	$3,4 \cdot 10^4$	250	$6,5 \cdot 10^4$
180	$1,3 \cdot 10^4$	275	$2 \cdot 10^4$
200	$4,9 \cdot 10^3$	300	$6,4 \cdot 10^3$
250	$5,5 \cdot 10^2$	350	$1 \cdot 10^3$
—	—	400	$2,1 \cdot 10^2$

Таблица 4
Числовые значения параметра τ_1, c , для МК меди М1, подвергнутой различному числу циклов РКУ-прессования

Температура $T, ^\circ\text{C}$	T/T_m	$N = 8D$	$N = 12D$	$N = 16D$
150	3,20	—	—	$3,3 \cdot 10^2$
160	3,13	$3,4 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^6$	—
175	3,03	—	—	36
180	3,00	$1,3 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^5$	—
200	2,87	$4,9 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^5$	35
220	2,75	—	$6,0 \cdot 10^4$	—
250	2,59	$5,5 \cdot 10^2$	$7,4 \cdot 10^3$	34
300	2,37	—	—	3,0

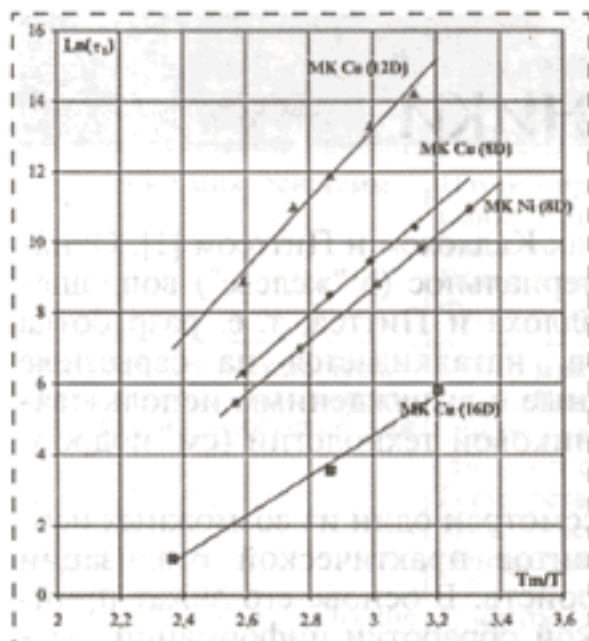


Рис. 10. Температурные зависимости параметра τ_1 для МК меди и никеля, подвергнутых 8, 12 и 16 циклам РКУ-прессования

циклов РКУ-прессования. Это свидетельствует о зависимости энергии активации Q_1 аномального роста зерен от числа циклов РКУ-прессования. При увеличении числа циклов от 8 до 12 наблюдается увеличение Q_1 от $7,7$ до $8,7 kT_m$, а дальнейшее увеличение числа циклов от 12 до 16 приводит к уменьшению значения Q_1 до $5,6 kT_m$.

Отметим, что энергия активации процесса аномального роста

зерен в МК никеле ($N = 8$) равна $7,5 \pm 0,1 kT_m$ и оказывается весьма близкой к энергии активации аномального роста зерен в МК меди ($N = 8$), равной $7,7 \pm 0,1 kT_m$.

Авторы благодарят за поддержку Международный научно-технический центр ISTC (грант 1413-00), Российский фонд фундаментальных исследований (грант 00-02-16546), а также Программу "Фундаментальные исследования в высшем образовании" (BRHE) и Научно-исследовательский и образовательный центр сканирующей зондовой микроскопии Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (НОЦ СЗМ ННГУ).

Список литературы

1. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.
2. Валиев Р. З., Исламгалиев Р. К. Структура и механическое поведение ультрамелкозернистых металлов и сплавов, подвергнутых интенсивной пластической деформации // ФММ. 1998. Т. 85. С. 161–177.
3. Гусев А. И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и соединениях // 1998. УФН. Т. 168. № 1. С. 55–83.

4. Gleiter H. Nanocrystalline materials // Progress in materials science. 1989. V. 33. N 4. P. 223–315.
5. Valiev R. Z., Kaibyshev O. A. Non-equilibrium structure of grain boundaries and properties of metals // J. de Physique. 1985. V. 46. N 4. P. C4-641–C4-644.
6. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1967. 404 с.
7. Furukawa M., Iwahashi Y., Horita Z., Nemoto M., Tsenev K., Valiev R. Z., Langdon T. G. Structural evolution and the Hall-Petch relationship in Al-Mg-Li-Zn alloy with ultra-fine grain size // Acta mater. 1997. V. 45. P. 4751–4757.
8. Wang J., Iwahashi Y., Horita Z., Furukawa M., Nemoto M., Valiev R. Z., Langdon T. G. An investigation of microstructural stability in an Al-Mg alloy with submicrometer grain size // Acta mater. 1996. V. 44. P. 2973–2982.
9. Gertsman V. Y., Birringer R., Valiev R. Z., Gleiter H. On the structure and strength of ultrafine-grained copper produced by severe plastic deformation // Scr. Met. Mat. 1994. V. 30. P. 229–234.
10. Valiev R. Z., Krasilnikov N. A., Tsenev N. K. Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure // Mat. Sci. and Eng. A137. 1991. P. 35–40.
11. Ахмадеев Н. А., Валиев Р. З., Копылов В. И., Мулюков Р. Р. Формирование субмикрозернистой структуры в меди и никеле с использованием интенсивного сдвигового деформирования // Изв. АН СССР. Металлы. 1992. № 5. С. 96–101.
12. Исламгалиев Р. К., Пышмынцев И. Ю., Хотинков В. А., Корзников А. В., Валиев Р. З. Механическое поведение ультрамелкозернистого армо-железа // ФММ. 1998. Т. 86. Вып. 4. С. 115–123.
13. Lian J., Valiev R. Z., Baudelet B. On the enhanced grain growth in ultrafine grain metals // Acta metall. material. 1995. V. 43. P. 4165–4170.

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ТОНКИЕ ПЛЕНКИ И СЛОИСТЫЕ СТРУКТУРЫ" (ПЛЕНКИ — 2002)

26–30 ноября 2002 года, г. Москва

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Российская академия наук, Российская академия естественных наук, Министерство образования Российской Федерации, Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) — МИРЭА, ЗАО "ЦНИИМАШ—ПОЛИКОМП".

ОРГКОМИТЕТ

Ситов А. С.	— г. Москва (Россия) — председатель
Лучников А. П.	— г. Москва (Россия) — научный секретарь
Джин Юаншенг	— г. Пекин (Китайская Народная Республика)
Мамедов А.	— г. Адана (Турция)
Овчинников А. А.	— г. Дрезден (Германия)
Перно Ф.	— г. Лиэль (Франция)
Поплавко Ю. М.	— г. Киев (Украина)
Рогачев А. В.	— г. Гомель (Республика Беларусь)
Семенов В. И.	— г. Королев (Россия)
Шермухамедов А. Т.	— г. Ташкент (Узбекистан)
Штериберг А.	— г. Рига (Латвия)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Васильев А. Г. — г. Москва (МИРЭА) — председатель,
Валеев А. С. — ОАО "Микрон", Воротилов К. А. — г. Москва (МИРЭА), Карманенко С. Ф. — г. Санкт-Петербург (ЛЭТИ), Крашенинников А. И. — г. Москва (МГАПИ), Марин В. П. — г. Москва (МИРЭА), Мухортов В. М. — г. Ростов-на-Дону (РГУ), Пахомов Л. Г. — г. Ниж. Новгород (ННГУ), Перепечко И. И. —

г. Москва (МИРЭА), Рычков А. А. — г. Санкт-Петербург (РГПУ), Сидоркин А. С. — г. Воронеж (ВГУ), Топоров Ю. П. — г. Москва ИФХ РАН.

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ:

- Физика поверхности пленок.
- Структурообразование и релаксационно-диффузионные межфазные процессы.
- Электрические релаксационные процессы в пленочных структурах.
- Математическое моделирование релаксационных процессов.
- Физические процессы в тонких пленках и слоистых структурах при их электронной и радиационной обработке.
- Активные пленочные структуры.
- Защитные и физико-механические свойства пленок.
- Новые применения пленок и слоистых структур в экстремальных условиях.
- Методы и приборы контроля пленок.

На конференцию приглашаются ученые, инженеры, аспиранты для рассмотрения вопросов физики, математического моделирования, технологии формирования и активации, а также применения тонких пленок и слоистых структур, имеющих сложную макроструктуру с наличием межфазных границ раздела слоев.

Справки: Тел./Факс: (095) 306-26-64 (с 9,00 до 23,00)

Принимается рекламная информация по новым материалам, их технологии, датчикам на основе пленок, а также приборам контроля.

В МИРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 541.42

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

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ РЕАКЦИОННО-ДИФФУЗИОННЫЕ СРЕДЫ: ТЕХНИКА ФОРМИРОВАНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Рассмотрены принципы формирования реакционно-диффузионных сред, способных выполнять операции обработки информации высокой вычислительной сложности, и основные задачи, решаемые в настоящее время этими средами.

Распределенный характер химических реакционно-диффузионных сред и присущие им нелинейные динамические механизмы определяют высокий параллелизм и сложные логические операции, выполняемые средами в качестве элементарных. Широко используемые в настоящее время при создании сред светочувствительные каталитические реакции существенно упрощают ввод—вывод информации и управление информационными процессами.

Обсуждаются методы формирования сред, оптимальных для решения задач высокой вычислительной сложности.

Несколько исходных замечаний

Многие годы "человекоподобный" стиль обработки информации привлекал внимание исследователей, создававших вычислительные и информационно-логические устройства. В конечном счете, под "человекоподобным" стилем подразумевалось эффективное решение проблем высокой вычислительной сложности, таких как распознавание образов, сцен и ситуаций, поиск оптимальных решений задач, описываемых сложным деревом целей, изучение временной эволюции сложных многофакторных систем и т. д. Эти проблемы в достаточной степени успешно решает человек. В то же время нелинейная зависимость вычислительных ресурсов, необходимых для решения задач высокой вычислительной сложности, от их размера вызывает значительные, а нередко и непреодолимые, трудности решения этих задач современной фон-Неймановской вычислительной техникой.

Выходом из этой ситуации явилось возрождение нейросетевых представлений, разработанных еще в

сороковые годы Мак Каллохом и Питтсом [1]. Однако до сих пор материальное (в "железе") воплощение идей Мак Каллоха и Питтса, т. е. разработка нейрокompьютеров, наталкивается на серьезные трудности, связанные с вынужденным использованием полупроводниковой технологии (см. подробнее [2]).

Ниже будет рассмотрен один из возможных перспективных вариантов практической реализации нейросетевых устройств. В основе его лежат принципы биологической обработки информации, реализующиеся в реакционно-диффузионных системах [2, 3].

Распределенные информационно-логические среды

Реакционно-диффузионные системы представляют собой биологические, физические или же химические объекты, динамика которых описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений [4, 5]:

$$\partial x_i / \partial t = f_i(x_1, \dots, x_N) + \sum_j D_{ij} \Delta x_i,$$

где первый член $f_i(x_1, \dots, x_N)$ отвечает нелинейной кинетике взаимодействия компонентов x_i , а второй — их взаимной диффузии.

Построенные на основе реакционно-диффузионных систем распределенные среды являются принципиально отличными от используемых сегодня средствами обработки информации. Для них характерен высокий параллелизм, поскольку информация обрабатывается во всех точках среды одновременно (точнее — в ее микрообъемах, размеры которых определяются динамическими механизмами среды). Характер обработки информации определяется механизмами взаимодействия компонентов среды. В силу нелинейности этих взаимодействий распределенные реакционно-диффузионные среды могут выполнять в качестве элементарных сложные логические функции.

Забегая несколько вперед, продемонстрируем некоторые информационные возможности рассматриваемых сред.

На протяжении последнего десятилетия было показано, что реакционно-диффузионные среды на основе нелинейных химических систем типа Белоусова—Жаботинского (см. ниже) способны выполнять операции обработки изображений.

Оказалось, что операции обработки черно-белых изображений, выполняемые химической реакционно-диффузионной средой, подобны основным операциям человеческого зрения (см. [6] и ссылки к этой статье). Данные операции можно условно подразделить на две основных категории.

Операции первой из них дают возможность определить общие характеристики изображения в целом. Набор их включает в себя выделение основного скелета изображения (рис. 1, а), удаление незначительных особенностей (рис. 1, б),

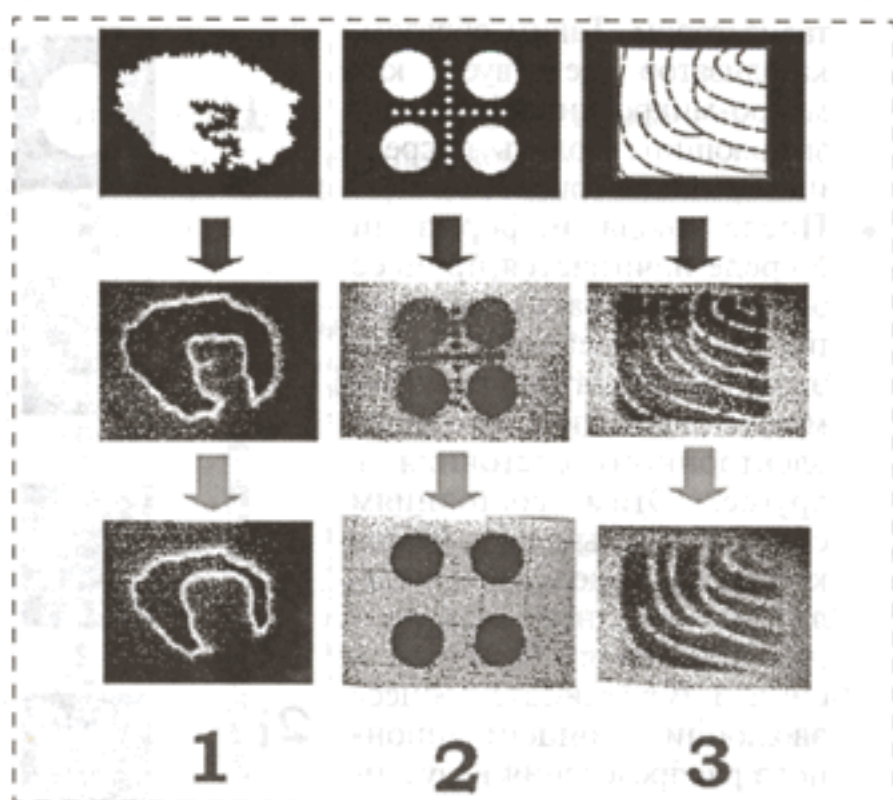


Рис. 1. Операции, позволяющие найти общие характеристики изображения:

определение общего мотива (1); выделение основных фрагментов (2); восстановление изображения, имеющего дефекты (3). Здесь и на следующих рисунках черные стрелки отвечают вводу изображения, серые — его эволюции в среде

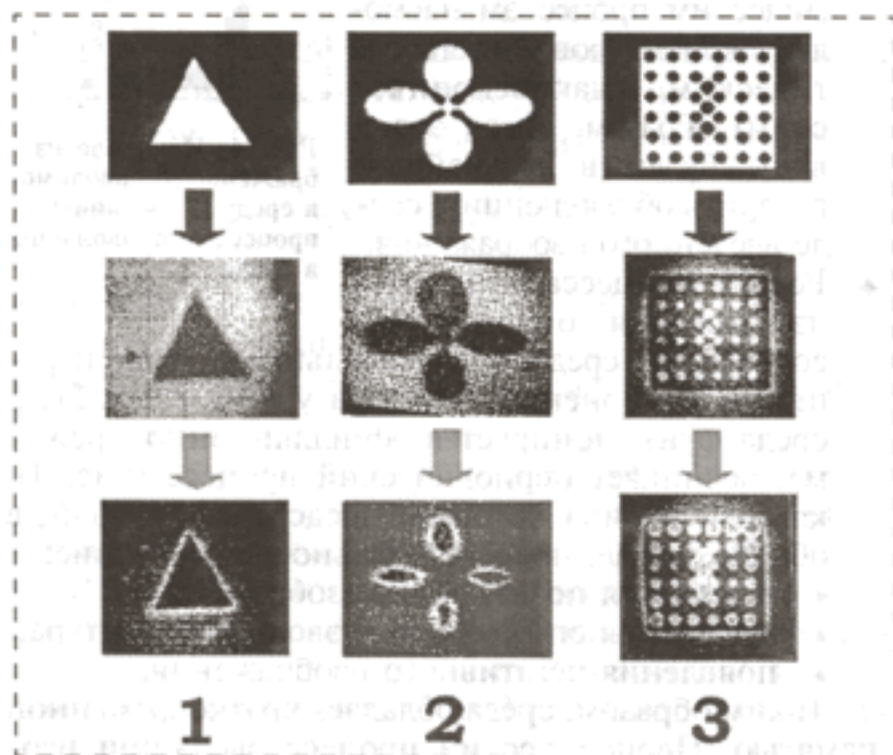


Рис. 2. Операции обработки изображений, выделяющие его детали: выделение контура (1); сегментация изображения (2); выделение малых особенностей (3)

операции "дополнения до целого" и, в частности, восстановление изображения, имеющего дефекты (рис. 1, в).

Второй набор операций обработки изображений может быть определен как "переключение на детали". В него входят выделение контура (рис. 2, а), сегментация, т. е. разделение изображения на простые части (рис. 2, б), выделение малых особенностей изображения (рис. 2, в).

Исследования последних лет показали, что информационные возможности реакционно-диффузионных сред далеко не исчерпываются операциями обработки изображений [2]. Более того, сегодня отчетливо видны и перспективы дальнейшего развития средств обработки информации, которые мо-

гут быть построены на основе этих сред и будут способны решать различные задачи высокой вычислительной сложности.

Для понимания того, что определяет способность реакционно-диффузионной среды обрабатывать информацию, рассмотрим подробнее механизмы обработки информации реакционно-диффузионными средами и факторы, определяющие способность среды решать выбранную задачу. К ним прежде всего следует отнести:

- выбор конкретных реакционно-диффузионных систем, которые могут быть использованы в качестве информационно-логических сред;
- основные пути формирования сред оптимальных для решения конкретной выбранной задачи.

Большинство результатов изучения возможностей обработки информации реакционно-диффузионными средами, рассмотренных ниже, было получено с использованием одной и той же экспериментальной техники [6].

Экспериментальная установка (рис. 3) позволяла вводить информацию, проецируя изображение на поверхность среды, и записывать последующую пространственно-временную эволюцию введенных данных в память компьютера.

Она включала в себя управляемый персональным компьютером видеопроектор SANYO PLC-510M (VGA совместимый, 279 ANSI люмен). Высокая однородность фона этого проектора существенно уменьшала погрешности эксперимента. В то же время управляемый компьютером проектор позволял существенно расширить возможности управления вводимой информацией (менять яркость и контраст изображения, добавлять или удалять некоторые детали вводимой информации).

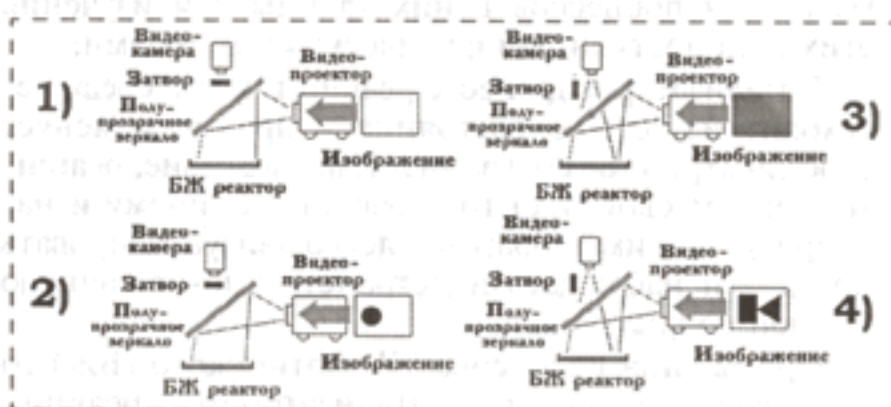


Рис. 3. Принципиальная схема установки для изучения обработки информации реакционно-диффузионными средами:

режим восстановления исходного состояния среды (1); режим ввода информации (2); подсветка изображения (3); управление процессом эволюции изображения в среде (4)

Выбор реакционно-диффузионных сред, оптимальных для решения конкретной задачи

Сложные нелинейные динамические механизмы определяют поведение биологических, биохимических и химических объектов и больших молекул на разных уровнях организации.

Динамические режимы проявляются в процессах роста колоний одноклеточных микроорганизмов, приводя к возникновению концентрических круговых и спиральных образований (например, в случае *DICTYOSTELLUM DISCOIDEUM* [7] и *SALMONELLA TYPHIMURIUM* [8]).

На уровне тканей организма — это волновые процессы, протекающие в коре головного мозга. Нарушение сердечных ритмов и феномен "внезап-

ной смерти" возникают в результате патологических волновых режимов в миокарде [9].

Широко известны режимы концентрационных колебаний в химических и биохимических системах, в биологических мембранах и клетках, т. е. на супрамолекулярном уровне [10].

И, наконец, нелинейная динамика может приводить к коллективным возбуждениям в биомолекулах (солитоноподобным волнам), т. е. на молекулярном уровне [11].

Каждый из этих объектов может быть использован для изучения нелинейных явлений в реакционно-диффузионных системах. Тем не менее, для того чтобы среда могла бы использоваться как составная часть устройства обработки информации, она должна быть доступной, стабильной и удобной в эксплуатации. В наибольшей степени этому условию удовлетворяют химические системы, нелинейная динамика которых определяется реакциями типа Белоусова—Жаботинского.

Реакции типа Белоусова—Жаботинского [5] представляют собой автокаталитическое окисление органического субстрата (главным образом органической кислоты) каким-либо окислителем. Механизм такого процесса сложен и определяется нелинейной кинетикой промежуточных стадий реакции и диффузией.

В то же время эти среды стабильны и не опасны. Более того, температурный диапазон и временные масштабы процессов в них удобны для изучения этих сред доступными физическими методами.

Катализатор в процессе реакции, когда среда переходит из одного состояния в другое, изменяет свое электронное состояние. Как следствие, реагенты меняют свой цвет (от красного к синему и наоборот). Таким образом, легко визуализировать процесс и наблюдать пространственно-временную эволюцию системы.

Среды типа Белоусова—Жаботинского (БЖ) со светочувствительным катализатором реакции [2, 12, 13] существенно расширяют возможности выполнения информационно-логических операций. Отметим несколько фундаментальных особенностей этих сред, важных для обработки информации.

- Под воздействием света катализатор вызывает цепь химических превращений, зависящих от интенсивности излучения, в каждой точке среды. Это позволяет изменять локально (в каждой точке среды) ее состав, проецируя на поверхность среды выбранное изображение, т. е. заданное распределение фрагментов различной яркости. При этом интенсивное излучение в видимой области спектра (белое излучение) ингибирует протекающие в среде процессы и переводит ее в исходное состояние, уничтожая следы предыдущих экспериментов (рис. 3, а).
- Проецирование изображения на слой реакционно-диффузионной среды приводит к возникновению в среде неоднородного пространственного распределения химических компонентов за счет фотохимических реакций, инициируемых ка-

тализатором. Таким образом, катализатор действует как макро-микро-интерфейс, позволяющий вводить в среду информацию (рис. 3, б).

- После ввода информации в среде начинается процесс эволюции распределения продуктов реакции. При этом катализатор реакции может переходить из одного электронного состояния в другое. Этим состоянием отвечает разный цвет участков среды, содержащих катализатор в разных электронных состояниях (красный и синий). В результате процесс эволюции концентрационного распределения визуализируется, что позволяет зарегистрировать его каким-либо фотоприемным устройством. Таким образом, катализатор действует и как микро-макро-интерфейс между химическим процессом на молекулярном уровне и его оптическим (макроскопическим) образом. Имея это в виду, будем в дальнейшем говорить об эволюции в среде введенного изображения.

- Режим процесса эволюции изображения определяется состоянием среды (относительными концентрациями компонентов, температурой и т. д.). Если среда функционирует в осцилляционном режиме, возникает периодический процесс (рис. 4), каждый период которого представляет собой, в общем случае, последовательное чередование:

- появления позитивного изображения;
- выделения его контура и эволюции контура;
- появления негативного изображения.

Таким образом, среда обладает кратковременной памятью. Периодический процесс эволюции изображения повторяется десятки раз (5—10 мин).

В случае черно-белого изображения характер эволюции определяется химическим составом среды (динамическим режимом), видом вводимого изображения (позитивное или негативное) и экспозицией в процессе его ввода. В случае полутонового изображения характер эволюции значительно усложняется и зависит дополнительно от оптического контраста изображения. На рис. 5 показана эволюция как черно-белого, так и полутонового изображений. Подробная информация об этом может быть найдена в [2].

- Процесс эволюции изображения, содержащего фрагменты различной яркости, начинается с временной задержкой, пропорциональной яркости соответствующего фрагмента. Поэтому отдельные фрагменты появляются в ходе эволюции изображения последовательно, начиная с наименее интенсивных (рис. 6). В сущности, светочув-

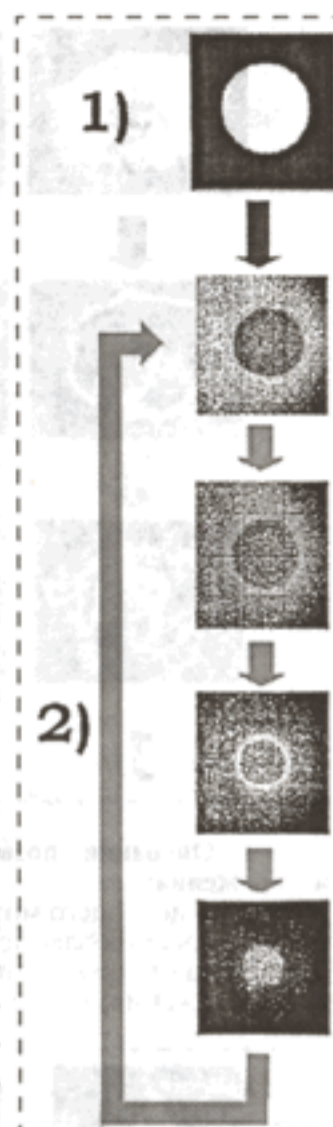


Рис. 4. Исходное изображение, вводимое в среду (1), и типичный процесс его эволюции в среде (2)

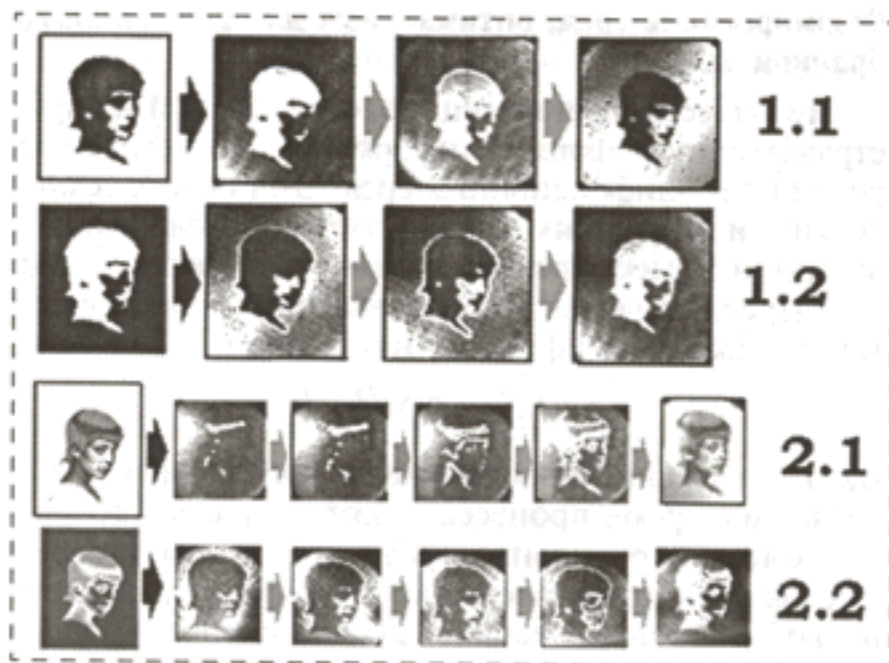


Рис. 5. Процессы эволюции черно-белого позитивного (1.1), черно-белого негативного (1.2), полутонового позитивного (2.1) и полутонового негативного (2.2) изображений в среде типа Белоусова—Жаботинского

ствительная реакционно-диффузионная среда преобразует пространственное распределение фрагментов изображения различной яркости во временной процесс последовательного появления этих фрагментов.

Результаты обработки изображений, сходных с аэрокосмическими снимками, показаны на рис. 7. Нетрудно видеть, что наиболее темные фрагменты выделяются первыми в процессе эволюции изображения в среде. После этого появляются все более и более светлые. Таким образом, использование реакционно-диффузионных сред представляется заманчивой потенциальной возможностью для обработки данных аэрофотосъемки или спутниковой информации.

Этот феномен был использован также при разработке техники поиска кратчайшего пути в лабиринте [14].

В основе ее лежит представление лабиринта в реакционно-диффузионной среде и в памяти компьютера в виде его образа (в простейшем случае — черно-белого изображения, рис. 8). Пусть определена точка входа в лабиринт и существует техника, позволяющая записывать последовательные стадии распространения волны, инициируемой в точке входа, в память компьютера. При распространении волны вдоль любого пути в лабиринте черный цвет лабиринта меняется на цвет фона (белый).

Распространение волны через лабиринт — параллельная операция высокой вычислительной сложности. Реакционно-диффузионная среда может эффективно выполнять подобную операцию и ее последовательные стадии могут быть запомнены в памяти цифровой вычислительной системы.

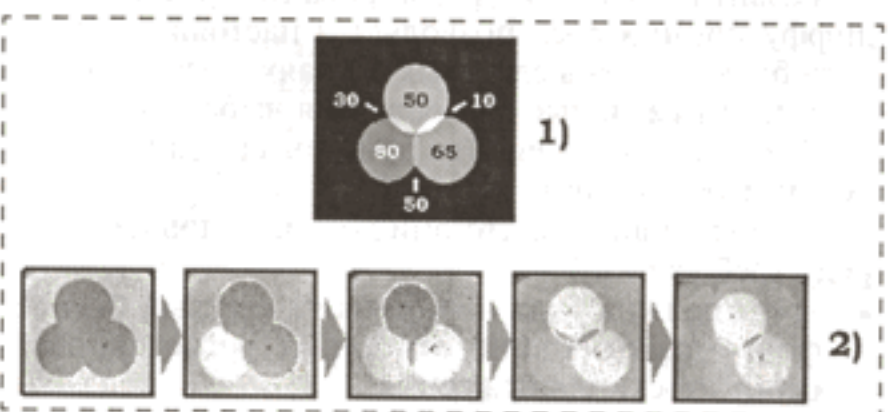


Рис. 6. Исходное изображение, содержащее пять уровней яркости (1), и процесс его эволюции в среде типа Белоусова—Жаботинского (2)

Пусть заданный монотонно спадающий фон наложен на исходное изображение, начиная с точки входа в лабиринт. После проецирования этого комбинированного рисунка в среде появляется негативное изображение. В первый момент появляется изображение исходного лабиринта (черное изображение на белом фоне, рис. 8). После этого вследствие задержки появления изображения для участков различной яркости путь в лабиринте, начиная с точки входа, последовательно изменяет черный цвет на цвет фона, т. е. по лабиринту распространяется волна.

Прохождение волны через лабиринт от начальной точки лабиринта до его конечной точки показано на рис. 8. Так как этот процесс занимает около 3—5 с, то легко записать последовательные стадии прохождения волны видеокamerой и сохранить их в памяти компьютера.

Можно показать, что для нахождения кратчайшего пути в лабиринте между заданными точками входа и выхода может быть предложена процедура низкой вычислительной сложности, реализуемая цифровым компьютером. В основе этой процедуры лежит обработка изображений, описывающих распространение волны по лабиринту, записанных в памяти компьютера.

В процессе прохождения волны через точки ветвления лабиринт разделялся на два (или более) фрагмента (рис. 8). Один из них связан с выходом из лабиринта, тогда как другой не связан. Легко определить фрагмент, связанный с конечной точкой лабиринта, если инициировать обратную волну из выхода лабиринта. В результате фрагменты, связанные с выходом, меняют свой цвет (черный на цвет фона), в то время как цвет не связанных с выходом фрагментов остается неизменным. Вычитание изображения, полученного после этой операции, из начального изображения лабиринта позволяет удалить фрагмент, не связанный с выходом.

Последовательное повторение этой процедуры при каждом прохождении точки ветвления дает возможность исключить все тупиковые ветви (и пути к другим возможным конечным точкам) и определить путь от входа в лабиринт до выбранной конечной точки.

Детальное описание разработанной методики см. в [14].

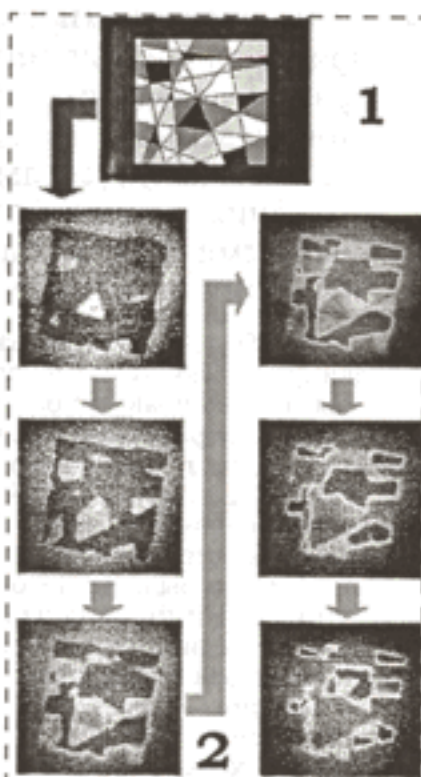


Рис. 7. Обработка модельного изображения аэрофотоснимка (1) реакционно-диффузионной средой типа Белоусова—Жаботинского (2)



Рис. 8. Определение кратчайшего пути в лабиринте: исходное изображение лабиринта (L0); процесс распространения волны в лабиринте (L1, L2, L3, L4); путь волны до первого разветвления (L0-1); стадия L1 после прохождения волны, инициированной в точке выхода из лабиринта (L1-1); фрагмент L1 после вычитания L1-1; кратчайший путь от входа до выхода из лабиринта

- ◆ Ингибирование (или же замедление) химических процессов в среде интенсивным световым излучением позволяет управлять процессом эволюции введенного изображения. Освещая определенные участки среды в процессе эволюции изображения, можно ограничить этот процесс выбранными фрагментами, исключая из процесса эволюции остальные.

В 1996 г. К. Иошикава с группой сотрудников [15] выдвинули идею "химического диода", в котором осуществляется однонаправленное прохождение концентрационной волны, генерируемой в реакции Белоусова—Жаботинского. Устройство представляло собой тонкую, неактивную для реакции Белоусова—Жаботинского перемычку между линейной с одной стороны (Р-сторона) и сходящейся к перемычке (С-сторона) границами (рис. 9). Экспериментально эта система была реализована как совокупность двух квадратных пластин, одна из которых своей вершиной направлена к середине стороны другой пластины. Пластины (микропористое стекло) были пропитаны раствором катализатора реакции — ферроином и помещены в раствор остальных компонентов реакции. Поэтому реакция могла идти только на поверхности пластин. В работе [15] было показано, что прохождение концентрационной волны в направлении $P \rightarrow C$ и $C \rightarrow P$ неадекватно.

При некоторой ширине перемычки волна проходит в сторону $P \rightarrow C$ и не проходит в сторону $C \rightarrow P$.

К. Иошикава с сотрудниками с помощью численного моделирования системы показали, что на основе элементарных химических диодов могут быть построены разнообразные логические схемы [16].

Существенным недостатком использованного в [15] экспериментального устройства была большая трудоемкость его изготовления и не очень высокая надежность.

Нами была предложена простая схема эксперимента, позволяющая легко формировать как геометрически произвольную структуру диода, так и разнообразные устройства на его основе.

Была использована реакционно-диффузионная среда со светочувствительным катализатором, разработанная для изучения операций обработки изображений (см. ниже). В среде возбуждалась концентрационная волна и на протяжении всего времени ее прохождения через устройство структура изображения формировалась интенсивным световым излучением, проецируемым на поверхность среды. Основные варианты прохождения волны показаны на рис. 9.

Нужно отметить, что при исключительной простоте разработанная техника позволяет оперативно и с высокой точностью менять геометрические параметры диода и организовывать их различные комбинации.

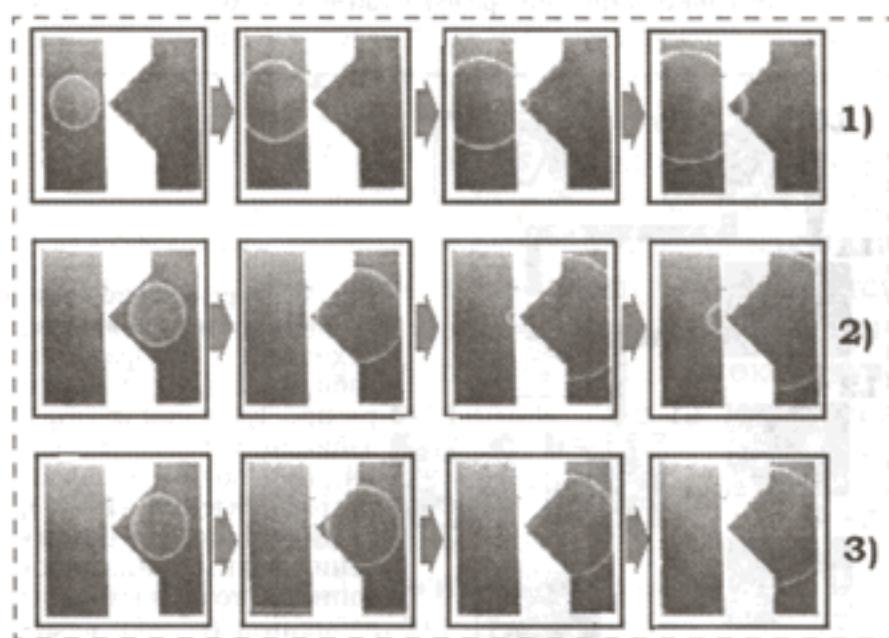


Рис. 9. Прохождение концентрационной волны в химическом диоде: волна проходит в направлении $P \rightarrow C$ (1); волна проходит в направлении $C \rightarrow P$ (2); волна не проходит в направлении $C \rightarrow P$ (3)

Формирование сред, оптимальных для решения выбранной задачи

Не существует, в принципе, ограничений на пространственную форму информационно-логических реакционно-диффузионных сред. Они скорее технические и определяются объемом обрабатываемых данных и трудоемкостью ввода-вывода информации.

Разрешающая способность среды определяется так называемой диффузионной длиной [2]

$$l_D = (D\tau)^{1/2},$$

где D — средний коэффициент диффузии; τ — характерное время процесса, протекающего в среде.

Поэтому трехмерная среда представляет собой как бы трехмерную решетку с шагом $\sim l_D$, способную обрабатывать очень большие объемы информации. Однако трудности ввода данных и вывода конечных результатов настолько велики, что в литературе известны лишь отдельные робкие попытки использования трехмерных сред.

В основном решения различных задач основаны на квазиплоских средах, т. е. плоских пространственных объектах, толщина которых (0,5—1,5 мм) существенно меньше длины и ширины (несколько сантиметров).

Простейший вариант распределенной информационно-логической среды представляет собой слой жидкого реагента, помещенный в реактор с плоским дном (рис. 10). Недостатком этого варианта является то, что картина эволюции введенного в среду изображения подвержена искажениям за счет случайных толчков, вибраций и т. д. Кроме того, неточное горизонтирование реактора приводит к систематическому изменению толщины слоя вдоль некоторого направления среды. Это, в свою очередь, вызывает побочные динамические эффекты, искажающие изображение.

С начала 90-х годов для формирования реакционно-диффузионных сред широко используются полимерные материалы. Плоский слой полимера, не взаимодействующего с компонентами реакционно-диффузионной среды, содержит 80—90 % воды, связанной в структуре полимера. Эта вода может быть легко заменена на реагент реакционно-диффузионной среды (рис. 10). В результате, система "полимер—среда" оказывается практически нечувствительной к механическим возмущениям и наклонам реактора.

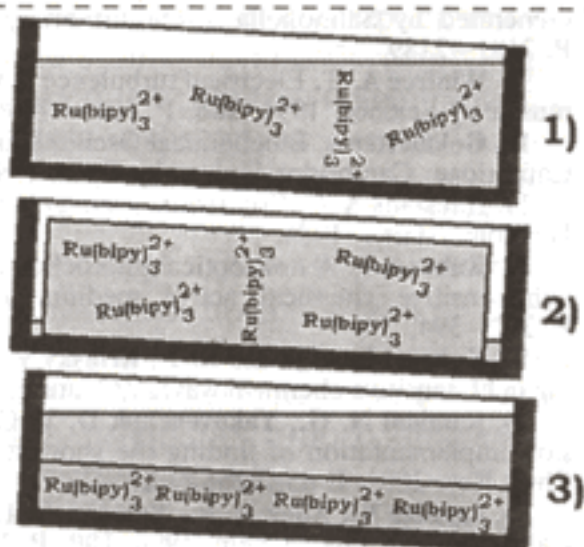
Развитие техники формирования реакционно-диффузионных сред позволяет в настоящее время, хотя бы в не очень сложных случаях, разрабатывать среды, оптимальные для решения выбранной задачи. Рассмотрим в качестве примера среды для обработки изображений.

Нетрудно видеть, что они должны удовлетворять ряду требований:

- среда должна быть наложена на светлый (белый) фон, позволяющий отчетливо регистрировать особенности изображения;
- толщина среды должна быть минимальной для того, чтобы избежать размытия изображения в среде;

Рис. 10. Различные варианты формирования реакционно-диффузионных сред:

1) жидкий реагент в реакторе (1); жидкий реагент в плоском слое полимерного материала (2); катализатор реакции иммобилизован в тонком слое твердого носителя (3)



- оптическая плотность изображения должна быть достаточной для надежной регистрации его фотоприемным устройством.

Эти требования были учтены при формировании среды, использованной для изучения операций обработки изображений и решения сходных задач.

Катализатор реакции был иммобилизован на тонком (0,2 мм) слое силикагеля, нанесенного на тонкую металлическую подложку (пластины SILUFOL UV254 для тонкослойной жидкостной хроматографии). Остальные компоненты среды находились в растворе над слоем катализатора. Белый слой силикагеля служил фоном для регистрации изображения.

Иммобилизация катализатора предотвращала искажения изображения за счет механических возмущений.

Сам химический процесс, отвечающий эволюции изображения, протекал в тонком приповерхностном слое пленки силикагеля, что предотвращало размытие изображения в реакционном слое.

Для изучения операций обработки изображений использовался светочувствительный катализатор на основе рутения. Оптическая плотность изображения в этом случае существенно меньше, чем в случае ферроина — общепринятого катализатора реакции Белоусова—Жаботинского, который не светочувствителен. Поэтому после иммобилизации светочувствительного катализатора в слой силикагеля дополнительно вводилось некоторое количество ферроина. Это позволило значительно увеличить оптическую плотность изображения, сохранив при этом оптический ввод информации.

Рассмотренный пример является, по-видимому, одним из первых случаев формирования простейшей двухуровневой среды, в которой разделены катализатор и остальные химические компоненты реакционно-диффузионной среды.

Перспективы создания устройств, эффективно решающих задачи высокой вычислительной сложности

Выполненные в последние годы исследования показали возможность эффективного решения некоторых задач высокой вычислительной сложности с использованием распределенных химических реакционно-диффузионных сред. Естественно, хотелось

бы оценить и возможные перспективы дальнейшего развития этого направления. Для этого рассмотрим, хотя бы кратко, основные информационные характеристики реакционно-диффузионных сред.

В отличие от фон-Неймановского компьютера реакционно-диффузионные среды не являются программируемыми извне. Их динамика, задающая решение конкретной выбранной проблемы, определяется состоянием (и структурой) среды и воздействиями управляющих факторов.

Даже простейшие устройства на их основе демонстрируют очень высокую степень параллелизма, смешанную непрерывно-дискретную динамику и вертикальные потоки передачи и обработки информации [17]. Даже в простейшей системе можно выделить:

- уровень макро-микро-преобразования информации, т. е. уровень ввода исходных данных;
- динамику на молекулярном (микро) уровне, реализующую способ обработки информации;
- уровень микро-макро-преобразования информации, т. е. физико-химическое считывание результатов решения задачи.

Степень самоорганизации химических реакционно-диффузионных устройств велика. Более того, в них проявляется градуализм, т. е. малые изменения состояния среды (концентраций ее компонентов и температуры) приводят в определенной области состояний только к сравнительно небольшим количественным, а не к резким качественным изменениям динамических режимов. Эта особенность, как известно, лежит в основе построения систем с обучением.

Таким образом, реакционно-диффузионные среды обладают практически всеми характеристиками, необходимыми для того, чтобы на их базе создавать устройства, обладающие высокой поведенческой сложностью, способные к обучению и к решению задач высокой вычислительной сложности.

В общем, сравнение информационных характеристик фон-Неймановского компьютера, мозга и реакционно-диффузионного устройства [18] приводит к выводу о том, что по своим информационным характеристикам реакционно-диффузионные устройства существенно ближе к мозгу, чем к цифровому устройству (даже если цифровое устройство реализовано на уровне многопроцессорной параллельной системы).

Мозг по своим информационным характеристикам неизмеримо богаче, чем любое рукотворное устройство. Полнота решения им интеллектуальных проблем (проблем высокой вычислительной сложности) поразительна. Тем не менее, удивительное сходство информационных характеристик распределенных систем, функционирующих на основе нелинейных динамических механизмов, позволяет надеяться на то, что могут быть созданы устройства, имитирующие функции мозга (пусть даже в каких-то ограниченных областях его интеллектуальной активности) и способные эффективно решать задачи высокой вычислительной сложности. Они не будут конкурировать с современными (и будущими) цифровыми ЭВМ. Скорее они будут дополнять их, мно-

гократно расширяя возможности "индустрии обработки информации".

Список литературы

1. McCulloch W. J., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. 5. P. 115—133.
2. Рамбиди Н. Г. Перспективы развития нейросетевых парадигм на основе молекулярных сред // Микросистемная техника. 2002. № 3. С. 31—33.
3. Рамбиди Н. Г., Гребенников Е. П., Адамацкий А. И., Девятков А. Г., Яковенчук Д. В. Биомолекулярные нейросетевые устройства // ИПЖР. 2002.
4. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическая биофизика. М.: Наука, 1984.
5. Филд Р., Бургер М. Колебания и бегущие волны в химических системах. М.: Мир, 1988.
6. Rambidi N. G., Maximychev A. V. Towards a biomolecular computer. Information processing capabilities of biomolecular nonlinear dynamic media // BioSystems. 1997. 41. P. 195—211.
7. Newell P. C. Aggregation and Cell Surface Receptors in cellular Slime Molds in Microbial Interaction // Receptors and Recognition, Series B / J. L. Reissig (Ed.), Chapman and Hall, 1977.
8. Woodward D. E., Tyson R., Myerscough M. R., Murry J. D., Budrene E. O. and Berg H. C. Spatio-Temporal Patterns

Generated by Salmonella Typhimurium // Biophys. J. 1995. 68. P. 2181—2189.

9. Winfree A. T. Electrical turbulence in three-dimensional heart muscle // Science. 1994. 266. P. 1003—1006.
10. Goldbeter A. Biochemical Oscillations and Cellular Rhythms. Cambridge: Cambridge University Press. 1997.
11. Давыдов А. С. Солитоны в молекулярных системах, Киев: Наукова Думка. 1984.
12. Kuhnert L. A new optical photochemical memory device in a light-sensitive chemical active medium // Nature. 1986. 319. P. 393—394.
13. Kuhnert L., Agladze K. I., Krinsky V. I. Image processing using light-sensitive chemical waves // Nature. 1989. 337. P. 244—247.
14. Rambidi N. G., Yakovenchuk D. V. Chemical reaction-diffusion implementation of finding the shortest paths in a labyrinth // Phys. Rev. 2001. E 63, 0266X. X.
15. Agladze K., Aliev R. R., Yamaguchi T., Yoshikawa K. Chemical diode // J. Phys. Chem. 1996. 100. P. 13895—13897.
16. Yoshikawa K., Motoike I., Kajiya K. Design of an excitable field towards a novel parallel computation // IEICE Transactions on Electronics. 1997. E80-C. P. 931—934.
17. Conrad M. The brain-machine disanalogy // BioSystems. 1989. 22. P. 197—213.
18. Rambidi N. G. Biomolecular computing: from the brain-machine disanalogy to the brain-machine analogy // BioSystems. 1994. 33. P. 45—54.

РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—12, 2001 г., № 1—7, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Светодинамические процессы в оптических системах со случайными неоднородностями

Номер проекта: 97-02-17189-а

Год предоставления отчета: 1997

С использованием специально разработанной методики осуществлен многопараметрический анализ амплитудно-фазовых характеристик когерентного излучения в условиях структурной перемежаемости. Экспериментально исследованы процессы спорадического формирования стеклоподобных полей в конфокальных резонаторах лазеров и при распространении световых пучков в случайно-неоднородных турбулентных средах. Установлено, что причиной структурной перемежаемости излучения лазера с конфокальным резонатором является неустойчивость процессов конкурентного подавления и пространственной синхронизации различных типов поперечных мод. Показано, что в результате пространственной синхронизации мод внутрирезонаторные поля обладают признаками оптических сингулярных кристаллов. В ходе экспериментов на атмосферных оптических трассах установлено, что возникающая при определенных условиях структурная перемежаемость излучения является следствием спорадических изменений среднего масштаба турбулентных образований в результате развития конвективных и гидродинамических неустойчивостей в приземном слое воздуха. Наиболее отчетливо структурная перемежаемость наблюдается, если изменения среднего масштаба турбулентности происходят вблизи размера первой зоны Френеля атмосферной трассы.

Полученные результаты заметным образом расширяют существующие в оптике лазеров и в атмосферной оптике представления о быстропротекающих процессах, сопровождающихся качественными изменениями в структуре световых пучков.

Электромиграция протяженных дефектов в металлических микро- и наноструктурах

Номер проекта: 97-02-16753-а

Год предоставления отчета: 1997

Разработана методика изготовления микро- и наноструктур на мембранах из нитрида кремния, пригодных для исследования в просвечивающем электронном микроскопе. Разработана тестовая структура для исследования in situ в просвечивающем электронном микроскопе электромиграции протяженных дефектов. Изготовлены микро- и наноструктуры из алюминия и меди с шириной проводящей дорожки 0,5 и 0,12 мкм. Разработан и изготовлен держатель образцов для пропускания электрического тока через микро- и наноструктуры в колонне просвечивающего электронного микроскопа. Разработана и изготовлена схема нагружения микро- и наноструктур электрическим током, препятствующая их перегоранию при включении в электрическую цепь вследствие неконтролируемых импульсов тока. Исследована микроструктура пленок алюминия и меди, полученных методом частично ионизированного потока с высокой степенью ионизации. Проведены электромиграционные эксперименты на медных микро- и наноструктурах.

гократно расширяя возможности "индустрии обработки информации".

Список литературы

1. McCulloch W. J., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. 5. P. 115—133.
2. Рамбиди Н. Г. Перспективы развития нейросетевых парадигм на основе молекулярных сред // Микросистемная техника. 2002. № 3. С. 31—33.
3. Рамбиди Н. Г., Гребенников Е. П., Адамацкий А. И., Девятков А. Г., Яковенчук Д. В. Биомолекулярные нейросетевые устройства // ИПЖР. 2002.
4. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическая биофизика. М.: Наука, 1984.
5. Филд Р., Бургер М. Колебания и бегущие волны в химических системах. М.: Мир, 1988.
6. Rambidi N. G., Maximychev A. V. Towards a biomolecular computer. Information processing capabilities of biomolecular nonlinear dynamic media // BioSystems. 1997. 41. P. 195—211.
7. Newell P. C. Aggregation and Cell Surface Receptors in cellular Slime Molds in Microbial Interaction // Receptors and Recognition, Series B / J. L. Reissig (Ed.), Chapman and Hall, 1977.
8. Woodward D. E., Tyson R., Myerscough M. R., Murry J. D., Budrene E. O. and Berg H. C. Spatio-Temporal Patterns

Generated by Salmonella Typhimurium // Biophys. J. 1995. 68. P. 2181—2189.

9. Winfree A. T. Electrical turbulence in three-dimensional heart muscle // Science. 1994. 266. P. 1003—1006.
10. Goldbeter A. Biochemical Oscillations and Cellular Rhythms. Cambridge: Cambridge University Press. 1997.
11. Давыдов А. С. Солитоны в молекулярных системах, Киев: Наукова Думка. 1984.
12. Kuhnert L. A new optical photochemical memory device in a light-sensitive chemical active medium // Nature. 1986. 319. P. 393—394.
13. Kuhnert L., Agladze K. I., Krinsky V. I. Image processing using light-sensitive chemical waves // Nature. 1989. 337. P. 244—247.
14. Rambidi N. G., Yakovenchuk D. V. Chemical reaction-diffusion implementation of finding the shortest paths in a labyrinth // Phys. Rev. 2001. E 63, 0266X. X.
15. Agladze K., Aliev R. R., Yamaguchi T., Yoshikawa K. Chemical diode // J. Phys. Chem. 1996. 100. P. 13895—13897.
16. Yoshikawa K., Motoike I., Kajiya K. Design of an excitable field towards a novel parallel computation // IEICE Transactions on Electronics. 1997. E80-C. P. 931—934.
17. Conrad M. The brain-machine disanalogy // BioSystems. 1989. 22. P. 197—213.
18. Rambidi N. G. Biomolecular computing: from the brain-machine disanalogy to the brain-machine analogy // BioSystems. 1994. 33. P. 45—54.

РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—12, 2001 г., № 1—7, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Светодинамические процессы в оптических системах со случайными неоднородностями

Номер проекта: 97-02-17189-а

Год предоставления отчета: 1997

С использованием специально разработанной методики осуществлен многопараметрический анализ амплитудно-фазовых характеристик когерентного излучения в условиях структурной перемежаемости. Экспериментально исследованы процессы спорадического формирования стеклоподобных полей в конфокальных резонаторах лазеров и при распространении световых пучков в случайно-неоднородных турбулентных средах. Установлено, что причиной структурной перемежаемости излучения лазера с конфокальным резонатором является неустойчивость процессов конкурентного подавления и пространственной синхронизации различных типов поперечных мод. Показано, что в результате пространственной синхронизации мод внутрирезонаторные поля обладают признаками оптических сингулярных кристаллов. В ходе экспериментов на атмосферных оптических трассах установлено, что возникающая при определенных условиях структурная перемежаемость излучения является следствием спорадических изменений среднего масштаба турбулентных образований в результате развития конвективных и гидродинамических неустойчивостей в приземном слое воздуха. Наиболее отчетливо структурная перемежаемость наблюдается, если изменения среднего масштаба турбулентности происходят вблизи размера первой зоны Френеля атмосферной трассы.

Полученные результаты заметным образом расширяют существующие в оптике лазеров и в атмосферной оптике представления о быстропротекающих процессах, сопровождающихся качественными изменениями в структуре световых пучков.

Электромиграция протяженных дефектов в металлических микро- и наноструктурах

Номер проекта: 97-02-16753-а

Год предоставления отчета: 1997

Разработана методика изготовления микро- и наноструктур на мембранах из нитрида кремния, пригодных для исследования в просвечивающем электронном микроскопе. Разработана тестовая структура для исследования in situ в просвечивающем электронном микроскопе электромиграции протяженных дефектов. Изготовлены микро- и наноструктуры из алюминия и меди с шириной проводящей дорожки 0,5 и 0,12 мкм. Разработан и изготовлен держатель образцов для пропускания электрического тока через микро- и наноструктуры в колонне просвечивающего электронного микроскопа. Разработана и изготовлена схема нагружения микро- и наноструктур электрическим током, препятствующая их перегоранию при включении в электрическую цепь вследствие неконтролируемых импульсов тока. Исследована микроструктура пленок алюминия и меди, полученных методом частично ионизированного потока с высокой степенью ионизации. Проведены электромиграционные эксперименты на медных микро- и наноструктурах.

ИНФОРМАЦИЯ

ОБЪЕДИНЕННОЕ ЗАСЕДАНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ КОМИССИЙ

28 и 29 мая 2002 года было проведено Объединенное заседание Учебно-методических комиссий по специальностям: 200100 "Микроэлектроника и твердотельная электроника", 201900 "Микросистемная техника", 014100 "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы".

С вступительным словом выступил ректор Московского государственного института электронной техники (технического университета) Ю. А. Чаплыгин. На заседании были прочитаны следующие доклады.

Доклад профессора Ю. М. Таирова "О заседании совета УМО в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации, состоявшемся 16.05.2002 г. в ЛЭТИ".

Доклад профессора Ю. А. Чаплыгина "МИЭТ — учебно-научный инновационный комплекс".

Доклад профессора А. Н. Саурова ГНЦ РФ "Технологический центр МИЭТ — база для подготовки специалистов по микроэлектронике и микросистемной технике".

Доклад профессора В. С. Сорокина, А. И. Машина, доцента А. В. Корлякова "О методическом обеспечении образовательных программ по специальностям 200100, 201900 и 014100 и порядке взаимодействия вузов по приобретению новой учебной литературы".

Доклад профессора В. С. Сорокина "О примерных программах итоговых государственных экзаменов и требованиях к выпускным квалификационным работам по направлениям и специальностям высшего профессионального образования".

Доклад председателя Федерального Фонда развития электронной техники РФ (ФФРТЭ) А. И. Сухопарова "Политика Российской Федерации в области развития отечественной электронной компонентной базы".

Сообщения профессора П. П. Мальцева (МИРЭА), Б. Г. Коноплева (ПТРУ), Ю. А. Коркишко, М. А. Королева, М. А. Ревелевой, доцента Т. Ю. Крупкиной (все МИЭТ), профессора В. В. Лучинина, доцента А. В. Корлякова (ГЭТУ) "Об организации и содержании новых лабораторных практикумов и курсового проектирования по дисциплинам специальностей 200100, 201900 и 014100".

Сообщения Б. Н. Рыгалина, М. А. Королева, В. В. Лучинина "О роли федеральных, отраслевых, научно-технических программ и грантов в повышении качества подготовки специалистов в области электроники и микроэлектроники".

Участники заседания посетили кафедры и лаборатории МИЭТ, НПК ТЦ, завод "Протон" и Инновационный технологический центр.

IV Международная научно-техническая конференция "Электроника и информатика—2002"

Министерство образования Российской Федерации
Московский государственный институт электронной техники (МИЭТ)
Физико-технологический институт Российской Академии наук
РАО "Российская электроника"
Концерн "Научный центр"

В Московском государственном институте электронной техники (техническом университете) 20—22 ноября 2002 года проводится IV Международная научно-техническая конференция "Электроника и информатика—2002". Приглашаем вас принять участие в работе конференции.

Научные направления работы конференции (по секциям)

1. Физика и технология микро- и наноэлектроники.
2. Материалы и оборудование электронной техники.
3. Проектирование электронных компонентов и систем.
4. Микросистемы и микромеханика.
5. Информационные и управляющие системы.
6. Телекоммуникационные системы и связь.
7. Биомедицинская электроника.
8. Экологические аспекты микро- и наноэлектроники.
9. Менеджмент и маркетинг в электронике и информатике.

В работе конференции предполагается участие ведущих российских и зарубежных ученых, которые выступят с заказными пленарными докладами по основным направлениям работы конференции.

Представление докладов

Для участия в работе конференции следует направить в Оргкомитет до 10 сентября 2002 года следующие материалы:

- тезисы доклада (2 экз. распечатанного текста и дискета 3,5" с файлом);
 - акт экспертизы (экспертное заключение);
 - сведения об авторах в 1 экз. (с указанием вначале названия доклада, фамилии докладчика и номера секции из приведенного выше перечня):
 - полное название организации (в скобках — краткос);
 - ФИО автора(ов) полностью с указанием должности, ученой степени и звания;
 - почтовый адрес, адрес электронной почты, номер факса — для связи.
- В случае включения доклада в программу конференции извещение будет отправлено докладчику до 1 октября 2002 года по электронной почте или по факсу.

Тезисы докладов будут опубликованы в сборнике (при условии своевременной оплаты) и представлены участникам к началу работы конференции.

Публикация тезисов докладов платная (орг. взнос). За каждый доклад не позднее 10 октября 2002 г. перечисляется сумма в размере 300 руб. по банковским реквизитам, которые будут указаны во втором извещении.

По согласованию с Оргкомитетом возможна оплата наличными во время работы конференции.

Участники конференции проезд, проживание и питание оплачивают самостоятельно.

Возможно, по согласованию, бронирование мест в гостинице МИЭТ.

После окончания работы конференции рассылкой сборника тезисов Оргкомитет не занимается.

Адрес Оргкомитета:

124498, Москва, К-498, Московский государственный институт электронной техники (МИЭТ), ОНТИ, на конференцию "ЭлИнф—2002".

Телефон: (095) 532-98-30

Факс: (095) 530-54-29

e-mail: id@rmd.miec.ru

Ответственный секретарь

Харач Валентина Павловна.

Проезд: от ст. метро "Речной вокзал" авт. 400 до Зеленограда (ост. Кинотеатр "Электрон"), далее авт. 3, 8, 11 до ост. МИЭТ или с Ленинградского вокзала электричкой до станции Крюково, далее авт. 2, 3, 9, 11 до ост. МИЭТ.

ELECTRONTECH-EXPO

Специализированная выставка технологического оборудования и материалов для производства изделий электронной и электротехнической промышленности.

8–10 октября 2002 года

Организатор специализированных промышленных выставок ЗАО "Примэкспо", совместно с международной выставочной компанией ПЕ, имеют честь пригласить Вас принять участие в международной выставке.

Основные разделы выставки

- Оборудование для производства электронных и электромеханических компонентов, печатных плат и кабельно-проводниковой продукции
- Оборудование и арматура для монтажа
- Паяльное и сварочное оборудование
- Инструмент для электромонтажных работ
- Кабельные аксессуары

- Измерительные приборы и тестовое оборудование
- Анализаторы производственных дефектов и средства контроля качества
- Системы электропитания
- Промышленная мебель и оборудование рабочих мест
- Материалы для производства компонентов, печатных плат и кабельно-проводниковой продукции
- Промышленные системы управления

В наступившем веке, производство компонентов электронной техники является одним из ключевых аспектов развития страны. Мы предоставляем участникам выставки уникальную возможность продемонстрировать свою продукцию специалистам из всех регионов России и стран СНГ, заинтересованным в техническом оснащении своих производств. Приглашения на выставку распространяются по специализированной базе данных, включающей более 80 тысяч адресов. Деловая программа выставки предусматривает широкий круг семинаров и конференций.

Рекламная поддержка выставки осуществляется специализированными и общественно-политическими изданиями.

CONTENTS

Gornev E. S., Zajtsev N. A., Ravirov M. F., Romanov I. M., Ronchin S. O. *Survey of Microgyroscopes Formed by the Technology of the Surface or Volume Micromechanics* 2

The survey of the orientation systems in space on the base of micromechanics elements (microgyroscopes) formed by the technology of the surface or volume micromechanics is given.

Maltsev P. P. *Perspectives Elaboration of Microsystems Engineering in Russian* 7

Perspectives elaboration new elements of microsystems technology use, which is the most rapid developed global scientific-technical direction are considered.

Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Kravchuk L. N., Solovtsov V. N. *Microsensory Control of Miniature Robots* . . . 11

The study results are delivered for the control robot motion inside of the small diameter tubes. The control is forming on the base of feedback information from on board robot microsensors. The experiments were produced with various drive systems of miniature robots with wheel platform. With electromagnet push-pull drivers and with the system including two miniature electro motors, connected with the body by means of the flexible threads. Microsensors are intended for the measure of the velocity, force, pressure, temperature and distance. The micro TV cameras are used for the receiving of diagnostic information about the state of the internal surfaces of the tubes.

The control schemes were experimentally checked.

Muhortov Vl. M., Muhortov Vas. M., Sledkov V. A. *High Temperature Superconductivity for Wireless Communication Applications. Part I* 20

High temperature superconductivity (HTS) has now been in use for over 14 years. This article reviews the development of very small HTS resonators and passive RF filters that have been achieved over

the past seven years. It is now likely that this utilization will lead to the first significant commercialization of HTS products for wireless communications.

Chuvil'deev V. N., Nokhrin A. V., Makarov I. M., Kopylov V. I. *Recrystallization Process at Nano- and Microcrystalline Metals, Prepared by Equal Chanel Angular Pressing* 25

At present work the results of experimental researches of recrystallization process in nano- and microcrystalline (NMC) copper and nickel, obtained by equal-channell angular pressing (ECAP) are performed. In the work average grain size dependences on temperature and isothermal annealing time, heating rate and strain are presented. In the work the recrystallization temperature dependences on annealing time, heating rate and quantity of ECAP-pass are presented.

According to our investigations the grain growth has abnormal character near recrystallization temperature: individual grains increase essentially when NMC matrix is sufficiently stable. It is shown under these conditions the grain size distribution function becomes bimodal and average grain size depends on time by exponential law.

Rambidi N. G. *Distributed Reaction-Diffusion Media: Designing Technique and Computational Promises* 32

Principles of designing reaction-diffusion media capable to perform information processing operations of high computational complexity are discussed.

Distributed character of chemical reaction-diffusion media and nonlinear dynamic mechanisms inherent in them are in the basis of high parallelism and complex logical operations performed by these media as primitives. Light-sensitive catalytic reactions widely used now increase greatly operational capabilities of these media.

Technique for forming information processing media optimum for solving chosen problem is considered.

Подписку за рубежом принимают:

For foreign subscribers:

ЗАО МК-Периодика. E-mail: info@periodicals.ru;
ЗАО "КОН-Лига Пресс". E-mail: export@kone-liga.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.