

Читателю о журнале

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

Микросистемная техника (MST) реализует на микроуровне и обеспечивает функционирование не только в условиях стационарного твердого тела, но и в условиях, когда объект (часть объекта) микросистемной техники или контактирующая с ним среда находятся во взаимной пространственно-временной динамике. Особенностью MST является привнесение современной технологии массового производства, свойственной микроэлектронике, в производство традиционных устройств и механизмов повышенной сложности, характерной для радиотехники, оптики, машиностроения, приборостроения и биомедицины. Это сочетание позволяет изготавливать уникальные многофункциональные устройства с микронными размерами и низкой стоимостью. **Развитие микросистемной техники для научно-технического прогресса может иметь такие же последствия, какие оказало появление микроэлектроники на становление и современное состояние ведущих областей науки и техники.**

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

В 2001 году статьи будут систематизированы по основным проблемам микросистемной техники и опубликованы по следующим направлениям в виде следующих рубрик:

Информационные технологии, конструирование и моделирование объектов MST (САПР объектов

MST, моделирование объектов MST и их производства с учетом эффекта масштабирования).

Материаловедческие и технологические основы MST (традиционные и перспективные материалы для объектов MST: материалы поверхностной и объемной микромеханики, адаптивные ("умные") материалы; специальные технологии MST: LIGA-технология, корпускулярно-лучевое микроформообразование, волоконная технология, нанотехнология, молекулярная электроника).

Элементная база MST (сенсоры и трансдьюсеры – физических величин, химических элементов, биологических материалов; исполнительные устройства-микромеханизмы, микроинструмент; источники энергии и движения – микродвигатели, микротурбины; авиа- и автоэлектронные компоненты).

Типы микросистем (микроэлектромеханические, микрооптомеханические и биотехнические микросистемы; биочипы; микросистемы энергобеспечения; технологические микросистемы; мини- и микrorобототехнические системы).

Применение объектов MST (конструирование приборов и машин – макросистем на основе элементной базы MST; сборка макросистем на основе элементной базы MST; испытания, сертификация и эксплуатация макросистем, созданных на основе MST).

Информация (конференции, совещания, выставки, новости науки и техники, обзоры специальной литературы и т.п.).

Аннотации статей журнала на русском и английском языках доступны по сети Internet по адресу: <http://www.microsystems.ru>.

Журнал распространяется только по подписке.

Оформить подписку можно в отделениях связи (индекс по каталогу Роспечати 79493) или непосредственно в редакции (107076, Москва, Строгинский пер., 4; тел./факс 269-55-10).

УДК 621.38, 539.2

Ю.Г. Кригер, д-р физ.-мат. наук,
И.К. Игуменов, д-р хим. наук,
 Институт неорганической химии
 СО РАН, г. Новосибирск

ПЕРСПЕКТИВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрены перспективы молекулярной технологии. Наиболее эффективные результаты от развития молекулярной электроники следует ожидать в областях, связанных с использованием функциональных специфических свойств молекулярных систем.

Общий анализ тенденций развития микроэлектроники свидетельствует, что полупроводниковая технология с характерными размерами элементов порядка микрометра фактически "выработала свои ресурсы" и необходим переход к меньшим масштабам. В настоящее время основной интерес ученых сконцентрирован на проблемах физики наноструктур и технологии создания квантовых приборов на их основе.

Разрабатываются технологии создания квантовых ям, проволок и точек с характерным размером – десятки нанометров. Основная тенденция, которая отчетливо проявилась в последние годы, – это использование явления самосборки для создания наноразмерных квантовых структур (термин "*самосборка*" ранее использовался только для молекулярных систем). Препятствием на пути широкого применения приборов, основанных на одноэлектронных явлениях, остается сверхнизкая рабочая температура ~ 100 мК даже при рекордно малых размерах приборов. В то же время теоретически рабочая температура может быть нормальной при размерах приборов ~ 1 нм, т.е. при размерах средней молекулы.

В некоторых группах за рубежом в течение последних лет неоднократно наблюдался эффект одноэлектронного коррелированного туннелирования при нормальной температуре. Туннельные системы формировались либо из неупорядоченных наногранул металла, либо из хаотически разбросанных слабо закрепленных молекул, что приводило к невоспроизводимости характеристик и к неустранимой неопределенности в трактовке результатов.

Проблема закрепления молекул на подложке для получения воспроизводимых результатов оказалась чрезвычайно актуальной. Результаты исследований снимают последние сомнения в том, что построение молекулярных электронных систем, устройств на основе одноэлектронники – это вполне достижимая реальность. Авторы получили патентный приоритет на разработанные молекулярные туннельные одноэлектронные приборы и способы их создания. Проведен цикл экспериментальных исследований, в результате которых впервые реализован молекулярный одноэлектронный транзистор, работающий при нормальной температуре.

Резюмируя приведенную выше информацию, можно сделать следующие основные выводы:

- в настоящее время имевшиеся в научной литературе рассуждения об использовании одиночных молекул в качестве ключевых элементов получили свое экспериментальное подтверждение;

- однако и сейчас, и в ближайшее время трудно представить использование одиночных молекул в качестве элемента электронного устройства, но можно говорить об использовании специфических внутримолекулярных (квантовых) эффектов, имеющих макроскопическое проявление;

- по мнению многих экспертов, в том числе и зарубежных, наноэлектроника в ближайшее десятилетие не выйдет на создание чипов с многомиллионным числом элементов, а в лучшем случае ограничится выпуском одиночных устройств с уникальными параметрами. Подобная ситуация уже сложилась с производством диодов Гана и СКВИД-элементов (криогенная электроника), на которые возлагались очень большие надежды при создании компьютеров нового поколения.

По нашему мнению, в настоящее время может идти речь о развитии функциональной молекулярной электроники. Стратегическим моментом предлагаемого подхода является *концентрация усилий не на уменьшение топологического размера элемента, а на увеличение его функциональных возможностей*.

Таким образом, альтернативным направлением развития микроэлектроники является **функциональная молекулярная электроника**. Термин "*молекулярная электроника*" некоторыми физиками и технологами рассматривается как часть наноэлектроники. Данный подход основывается только на учете размеров молекул, имеющих характерный размер, и не учитывает специфических особенностей проявления квантовых эффектов в молекулярных системах.

В настоящее время ведется интенсивный поиск концепций ее развития, разрабатываются основы построения базовых элементов микроэлектроники. Однако строгого определения самого понятия пока нет. Все сходятся лишь на том, что молекулярная электроника является новой междисциплинарной областью науки, объединяющей физику твердого тела, молекулярную физику, органическую и неорганическую химию и ставящей своей целью перевод информационно-вычислительных устройств на новую элементную базу. Такая элементная база, созданная на новых принципах, даст и новую схемотехнику, и новую идеологию построения информационно-вычислительных систем подобно тому, как это в свое время произошло при переходе от радиоламп к полупроводниковым транзисторам.

Анализ научно-технической литературы свидетельствует, что начиная с 1994 г. заметно активизировались исследования в области молекулярной электроники. Подтверждением данных тенденций является все возрастающий интерес к молекулярной электронике различных фирм и зарубежных электронных исследовательских центров, выражавшийся в большом числе ежегодных (3-5) конференций по этой тематике. К ним относятся в первую очередь: ежегодная Европейская

конференция по молекулярной электронике, конференция по ориентированным молекулярным слоям (LB), по супрамолекулярной химии, молекулярной нанотехнологии и т.д. Проводятся также специализированные конференции, посвященные электроактивным и фотоактивным молекулярным материалам. К этой области приымкает такая обширная область практического использования молекулярных систем, какой являются газовые и жидкостные сенсоры.

По материалам этих конференций и анализу текущей литературы можно сделать вывод, что наиболее продвинутыми в практическом плане разработками в этой области является создание электролюминесцентных экранов для дисплеев различного назначения. На данный момент времени получены молекулярные материалы и соответствующие пленки с высоким коэффициентом люминесценции, удовлетворяющим современным требованиям. Оставшиеся проблемы связаны с увеличением времени службы. По мнению авторов разработок, широкомасштабное использование подобных экранов можно ожидать в ближайшее время. Созданы специализированные фирмы, ориентированные на производство таких экранов.

Поскольку для науки западных стран типичным является финансирование научных разработок через фирмы, то представленный выше список научных центров явно свидетельствует о прямой заинтересованности электронных фирм в этих исследованиях. Мы не имеем подтвержденных сведений о практических достижениях в области молекулярной электроники, однако косвенные признаки свидетельствуют об интенсивных исследованиях, проводимых непосредственно на электронных фирмах. Так, в частности, имеются сообщения о создании "пластмассового" транзистора во Франции, дисплеев в Великобритании и элемента памяти в США.

Особое внимание следует обратить на ярко выраженный характер исследований, посвященных синтезу специализированных молекулярных ансамблей и методов их анализа на уровне отдельных молекулярных фрагментов. Значительный акцент делается на исследовании механизмов самоорганизации отдельных молекул в организованные структуры, что является предпосылкой для разработки технологий самосборки соответствующих молекулярных электронных устройств.

Существенное сокращение технологического цикла производства молекулярных устройств с одновременным отказом от использования дорогостоящих материалов (особо чистые кремний и арсенид галлия) существенно удашевит стоимость элемента и соответственно расширит область применения в информационных устройствах. При этом современное производство полупроводников может быть легко адаптировано к реализации молекулярной технологии.

Следует ожидать, что развитие молекулярной электроники наиболее эффективные результаты даст в областях, связанных с использованием функциональных специфических свойств молекулярных систем. Быстрая реализация этих результатов, полученных при выполнении необходимого объема НИР и НИОКР, возможна в следующих направлениях:

- элементы памяти различного назначения (оперативной, статической, архивной и др.), в частности радиационно-устойчивые элементы памяти для систем наведения;
- молекулярные транзисторы, диоды и т.д.;
- средства отображения информации (дисплеи, телевизионные экраны и т.д.);
- химические и биологические сенсоры;
- фотоприемники различного назначения и преобразователи солнечной энергии.

Создание чувствительных химических сенсоров является одной из важных проблем, стоящей перед экологией, медициной, криминалистикой и т.д. Наиболее перспективным и естественным подходом в решении этой проблемы является построение датчиков, основанных на химическом распознавании определяемых молекул. Структура такого сенсора по форме представляет молекулярный транзистор, изменяющий свою проводимость под действием распознаваемых молекул. Система химических сенсоров, объединенных в единую нейронную сеть, позволит обнаруживать источники химических и биологических объектов, в том числе человека, и судить о его состоянии. Дополнительная информация может быть получена при анализе изображений, полученных в различных спектральных областях. Все эти проблемы могут быть решены методами молекулярной нанотехнологии.

Важным элементом в системе обнаружения и регистрации объектов по различным признакам являются элементы хранения информации. Одним из важных требований, предъявляемых к подобным системам, является их радиационная устойчивость. Молекулярная технология может предложить решения и этой проблемы наряду с высокими техническими параметрами и простотой технологии их изготовления.

Полученные по различным каналам данные свидетельствуют, что прорыв в практическую плоскость может произойти в любой момент. В исследовательских центрах ведущих электронных фирм уже создаются реальные образцы молекулярных электронных устройств. Так, например, американская фирма *Actel Corp.* сообщила о создании постоянно программируемых элементов памяти. В этих устройствах используется программируемый слой оригинального состава, выполненный на органической основе.

В настоящее время практически во всех высокоразвитых странах, включая Китай, имеются национальные программы по молекулярной электронике. Наиболее широкомасштабной поддержкой государства пользуются эти программы в США, Великобритании, Японии, Германии. Так, по имеющимся у нас данным, в Японии и Германии ежегодно финансируется из бюджета государством 15-30 научно-исследовательских проектов на сумму 2-3 млн долл. на проект.

По нашему мнению, реальное соперничество российской электронной промышленности с западными технологиями может быть реализовано только при использовании альтернативных путей развития микроэлектроники и, в частности, молекулярной.

УДК 681.586: 681.335.2: 621.01: 621.38

Е.В. Шалобаев, канд. техн. наук, доц.,
Санкт-Петербургский государственный институт
точной механики и оптики (технический университет)

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА: ОСОБЕННОСТИ СООТНОШЕНИЯ МИКРО- И МАКРОУРОВНЕЙ

Дано сравнение концептуальных положений микросистемной техники и мехатроники как смежных областей науки и техники, проанализированы особенности реализации аналогичных идей на макро- и микроуровнях. Поставлен вопрос об упорядочении терминологии.

Введение

С середины девяностых годов в качестве наиболее часто используемого собирательного понятия для расширительного толкования направления, связанного с созданием микросистем, наряду с термином *микросистемная техника* (МСТ) используют такие понятия, как *микросенсоры и активаторы, мехатроника, микромеханика, микроника, микромашины* [1, 2].

Термин МСТ утвердился в России в 1996 г. в связи с принятием "Перечня критических направлений Федерального уровня" [1], в Японии используется термин – микромашины, в Европе – микроника (поскольку этот же термин ранее использовался и для обозначения мехатроники, то еще раз видна необходимость их разделения). Необходимо пояснить, что мехатроника не тождественна МСТ и МСТ не выделялась из мехатроники. Однако как связаны между собой эти понятия, что понимается под указанными выше терминами, какие критерии используются, практически трудно разобраться, поскольку представления разных авторов достаточно противоречивы. Данная статья является попыткой провести определенную систематизацию в этом вопросе.

Определения направлений

Микросистемная техника (МСТ) и мехатроника (МТ) являются современными научно-техническими направлениями [1-4], которые зародились в конце XX века благодаря бурному развитию микроэлектроники [1-5].

Мехатроника является продуктом машиностроения, в частности станкостроения [4]. МТ – это область науки и техники, посвященная созданию и эксплуатации машин и систем с компьютерным управлением движением, которая базируется на знаниях в области механики, электроники и микропроцессорной техники, информатики и компьютерного управления движением машин и агрегатов. Таково определение Государственного образовательного стандарта в редакции 2000 г. [3].

Стало общепринятым считать, что термин *мехатроника* впервые был введен японской фирмой Yaskawa Electric в 1969 г. и запатентован в 1972 г. как торговая марка [3, 6], хотя в работе [9] в качестве возможного автора указан Т. Мори — президент компании Saibi Electronics and Machineri. Бессспорно одно – родиной термина является Япония. В Европе для обозначения похожих концепций предлагался термин *микроника*, который не получил широкого распространения.

Во избежание недоразумений необходимо пояснить, что термин механотрон в электронной технике существовал с конца 40-х годов XX века и относился к электровакуумному прибору. Механотроны предназначались для преобразования механических величин (перемещений, усилий, ускорений, вибраций и т.п.) в электрические сигналы и использовались в качестве датчиков в измерительных устройствах [11], т.е. являлись сенсорами. Отсюда, по мнению автора, истоки попыток заменить термин мехатроника на якобы более благозвучный для русского языка – *механотроника*. Однако государственный стандарт узаконил термин *мехатроника*.

Микросистемная техника родилась на основе развития микротехнологий, создавших микроэлектронику [1,2]. МСТ – научно-техническое направление, целью которого является создание в ограниченном объеме твердого тела или на его поверхности микросистем. Микросистемы представляют собой упорядоченные композиции областей с заданным составом, структурой и геометрией, статическая и динамическая совокупность которых обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования и передачи энергии в интеграции с процессами восприятия, обработки, трансляции и хранения информации при выполнении запрограммированных операций и действий в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, энергетическими, временными и надежностными показателями.

Микросистемы могут обеспечивать выполнение всех перечисленных выше функций или части из них [2].

К. Петерсон (фирма IBM) в статье [12], опубликованной в 1982г., впервые [1, 17] обратил внимание на уже состоявшееся появление новых научного и прикладного направлений, базирующихся на использовании приемов полупроводниковой микротехнологии и кремния (как материала) не в целях микроэлектроники.

По времени рассматриваемые направления зарождались в такой последовательности: первое – в начале 70-х, а второе – в начале 80-х годов уходящего века.

Важно отметить, что толчком для становления обоих направлений явились технические достижения, а не общие теоретические положения, как было в истории робототехники [8].

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что МСТ – естественное продолжение микроэлектроники, технологии производства которой использованы для создания микромеханических и микроэлектромеханических систем и других систем, связанных функциональными связями, на основе объема твердого тела. Таким образом, МСТ отличается от микроэлектроники расширением предметной области и использованием в связи с этим новых технологий.

МТ же – логическое развитие электромеханики с использованием встроенных микропроцессоров, управляющих движением механизмов. В МТ объекты МСТ [10] могут применяться в качестве сенсоров и микропроцессоров. А кроме того, активаторы в объектах МТ должны развивать довольно-таки ощущимые усилия.

Критерии отнесения объектов к МСТ и МТ

Здесь нужно бы остановиться на том, что очень часто злоупотребляют использованием приставки "микро-", например, для терминов типа микродатчик, микроконтроллер, микродвигатель. Часто оказывается, что приставка фиксирует наличие монокристалла или микропроцессора [11, 12]. Габаритные размеры таких устройств вполне соответствуют макромиру и составляют десятки миллиметров, а масса — сотни грамм. При указанных массогабаритных параметрах такие изделия, как гироскопы, никто не называет микроприборами [16], это просто малогабаритные изделия. В настоящее время, например, к микрогироскопам относят объекты, у которых габаритные размеры – единицы миллиметров, а масса – единицы и десятки грамм [8]. В работе [7] для объектов МСТ предложен диапазон от микрометров до миллиметров.

Иногда по традиции микродвигателями называют двигатели мощностью менее 600 Вт и до десятых долей Вт [18]; кстати, последнее значение коррелирует с потребляемой мощностью микрогироскопов. Здесь будет неподобающим отметить, что мехатронные модули (ММ) большинства легких транспортных средств (электровелосипеды, инвалидные коляски, роллеры) укладываются в интервал 150-500 Вт, но есть и исключения – ММ миниэлектромобилей – 2, 5кВт.

Размерный фактор

Фактор масштабирования отражает влияние размеров на свойства как материалов, так и получаемых из них элементов.

Так, в макромире отвод теплоты осуществляется в тело детали, а в микромире это явление приобретает большое значение, и термостойкость материала становится важной характеристикой, поскольку теплота отводится через сечение площадью, например, в 4-5 мкм². Другой пример: тончайшие кремниевые пленки обладают более высокой прочностью, чем аналогичные металлические, более устойчивы к воздействию агрессивных сред и радиации.

Основные отличия рассматриваемых научно-технических направлений относятся именно к такому фактору, как масштабность, и к производственным факторам (материаломкость и энергоемкость объектов [2]). Необходимо заметить, что на производство же самих объектов требуется немалое количество энергии.

Однако миниатюризация макрообъектов не обязательно должна привести к объекту МСТ, имеющему то же название (об этом речь пойдет ниже). Может измениться физика восприятия явления, например, как в случае гироскопа.

Для объектов МТ характерна внутренняя разноразмерность составляющих элементов, что отсутствует у объектов МСТ. Для последних характерен более высокий уровень интеграции составляющих частей в том смысле, что они могут быть выполнены по одной или нескольким микротехнологиям в монокристалле.

Технология: организация и виды техпроцессов

Сближает МСТ и МТ организация технологии, поскольку в машиностроении при крупносерийном и массовом производстве осуществляется групповой метод [16], а в микротехнологиях – аналогичный интегрально-групповой метод массового производства как элементов, так и систем [2].

Регулируемый микрорельеф поверхностей, способствующий упрочнению поверхностей, снижению трения, т.е. изменению физико-механических свойств материала [20], является, можно сказать, естественным движением технологии макрорежущих в сторону микромира. В настоящее время область применения этой технологии расширяется за счет использования в качестве технологической среды сферических тел диаметром от 50 до 200 нм [21, 22].

LIGA-технология включает в себя литографию, гальванопластику и прессование [2], широко используемые при производстве элементной базы МТ (оптические кодовые элементы [23]), при изготовлении форм, для производства деталей из пластмасс литьем под давлением [24]. Среди технологий, используемых в МТ, активно применяют лазерную обработку деталей, а в МСТ – лазерное осаждение из газовой фазы материалов [25].

Вариабельность технологий, применяемых для производства объектов МТ и МСТ, примерно одинакова и во многом определяется размерным фактором.

Предметная область МТ и МСТ

Микромеханика и микроэлектромеханика не просто базируются на технологиях, создавших микроэлектронику, а имеют и свои отличия, заключающиеся в том, что предметом проектирования является уже объемная трехмерная физическая структура [8, 13], что сближает их с объектами МТ. Микромеханика, истоком которой является микроэлектроника, коренным образом отличается от классической механики. Кроме того, миниатюризованные объекты механики и объекты микромеханики – предметы разного уровня. Отсюда и микромеханика, и микроэлектромеханика – естественная предметная область специалистов микроэлектроники, что не исключает, а предполагает привлечение специалистов-механиков для решения специфических задач.

Основными объектами МСТ, как это следует из работы [8], являются сенсорные и активаторные подсистемы автоматических систем управления, выполняемые в виде локальных или распределенных энергетических преобразователей, связанных информационно с вычислительной подсистемой. Для определенности необходимо уточнить, что все это объединено в единый физический объект.

Основным объектом мехатроники также является контролльно-управляемая система, включающая в себя аналогичные подсистемы, отличающиеся размерами и компоновкой.

Материаловедческая база

Использование адаптирующихся материалов (в частности, пьезокерамики [24], кварца) в качестве источников (автор участвовал в разработке линейного пьезодвигателя еще в конце 80-х годов) и элементов передачи движения также роднят материаловедческую базу МСТ и МТ. В МТ для опор применяется ситалл, а в МСТ – фотоситалл [25]. Правда, в этой области точки соприкосновения еще незначительны.

Естественно, что применение к материалам таких красочных названий, как "активно умные", "умная пыль", "умная поверхность", "умная структура", являющихся прямым переводом английских терминов типа "smart-systems", хотя и допустимо, но требует более четкого определения [8, 14, 25].

Проблемы МСТ в связи с ее применением в МТ

Применение МСТ в мехатронике охватывает как область электроники (точнее, микроэлектроники в виде микропроцессорной техники, на которой базируются контроллеры [28] – подсистемы обработки и выработки решения), так и область механики в виде микромеханических и микроэлектромеханических систем (в первую очередь датчиков давлений [14], акселерометров [15], деформаций [10]), из которых состоят подсистемы активаторов и сенсоров.

Характерной особенностью мехатронных устройств является высокая точность выполнения заданного движения, а точность объектов МСТ из-за их размеров на несколько порядков ниже, чем у макроаналогов [2, 9, 26].

Например, как уже было отмечено выше, микрообъект может вовсе не являться миниатюризированной копией макрообъекта. Так, микрогироскоп и классический гироскоп физически не похожи, хотя и используют одно физическое явление – закон Кориолиса.

Существует точка зрения, что отказ от классической схемы с вращающимся ротором не только устраниет наименее надежные узлы прибора, но и существенно упрощает конструкцию, позволяя эффективно использовать технологическую базу микроэлектроники [8, 9]. Весь вопрос лишь в том, насколько удается увеличить точность микрогироскопов. В качестве достижений приводятся сведения о том, что на имитационном макете в ЦНИИМаш удалось получить порядка 200 угл.град/ч, а в планах московского АП "Вектор" – 0,1 угл.град/ч. Сообщается, что американская "Drapet Laboratory" планирует выпуск ММГ с дрейфом менее 1 угл.град/ч. При этом делался вывод о том, что или ММГ вытесняет малогабаритные гироскопы, или ММГ будут использоваться в дешевых и грубых системах ориентации.

Современное решение проблемы прецизионной гироскопии было найдено на основе классического

гироскопа со сферическим ротором за счет создания электростатического подвеса ротора с точностью $10^{-5} - 10^{-3}$ угл.град/ч [30-34] (почти 30 лет назад автор участвовал в разработке сферического гироскопа на аэростатическом подвесе, т.е. в направлении развития классической схемы, которая и дала на настоящее время максимальную точность).

Здесь необходимо разделить области применения в зависимости от времени работы и характера объекта. Для кратковременных процессов (секунды, минуты) и для таких объектов, как ракеты, снаряды, пули, применение ММГ с указанными точностями вполне возможно. Для самолетных и корабельных систем такие погрешности недопустимы. Однако сегодняшний недостаток ММГ можно скомпенсировать, применяя интеграцию микрогироскопов с приемниками глобальных спутниковых навигационных систем [30, 31]. На этом примере жизнь наглядно показывает, что для каждого изделия существует своя область применений, границы которой непрерывно изменяются, и в этом – диалектика развития науки и техники.

Кроме вышеизложенного, микромеханика не обеспечена стандартами. Так, при производстве зубчатых колес существующие ГОСТ распространяются на модули до 0,1 мм, а объекты МСТ имеют модули, достигающие, например, 38 мкм. Близкими к последним являются модули в 80 мкм, используемые в специальных часовых устройствах и в устройствах с шаговыми двигателями.

Методологическая основа разработок объектов МТ и МСТ

Мехатроника – это способ системного проектирования разнородных элементов (механических, электрических, электронных) [35]. Имеется в виду разнородность не только по значению и физическим свойствам, но и по масштабным характеристикам (микроразмеры объектов МСТ и макроконструкции механических устройств МТ). Считается, что основой проектирования объектов МТ является метод параллельного проектирования, в отличие от традиционной последовательной разработки объекта [2].

Сборка макросистем на основе применения элементной базы МСТ также имеет ряд специфических особенностей, свойственных именно микротехнологиям, например микрокорпусование [14, 25].

Трудности развития МСТ и МТ

Несмотря на очевидные преимущества, которые потенциально заложены в объектах МСТ и МТ, наличие действующих образцов многих типов пока еще не привело к широкому практическому использованию этих изделий.

Характерные причины, препятствующие развитию МСТ (технические, организационные и человеческие), вполне можно распространить и на МТ [13]. Рассмотрим эти причины.

- Недостаточность применяемых технологических приемов и материалов.

- Отсутствие специализированной базы, поскольку требуется универсализация производства. Традиционное микроэлектронное производство не может обеспечить выпуск объектов МСТ, так как на крупном предприятии с отложенным массовым выпуском продукции внедрение дополнительных технологических операций и оборудования для изготовления относительно меньших объемов изделий нецелесообразно и нерентабельно, поскольку переналадка технологического оборудования и режимов может только расстроить основной техпроцесс. Реальность подобных опасений показала практика отечественных гибких производственных комплексов.

Правда, в области МТ есть и другие причины, например, социально-экономического характера. Это определенный кризис части промышленности ВПК, который привел к закрытию механических и электромеханических производств, потере высококвалифицированных кадров, что весьма важно при производстве прецизионной техники. Остроту положения может характеризовать тот факт, что, например, регистрирующий прибор приходится комплектовать механизмами, изготавливаемыми в Сибири.

Однако для средних и небольших производств, направление работы которых легко может перестраиваться, разработка объектов МТ является естественной сферой деятельности. Пример – успешная деятельность НПК "Оазис" (регистрирующие приборы, датчики), ЗАО "СКАЛА" (медицинская техника) в Санкт-Петербурге. На Западе во главе производства объектов МТ и МСТ стоят научно-производственные коллективы университетских научных центров. Та же картина наблюдается и в России при производстве объектов МСТ (Центр микротехнологий и диагностики при СПбГЭТУ "ЛЭТИ", лаборатория микротехники и микроэлектромеханических систем Центра наукоемкого инжиниринга СПбГТУ, фирмы "Элкус" и "Анком").

В работе [13] предложено для объединения усилий специалистов и производств организовать Санкт-Петербургский региональный центр микротехнологий на базе СПбГТУ в составе ряда вузов и НИИ с использованием таких предприятий, как "Авангард", "Светлана", "Ленинец", "Позитрон" и др. Однако наиболее реальные предпосылки для подобной интеграции создаются на базе ЦМТиД при СПбГЭТУ "ЛЭТИ", многие годы эффективно действующего и имеющего современную технологическую базу. ЦМТиД, образовавшийся на базе кафедры микроэлектроники, уже реально собирает под свои знамена специалистов в области оптики и механики, активно сотрудничает со многими вузами Санкт-Петербурга, России, имеет долговременные и плодотворные международные связи.

- Недостаточность информации (только в 1999 - 2000 гг. появились трибуны всероссийского уровня - журналы "Микросистемотехника" и "Мехатроника"), психологический барьер (несовместимости макро- и микромиров у сегодняшних специалистов, которых обучали либо на макро-, либо на микрообъектах),

отсутствие специалистов (специалисты в микроэлектронике еще не являются специалистами в МСТ, а специалисты в механике и электромеханике не являются специалистами в МТ) и достоверных сведений о достижениях (например, нет ответа на вопрос, каковы сроки работы и надежность, если изделие выполняется впервые).

Не менее важной и трудной для решения является проблема научно-технических связей между специалистами из различных областей знаний, обусловленная междисциплинарностью рассматриваемых направлений.

Несмотря на безусловную важность первых двух факторов, третий фактор является в настоящее время, пожалуй, самым главным.

Выводы

МСТ и МТ, оставаясь самостоятельными научно-техническими направлениями, тесно связаны в областях интеграции объекта в моноблоке или в монокристалле, элементной базы, системного подхода к проектированию разнородных элементов объекта, технологий и организационных основ производства, материаловедческой базы, генерации и преобразования энергии и информации, общего пути развития.

Именно на стыке этих направлений должны возникнуть новые приборы и устройства, решающие те задачи, которые до сих пор не решены.

Возможно, именно на стыке этих двух направлений появится новая область, обслуживаемая специалистами нового типа, которые хорошо знают как мехатронику, так и микросистемную технику и которые преодолеют психологический барьер несовместимости макро- и микромиров, имеющийся у сегодняшних специалистов, которых обучали либо на макро-, либо на микрообъектах.

* * *

Приведенные выше соображения, являясь сами по себе достаточно известными, имеют целью обрисовать взаимосвязь двух новейших научно-технических направлений, что и является целью данной статьи.

Список литературы

1. Лучинин В.В. Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение. 1999. Т. 9. № 1. С. 3-18.
2. Северов Л.А., Понамарев В.К., Парfenov А.И. и др. Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, технологии и пути развития // Известия вузов. Приборостроение. 1998. № 1-2. С. 57-73.
3. Васильев А.А., Лучинин В.В. Критическое направление: микросистемная техника – базис машин и технологий будущего // Конверсия в машиностроении. 1998. № 6. С. 17-20.
4. Клинов 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.

5. **Подураев Ю.В., Кулешов В.С.** Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1. С. 5-10.
6. **Мехатроника:** Пер. с яп. / Т. Иси, И. Симояма, Х. Иноуэ и др. М.: Мир, 1988. 318 с.
7. **Аршанский М.М.** Мехатроника. М.: МГАПИ, 1995. 84 с.
8. **Подураев Ю.В.** Основы мехатроники М.: МГТУ "Станкин", 2000. 120 с.
9. **Парушев П., Кулев П.** Состояние и ближайшие перспективы развития мехатроники (болгарский опыт) пер. с англ. / Mechatronics. 1993. № 3. Р. 15-23.
10. **Мехатроника:** Недетерминированы мехатронни системи /П. Парушев, К. Георгиев, К. Костадинов и др. //Актуални проблеми на науката. Т. XVII. № 2-3. София: изд-во Болг. АН, 1990. 101 с.
11. **Механотроны** / Советский энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1981. 808 с.
12. **Peterson K.** Silicon as a Mechanical Material Proceedings of the IEEE, v. 70, No 5, May 1982. P. 420-457.
13. **Пятышев Е.Н., Лурье М.С.** Микротехнологии и микроэлектромеханические системы – новое научно-техническое направление // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 199. № 3. С. 101-112.
14. **Сызранцев В.Н., Удовикин А.Ю., Добрынько А.В. и др.** Измерения напряжений в зубьях колес цилиндрических передач с помощью датчиков деформаций интегрального типа // Вестник машиностроения. 1990. № 8. С. 27-30.
15. **Бушев В.В., Николайчук О.Л., Стучеников В.М.** Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА // Датчики и системы. 2000. № 1. С. 21-27.
16. **Распопова Н.М., Распопов В.Я.** Импульсные гиromото-ры Теория и расчет. М.: НТЦ "Информтехника", 1998. 172 с.
17. **Лурье М.С., Пятышев Е.Н.** Перспективы развития микротехнологий // Вестник машиностроения, 1999. №10.
18. **Электромеханический привод. Выбор электродвигателя и кинематический расчет механизма на начальном этапе проектирования** // Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов / Под ред. В.Е Старжинского, Е.В. Шалобаева. СПб-Гомель: ИММС, 1998. 538 с.
19. **Митрофанов С.П.** Групповая технология машиностроительного производства. Л.: Машиностроение, 1983. 779 с.
20. **Шнейдер Ю.Г.** Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 240 с.
21. **Шалобаев Е.В., Ростовцев А.М.** Новейшие технологии при изготовлении элементов прецизионных мехатронных устройств // Тезисы докладов НТК в 2-х ч. СПб.: ИТМО, 2000. Ч. 2. С. 53-54.
22. **Добрусин А.М., Шалобаев Е.В.** Создание регулярного микрорельефа для деталей сложной формы // Там же. 63 с.
23. **Фотоэлектрические преобразователи информации** / Л.Н. Преснухин, В.Ф. Шаньгин, С.А. Майоров, И.В. Меськин. М.: Машиностроение, 1974. 376 с.
24. **Точные пластмассовые детали и технология их получения** / В.Е. Старжинский, А.М. Фаберов, С.С. Песецкий и др. Мин.: Навука і тэхніка, 1993. 307 с.
25. **Лучинин В.В., Таиров Ю.М., Васильев А.А.** Особенности материаловедческого и технологического базиса микросистем // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 7-11.
26. **А.С. СССР № 1161739.** Зубчатое колесо / К.И. Гуляев, В.М. Медунецкий, Е.В. Шалобаев // Бюллетень Изобретений. № 29. 1986.
27. **Петров С.Ю., Квасников В.Я., Шалобаев Е.В., Ментюков А.М.** Современные регистрирующие приборы (принципы построения) // Датчики и системы. 2000. № 4. С. 36-38.
28. **Регистрирующие приборы, программируемые контроллеры, датчики:** Справочное пособие / С.Ю. Петров, Шалобаев Е.В. Под ред. С.Ю. Петрова СПб.: ОАЗИС, 2000. 86 с.
29. **Номенклатурный каталог научно-производственного комплекса "Оазис".** СПб.: НПК "ОАЗИС", 1999. 20 с.
30. **Пешехонов В.Г.** Проблемы и перспективы современной гироскопии // Известия вузов. Приборостроение. 2000. № 1-2. С. 48-56.
31. **Анучин О.Н., Емельянцев Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общ. ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 1999. 356 с.
32. **Разработка и исследование микромеханического гироскопа** / А.М. Лестев, И.В. Попова, Е.Н. Пятышев и др // Гироскопия и навигация. 1999. № 3.
33. **Погалов А.И., Тимошенков В.П., Тимошенков С.П., Чаплыгин Ю.А.** Разработка микрогироскопов на основе структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 36-40
34. **Дятлов В.Л., Косцов Э.Г.** Высокоэнергоемкие микродвигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 22-31.
35. **Тимофеев Б.П.** Проблемы в мехатронике // Тезисы докладов НТК. В 2-х ч. СПб.: ИТМО, 2000. Ч. 2. 48 с.
36. **Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В., Егоров Б.А., Ефименко В.Т.** Адаптируемая биотехническая диагностическая система // Тезисы докладов НТК. В 2-х ч. СПб.: ИТМО, 2000. Ч. 2. 49 с.
37. **Меськин И.В., Мальцев Л.Н., Шалобаев Е.В.** Обзор состояния разработок топографических цифровых оптоэлектронных преобразователей перемещений // Известия вузов. Приборостроение. 2000. Т. 45. № 1-2. С. 44-49.
38. **Меськин И.В., Шалобаев Е.В., Мальцев Л.Н., Жуков В.Л.** Оптоэлектронные цифровые преобразователи перемещений – одно из средств автоматизации мехатронных устройств // Труды 1-й Международной конференции "Мехатроника и робототехника". СПб. 2000.
39. **Интерфейсные устройства, платы, контроллеры и принадлежности индустриальных, бортовых и встроенных систем управления, контроля и сбора данных.** Каталог электронной компании "ЭЛКУС" СПб.: ЗАО "ЭЛКУС", 1999. 64 с.
40. **Старжинский В.Е., Шалобаев Е.В.** Проблемы применения микросистемной техники в прецизионных устройствах мехатроники // Материалы 4-й Международной школы по точности им. И.Г. Фридлендера. СПб.: ИПМ РАН, 2000.
41. **Vollath H., Preiß S., Hulsenberg D.** Neue methoden zur Mikrostrukturierung spezieller Glaser // 41 Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquium Ilmenau: Technische Universität, 1996. Band 1. S. 47-52.
42. **Salim R., Wurmus H.** Mikrotechmscher Greifer für die Mikromontage // 41 Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquium Ilmenau Technische Universität, 1996. Band 1. S. 109-115.
43. **Hesselbach J., Pittschellis R.** Miniaturgreifer fur die Mikromontage // 41 Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquium Ilmenau Technische Universität, 1996. Band 1. S. 115-121.
44. **Hofmann D., Steike A., Schmidt A.** Neue Mikrosensoren fur die Mechatronik // 41 Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquium Ilmenau Technische Universität, 1996. Band 2. S. 137-143.

УДК 621.3

В.Г. Градецкий, д-р. техн. наук,
Л.Н. Кравчук, гл. спец.-констр.,
М.М. Пушкин, канд. техн. наук,
Институт проблем механики РАН, Москва

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МНОГОЗВЕННЫХ МИКРОСИСТЕМАХ

Представлены результаты исследований динамических процессов в многозвенных микросистемах. Рассмотрены и оценены силы, обуславливающие движение и силы сопротивления движению в различных средах для микросистем. Представлена математическая модель микrorобота-капсулы при ее движении за счет перистальтики, учитывающая запаздывание. Математическая модель является системой нелинейных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, содержащими как обыкновенные дифференциальные уравнения, так и уравнение в частных производных. Решение этой системы возможно на основе численного моделирования.

Исследовательская работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект РФФИ 99-01-00085.

Введение

Несмотря на опубликованные в последнее время некоторые результаты исследования движения микросистем [1-4], динамические процессы с учетом особенностей влияния окружающей микросреды исследованы недостаточно. Очевидно, что движение микросистем, в том числе микrorоботов, определяется прежде всего их механической структурой и характеристиками среды [5-7]. В качестве объектов для исследования выберем достаточно распространенные механические системы, а именно, многозвенные микросистемы, представляющие собой управляемые гибкие стержни, соединенные шарнирами со встроенными в них микродвигателями, и прежде всего рассмотрим некоторую их упрощенную модель – двухзвенный робот с упругими связями. Ранее была выявлена характерная особенность движения подобного типа роботов, состоящая в необходимости учета последствий или запаздывающих эффектов в динамике исследуемой модели, что привело к целесообразности описания движения двухзвенного робота системой уравнений с запаздывающим аргументом [6]. Затрудняющим исследование динамики двухзвенного робота фактором являлось то, что реальное движение системы происходит в среде с неизученными или неизвестными априори свойствами, точное знание которых на этапе проектирования микросистем затруднено.

В связи с этим обстоятельством необходимо более детальное изучение среды, в которой происходит движение и введение в синтезируемый закон управления

движением робота принципов адаптации или нечеткой логики [2, 6-9].

Принимается во внимание, что синтезируемые законы управления движением миниатюрных роботов на основе теории адаптации могут быть распространены на другие миниатюрные механические системы, функционирующие в условиях недетерминированного воздействия окружающей среды.

Что касается технического применения микро- и мини-роботов, то здесь необходимы исследования динамических процессов, возникающих при движении миниатюрных роботов внутри труб малого диаметра как с жесткими, так и деформируемыми стенками, обладающими упругой податливостью. Движение таких роботов, как правило, осуществляется собственными исполнительными механизмами.

При применении микrorоботов для целей медицинской диагностики необходимость использования собственных движителей робота отпадает, поскольку используется энергия, например, перистальтического сокращения желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), в результате чего происходит проталкивание микrorобота по ЖКТ, или энергия потока крови внутри кровеносных сосудов, что приводит к общему, вместе с кровью, движению мини-робота.

Как первый аспект, технический, так и второй аспект, медицинский, применения микrorоботов характеризуется тем, что для построения законов управления такими микrorоботами необходимо учитывать, что их движение происходит в средах с априори неопределенными параметрами и при наличии существенных эффектов запаздываний.

Отражением этого в математических моделях движения микrorоботов будет тот факт, что уравнения, а это, как правило, дифференциальные уравнения или системы дифференциальных уравнений, будут содержать в своих коэффициентах априори неопределенные добавки, связанные с неопределенностью среды, а сами уравнения будут уравнениями с запаздывающим аргументом, что связано с теми или иными инерциальными эффектами.

Эти два момента являются, конечно, осложняющими при построении математических моделей движения микrorоботов. Но отсутствие собственных движителей медицинских микrorоботов несколько упрощает, относительно технических микrorоботов, исследование и создание таких систем.

Для рассмотрения вводятся упрощенные схемы микросистем, для которых исследуются проблемы динамики.

В данной работе, исходя из перечисленных выше практических задач применения микро- и мини-роботов, рассматриваются такие аспекты динамики, как анализ сил, действующих на микrorобот через микроопору или микрозахват, движение моделей микrorоботов в жидкой среде и приближенная математическая модель движения микrorобота-капсулы под действием перистальтики желудочно-кишечного тракта.

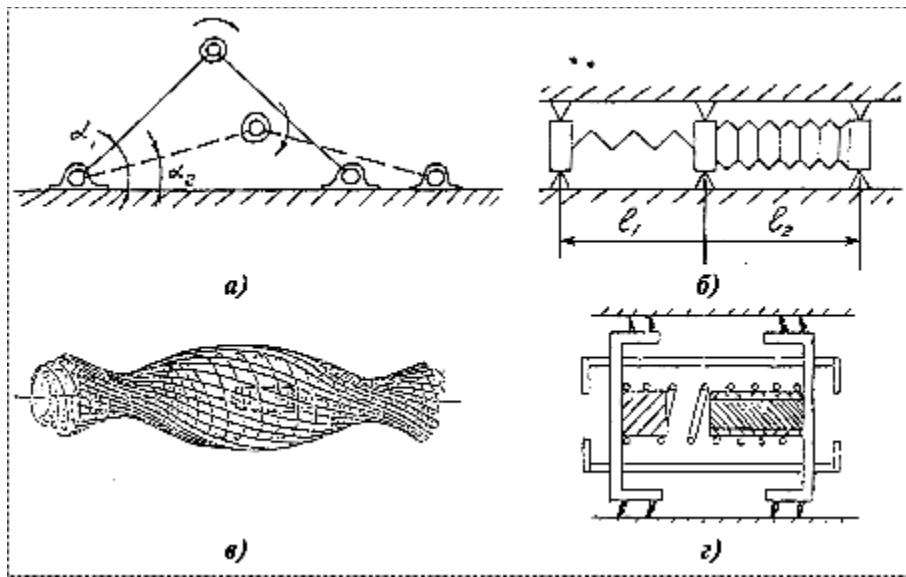


Рис. 1. Упрощенные схемы микророботов:

а - двухзвеный микроробот с двигателем в шарнире и захватным устройством в месте контакта с поверхностью передвижения, *б* - двухзвеный микроробот с гибкими связями, *в* - схемы движения автономной микрокапсулы внутри ЖКТ относительно продольных и круговых гладкомышечных волокон, *г* - схема движения микроробота внутри трубы с жесткими стенками

Анализ сил, действующих на микросхвата

При рассмотрении влияния различных сил, вынуждающих двигаться микросистемы или тормозящих их движение в различных условиях окружающей среды, рассмотрим прежде всего такие, которые могут существенно влиять на процесс движения.

К таким силам можно отнести силы взаимодействия стоп или схватов микроботов с шероховатыми поверхностями, силы поверхностного натяжения жидкостей, электростатические силы и силы электростатического притяжения, силы трения и адгезии, силы упругости, а также дополнительные движущие силы, определяемые приводными устройствами микросистем, и силы сопротивления, зависящие от параметров внешней среды и от конструктивных характеристик.

Упрощенные схемы многозвенных микросистем-микророботов

Выбранные для исследования динамики принципиальные схемы микросистем — мини- и микророботов (рис. 1) содержат два или большее число звеньев, которые соединены между собой шарнирами или механическими системами с монтированными приводными двигателями в узлах-шарнирах, либо приводящими в движение за счет колебаний пьезоэлектриков, или сокращения упругих стенок оболочек, либо перемещающихся в результате подачи давления сжатого воздуха.

Движение двухзвенного микроробота по жесткой поверхности (рис. 1, *а*) осуществляется за счет поочередного освобождения стоп и вращения микродвигателя в шарнирах. В другой модификации (рис. 1, *б*) движение осуществляется за счет подачи сжатого воздуха в сильфон первого из закрепленных с помощью схватов звеньев и последующего движения второго звена за счет пружины.

В других случаях движение осуществляется за счет последующих сжатий и ослаблений стенок эластичной оболочки (рис. 1, *в*), как это происходит при движении автономной микрокапсулы внутри желудочно-кишечного тракта относительно продольных и круговых гладкомышечных волокон.

Движение микроробота внутри трубы с жесткими стенками (рис. 1, *г*) осуществляется за счет генерации колебаний в конечных звеньях, выполненных из пьезоэлектрических пластин, соприкасающихся со стенками.

Движение микросистем в различных средах

Движение по твердой поверхности. В общем случае движение микросистем по твердой поверхности как движение твердого тела описывается уравнением Лагранжа второго рода [10]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial q_i} - \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где $T = 0,5 \sum_{v=1}^N m_v \dot{r}_v^2$ – кинетическая энергия системы N

материальных точек. Величины q_i, \dot{q}_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – это обобщенные координаты и обобщенные скорости рассматриваемой микросистемы. Скорости точек v, \dot{r}_v выражаются через обобщенные скорости, а также через независимые координаты и время с помощью формулы

$$\dot{r}_v = \sum_{k=1}^n \frac{\partial r_v}{\partial q_k} \dot{q}_k + \frac{\partial r_v}{\partial t},$$

где $v = 1, 2, \dots, N$, N – число движущихся материальных точек, из которых состоит рассматриваемая система.

В левые части уравнений Лагранжа после выполнения операции дифференцирования по времени – входят $\frac{d}{dt}$ время t , обобщенные координаты q_i , обобщенные скорости \dot{q}_i , и обобщенные ускорения \ddot{q}_i , ($i = 1, 2, \dots, n$).

Обобщенные силы Q_i , стоящие в правых частях уравнений Лагранжа, обычно задаются как функции t , q_k , \dot{q}_k ($k = 1, 2, \dots, n$)

$$Q_i = Q_i(t, q_k, \dot{q}_k) \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Уравнения Лагранжа образуют систему из n обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с n независимыми функциями q_i от независимого переменного t . Порядок этой системы равен $2n$. Заметим, что система дифференциальных уравнений, определяющая движение голономной системы с n степенями свободы, не может иметь порядок, меньший чем $2n$, так как в силу произвольности начальных условий для q_i и \dot{q}_i , $i = 1, 2, \dots, n$, решение должно содержать $2n$ произвольных постоянных.

В случае несвободной системы подлежат определению еще реакции R_v , $v = 1, 2, \dots, N$. Реакции не входят в уравнения Лагранжа. Это является существенным преимуществом последних. После того как уравнения Лагранжа проинтегрированы и найдены функции q_i , $i = 1, 2, \dots, n$, определяют радиус-векторы r_v системы движущихся N материальных точек, а следовательно, определяют и $v_v = \dot{r}_v$, $w_v = \ddot{r}_v$ и $F_v(t, r_v, \dot{r}_v)$, где F_v – равнодействующая всех активных сил. После этого неизвестные реакции определяются из формул:

$$R_v = m_v w_v - F_v, \quad v = 1, 2, \dots, N.$$

В случае свободной системы материальных точек уравнения Лагранжа представляют собой компактную форму записи уравнений движения в произвольной системе координат.

При переходе к микросистемам необходимо к рассмотренным выше силам добавить силы "микромира", которые или побуждают к движению рассматриваемую систему, или тормозят ее продвижение. К таким силам можно отнести силы трения и силы адгезии, силы поверхностного натяжения жидкостей, электростатические силы притяжения и отталкивания и ряд других сил.

Явление адгезии и адгезионные силы. Считается, что адгезия – это связь или взаимодействие между поверхностями двух разнородных контактирующих тел. Для нарушения этой связи необходимо внешнее воздействие определенного значения. Адгезия обуславливается прежде всего различными видами взаимодействия между молекулами или атомами. Эти взаимодействия приводят к образованию межмолекулярной и химической связей. Природа межмолекулярной связи, которую иногда называют ван-дер-ваальсовым взаимодействием, возникает за счет ориентационного, индукционного и дисперсного взаимодействий, которые имеют электромагнитную природу.

Химическая связь может реализоваться за счет донорно-акцепторных переходов, т.е. в результате передачи и приема электронов молекулами контактируемых поверхностей, а также за счет ионной и ковалентной связей.

Кроме межмолекулярных взаимодействий контактирующих поверхностей возможно электростатическое взаимодействие, обусловленное действием кулоновских сил. Электрические силы могут выступать в качестве связи, обуславливающей адгезию в том случае, когда

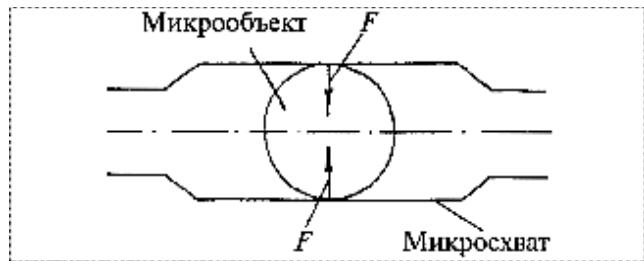


Рис. 2. Взаимодействие между сферическим заряженным объектом и поверхностью схвата

контактирующие поверхности несут избыточные заряды. В этих условиях возникает электрическая компонента за счет кулоновских сил, которая и обуславливает адгезию.

Проявление различных связей зависит от свойств среды. В газовой и жидкой средах адгезия обусловлена, главным образом, межмолекулярными и донорно-акцепторными связями. Помимо адгезионной связи в жидкостной среде появляются дополнительные силы, связанные как с расклинивающим действием тонкого слоя жидкости между поверхностями, что приводит к снижению сил адгезии, так и с возникновением довольно значительных капиллярных сил как результата сил поверхностного натяжения.

Ионные и ковалентные связи наблюдаются сравнительно редко и мало оказывают влияние на адгезию. Кулоновские силы действуют в основном в газовой (воздушной) среде. В жидкости, имеющей электролиты, которые являются проводниками, влияние кулоновских сил на адгезию, вследствие утечки зарядов, ничтожно мало.

Рассмотрим взаимодействие между сферическим заряженным объектом и поверхностью схвата (рис. 2).

Сила между сферическим заряженным объектом (диэлектриком) и поверхностью схвата

$$F_e = \frac{q^2}{4\pi\epsilon d^2},$$

где q – заряд; ϵ – диэлектрическая проницаемость, $\epsilon \approx 1,6 \cdot 10^{-6}$ см², d – диаметр сферы. Если материалом схвата является кремниевое соединение или слюда, то диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 10^{-2}$ см⁻² при давлении $p = 10^6$ Па и зазоре $h = 1$ мкм.

Силы адгезии, возникающие при соприкосновении шара и плоскости [11], могут быть рассчитаны по формуле

$$F = \frac{Hd}{16\pi\delta^2},$$

где H – константа Лифшица – Ван-дер-Ваальса; δ – микрозазор между поверхностями; d – диаметр сферы. Во влажной среде между сферическим объектом и плоскостью возникают довольно значительные капиллярные силы как результат поверхностного натяжения

$$F_{kan} = \frac{\xi(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)S}{\delta},$$

где $\xi = 73 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ - коэффициент поверхностного натяжения для воды; δ – зазор между поверхностями; θ_1 , и θ_2 – углы контакта между жидкостью и поверхностями.

Если предположить, что зазор значительно меньше, чем радиус объекта, то

$$F_{kan} = 2\pi d \xi,$$

где d - радиус объекта.

Если сфера выполнена из кремния, то можно оценить гравитационные силы, равные

$$F_{gp} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_k g = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d^3}{8} \right) \rho g = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_k g,$$

где $\rho_k = 2300 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ – плотность кремния.

Сравнивая действующие силы (рис. 3), было установлено, что для гладких поверхностей без учета шероховатости, силы адгезии на порядок меньше, чем гравитационные силы. Капиллярные силы доминируют и их следует уменьшать за счет конфигурации стенок захвата. Однако для гладких поверхностей силы адгезии начинают значительно влиять при зазорах, соответствующих диаметру объекта 50 мкм. В этом случае можно избежать генерируемого электростатического заряда, возникающего в результате контакта для объектов манипулирования с $d = 5 \text{ мкм}$. Из рассмотрения рис. 3 следует, что гравитационные и электростатические силы возрастают значительно при увеличении диаметров объектов от 5 мкм до 1 мм. Силы адгезии оказывают существенное влияние по сравнению с другими силами при уменьшении размеров деталей до менее 0,05 мкм. Для уменьшения силы поверхностного натяжения можно работать в вакууме или существенно уменьшить влияние влажности. Электростатические силы влияют при увеличении радиуса объекта на порядок. Шероховатость значительно важнее принимать во внимание при учете сил Ван-дер-Ваальса, чем при учете электростатических сил.

Движение шара в жидкости. Рассматривается случай, когда число Рейнольдса существенно меньше единицы, т.е. $Re \ll 1$. Это характерно для движения микророботов в большинстве сред. Поэтому в уравнении Навье-Стокса можно пренебречь членом $(V\nabla)V$. Силами инерции и гравитации при движении микроробота можно пренебречь.

Тогда движение будет полностью описываться системой уравнений

$$\eta \Delta V - \operatorname{grad} P = 0,$$

$$\operatorname{div} V = 0,$$

где Δ – оператор Лапласа; η – вязкость жидкости; V -

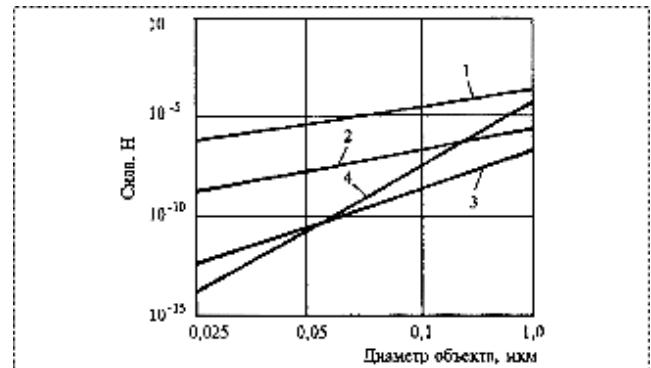


Рис. 3. Сравнение действия сил между сферой диаметра d и поверхностью схваты:

1 – сила поверхностного натяжения; 2 – силы адгезии Ван-дер-Ваальса; 3 – электростатические силы; 4 – гравитационные силы

относительная скорость; P – давление.

Вводя сферическую систему координат, из решения написанной выше системы уравнений можно получить выражение для давления P и для действующей на шар силы F .

$$P = P_0 - \frac{3\eta V}{2R} \cos \theta;$$

$$F = 6\pi R\eta V.$$

Для плавающего робота при обтекании его ламинарным потоком затрачиваемая мощность равна $W = 6\pi R\eta V^2$.

Если предположить, что скорость и размеры пропорциональны характерной длине l , то $W \approx l^3$ и при $l = 1 \text{ мм}$ имеет порядок 10^{-8} Вт , что представляет собой весьма малую величину.

Для сравнения, подъемная сила в воздухе, которая должна быть не менее силы сопротивления для крыла летающего микроробота в воздухе, определяется формулой Жуковского

$$F = 0,5 k_e \rho V^2 S,$$

где k_e – коэффициент сопротивления; ρ – плотность воздуха; V – относительная скорость; S – площадь крыла. Подъемная сила должна уравновесить вес робота. В этом случае скорость и мощность пропорциональны \sqrt{l} .

Устройство автономного микроробота-капсулы для исследования ЖКТ

Устройство для исследования ЖКТ относится к медицинской диагностической технике и предназначено для определения pH среды, давления, температуры и скорости прохождения пищи по желудочно-кишечному тракту с одновременной пространственно-временной регистрацией того или иного химического или физического параметров в ЖКТ. Кроме того, автономная

капсула может быть использована в качестве транспортного средства доставки лекарства в нужную точку ЖКТ.

Микроробот-капсула представляет собой исследовательский комплекс эндорадиозондирования, состоящий: из автономной мини-радиокапсулы с датчиками измерения необходимых химических и физических величин с пространственно-временной привязкой; электронных блоков, преобразующих и передающих полученную информацию, съемного медицинского пояса пеленгатора, который на период исследования закрепляется на животе пациента; приемно-анализирующей аппаратуры.

Предлагаемое устройство может применяться как в стационарных условиях (специальные врачебные кабинеты), где расстояние от пациента до приемно-передающей аппаратуры не превышает 3 м, так и в условиях перемещающегося пациента, где эти расстояния уже могут быть 250-500 м с использованием дополнительного усилителя передаваемых сигналов.

Более подробно об устройстве автономного микроробота-капсулы и о возможности его создания можно узнать из работы [6].

Математическая модель движения микроробота-капсулы под действием перистальтики ЖКТ

В настоящем разделе статьи предпринята попытка построения математической модели движения микроробота-капсулы (в дальнейшем просто капсулы) по ЖКТ. Мы оставляем в стороне вопросы, связанные с динамикой капсулы в условиях априори неопределенной среды в ЖКТ. Основное внимание будет уделено вопросам движения капсулы под действием перистальтики ЖКТ.

Опишем кратко механизм перистальтических сокращений ЖКТ. Было обнаружено, что ответ кишечника на локальное раздражение состоит из сокращений, возникающих выше места раздражения, и расслабления, наблюдающегося ниже стимулируемой области. Этот феномен в медицине известен как "закон кишечника". В соответствии с ним перистальтика кишечника состоит в последовательных сокращениях стенки кишки в ответ на локальное раздражение. В ЖКТ перистальтические сокращения налагаются на другие виды мышечной активности, в частности на ритмичные сегментообразные сокращения. Ритм и скорость распространения перистальтических волн в различных отделах ЖКТ

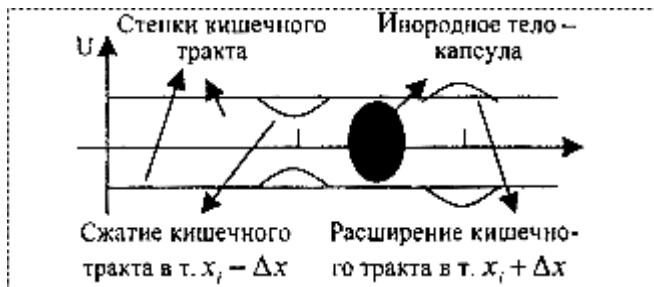


Рис. 4. Одномерная динамика ЖКТ

неодинаков. Перемещение в ЖКТ автономной радиокапсулы происходит благодаря ритмическим сокращениям системы мышц стенок пищевода, желудка, кишечника, что обеспечивает перемещение радиокапсулы вместе с их содержимым в каудальном направлении. В общем случае, благодаря наличию спирально расположенных продольных мышц и круговых (циркулярных) мышц, радиокапсула осуществляет вращательно-поступательное движение, т.е. движение капсулы происходит по спирали.

Мы рассмотрим один из видов перистальтического сокращения стенок тонкого кишечника, при котором перенос пищевого субстрата осуществляется за счет так называемых пропульсивных перистальтических движений, представляющих собой сокращения циркулярных мышечных слоев. Эти движения распространяются вдоль пищеварительного тракта наподобие волны. Обычно такой волне сокращения предшествует волна расслабления. Это схематично показано на рис. 4.

Ось OX – направление вдоль кишечного тракта; ось OU – направление сжатия-расширения кишечного тракта.

Рассмотренный выше механизм перистальтики позволяет нам предположить, что волна сокращений кишечного тракта подобна волне упругих колебаний струны, которая в рассматриваемой нами системе координат описывается известным уравнением гиперболического типа

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = g(x, t),$$

где $u(x, t)$ – функция, описывающая значение отклонения стенки кишечника от положения равновесия в точке с координатой x в момент времени t ; a – скорость распространения волны сжатия кишечника, в общем случае величина переменная, т.е. $a = a(x, t)$; $g(x, t)$ – плотность распределения внешних сил, отнесенных к единице массы.

Будем считать, что движение капсулы в ЖКТ происходит в жидкостной среде. Тогда уравнение ее движения будет иметь вид

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = F_p - F_f - \mu v,$$

где $s = s(t)$ – значение смещения капсулы в момент времени t ; F_p – результирующая сила сжатия, действующая со стороны кишечного тракта на капсулу и определяющая силу проталкивания капсулы; F_f – сила трения скольжения капсулы внутри ЖКТ; v – относительная скорость движения капсулы, в общем случае величина переменная; μ – коэффициент сопротивления движению капсулы в вязкой среде ЖКТ.

Связем результирующую силу F_p с величиной сжатия ЖКТ линейным соотношением

$$F_p = \alpha u(x, t),$$

где α - коэффициент пропорциональности.

В силу того, что F_p есть возрастающая функция времени t , ясно, что движение капсулы начнется не сразу, а спустя некоторый интервал времени τ . Таким образом, член, описывающий сопротивление среды, должен содержать запаздывание τ .

Тогда, согласно изложенному выше, имеем следующую систему уравнений, которая описывает движение капсулы:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \alpha u(t, x) - F_f - \mu v(t - \tau, x),$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + g(t, x).$$

Мы предполагаем наличие двух случаев:

- скорость перемещения волны перистальтики равна скорости движения капсулы, т.е. $a = v(t)$;
- скорость перемещения волны перистальтики больше скорости перемещения капсулы, т.е. $a \geq v(t)$.

В последнем случае будем считать, что волна сокращения уходит в бесконечность. Вслед за ней идет вторая волна сжатия, потом третья и т.д. Каждая из последующих волн сокращения осуществляет проталкивание капсулы. Очевидно, что в первом случае скорость перемещения капсулы на "гребне" первой волны больше, чем скорость перемещения капсулы во втором случае.

Распишем полученную систему как систему трех уравнений:

- для первого случая

$$\frac{ds(t)}{dt} = y(t);$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \alpha u(t, x) - \mu y(t - \tau) - F_f;$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = y^2(t) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + g(t, x);$$

- для второго случая

$$\frac{ds(t)}{dt} = y(t);$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \alpha u(t, x) - \mu y(t - \tau) - F_f;$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2(t) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + g(t, x);$$

Для этих систем необходимо задать начальные и краевые условия.

Первая система уравнений является системой нелинейных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, содержащей как обыкновенные дифференциальные уравнения, так и уравнение в частных производных.

Исследование свойств систем типа рассмотренных, особенно в условиях априорной неопределенности коэффициентов модели, является сложной математической задачей, и ее решение возможно на основе численного моделирования.

Список литературы

1. R.S. Fearing. Powering 3 Dimensional Microrobots Power Density Limitations Proceed. 1998 Tutorial on Micro Mechatronics and Micro Robotics Workshop WS5, 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium 1998. P. 1-14.
2. G. Muscato. Fuzzy Control of an Underactuated Robot with Fuzzy Microcontroller. Microprocessors and Microsystems, 23 (1999) 385-391, Elsevier, 1999.
3. Y. Utsumi. Micromachine for Medical Application. Proc of 2-nd International Workshop on Robotics and Systems, Oct. 1998, Beijing, China. P. 216-221.
4. T. Fukuda, K. Tanie, T. Mitsuoka. A New Method of Master-Slave Type of Teleoperation for Micro-Manipulator System / IEEE Proc. on Micro Robots and Teleoperators Workshop, Hyannis, Massachusetts, USA, 1987.
5. V. Gradetsky. Survey on Medical Robotics Activity in Russia. Proc. of IARP Intern. Workshop on Medical Robots, Vienna, Austria. 1996. P. 1-8.
6. Градецкий В.Г., Кравчук Л.Н., Пушкин М.М. Движение миниатюрных роботов в условиях априорной неопределенности при наличии эффектов запаздывания. М.: ИПМ РАН. Препринт № 649, 1999. С. 1-33.
7. V. Gradetsky, M. Pushin, M. Rachkov. Control motion of two-links mobile robot with flexible connections. Proc. of 4-th ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems, August, 1998, Moscow. P. 102-107.
8. V. Gradetsky, V. Veshnikov, S. Kalinichenko, A. Moiseenko. Distributed Control of Multilink Mobile Robot. Proc. of 3-rd International Mechatronic Design and Modeling Workshop, Sept. 1997. Ankara, Turkey. P. 27-40.
9. Вешников В.Б., Градецкий В.Г., Калиниченко С.В., Лопашов В.И. Системы миниатюрных роботов. М.: ИПМ РАН. Препринт № 564, 1996. С. 1-56.
10. Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике. М.: Наука, 1966. 300 с.
11. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977. 274 с.

А.М. Лестев, д-р физ.-мат. наук, проф., И.В. Попова, д-р наук, М.И. Евстифеев, Е.Н. Пятышев, канд. техн. наук, М.С. Лурье, А.А. Семенов,
АОЗТ “ГИРООПТИКА”, Санкт-Петербург,
E-mail: gyro@neva.spb.su

ОСОБЕННОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Приведены результаты математического моделирования, исследования динамики и погрешностей, ударных воздействий, разработки конструкций и отработки технологических процессов изготовления микромеханических гироскопов.

В системах управления робототехнических комплексов в качестве датчиков первичной информации все более широкое применение получают микромеханические гироскопы (ММГ). ММГ характеризуются сверхмалыми массой и габаритами, малым энергопотреблением, чрезвычайно низкой стоимостью и, вместе с тем, высокой устойчивостью к внешним воздействиям. В комплексе со спутниковыми навигационными системами, дальномерными системами и иными источниками внешней информации ММГ позволяют создавать малогабаритные инерциальные системы управления робототехнических комплексов, обеспечивающие необходимую точность определения параметров ориентации и позиционирования.

Обзор современного состояния теории и практических разработок ММГ приведен в работах [1, 2].

В настоящей статье рассмотрены конструктивные схемы ММГ, разрабатываемые АОЗТ “ГИРООПТИКА” совместно с лабораторией микротехнологии и микроэлектромеханических систем СПбГТУ (рис. 1, 2).

Конструктивные схемы ММГ

Колебания чувствительных масс в каждой из схем возбуждаются электростатическим гребенчатым виброприводом. В конструкциях приборов реализуется компенсационный (с обратной связью) режим работы. Сигналы снимаются с помощью емкостных датчиков; в системах обратной связи применены электростатические датчики силы. Электромеханические узлы ММГ рассматриваемых типов вместе с элементами вибровозбуждения колебаний, датчиками съема и преобразования полезного сигнала, элементами обратных связей формируются методами современной микроэлектроники на основе кремниевой технологии [3].

При исследовании динамики, определении собственных частот и соответствующих им форм колебаний, вынужденных колебаний и процессов их установления

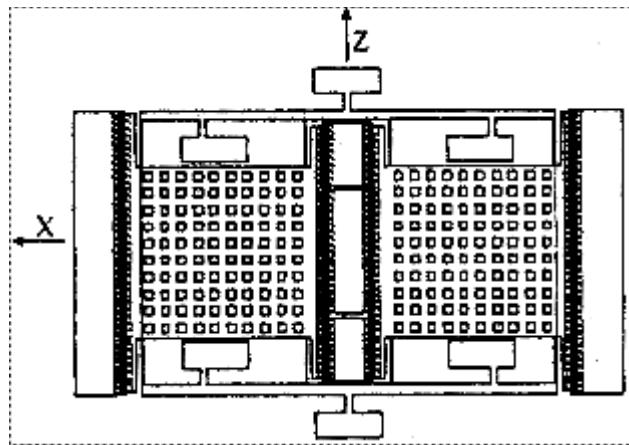


Рис. 1. ММГ с поступательным движением чувствительных масс конструкции АОЗТ “ГИРООПТИКА”

использовались модели ММГ с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Модели с сосредоточенными параметрами исследовались аналитическими методами, с распределенными – методом конечных элементов, реализуемым с использованием вычислительной системы Pro/MECHANICA. Зависимости амплитуд вынужденных колебаний чувствительных масс ММГ от частоты вибровозмущения (резонансные кривые) показаны на рис. 3. На рис. 3, а приведена резонансная кривая для ММГ с поступательными движениями чувствительных масс в окрестности собственной частоты (~ 12 кГц), соответствующей поступательным колебаниям чувствительных масс в противофазах. Для рассматриваемой конструкции ММГ амплитуда вынужденных колебаний чувствительных масс вдоль оси X (см. рис. 1) при резонансной настройке составляет ~ 25 мкм. Амплитуды вынужденных колебаний чувствительных масс вдоль осей Y и Z при этом пренебрежимо малы (измеряемая угловая скорость равна нулю).

Резонансная кривая роторного ММГ в окрестности частоты собственных колебаний (~ 5 кГц) приведена на рис. 3, б. В этой схеме амплитуда вынужденных угловых

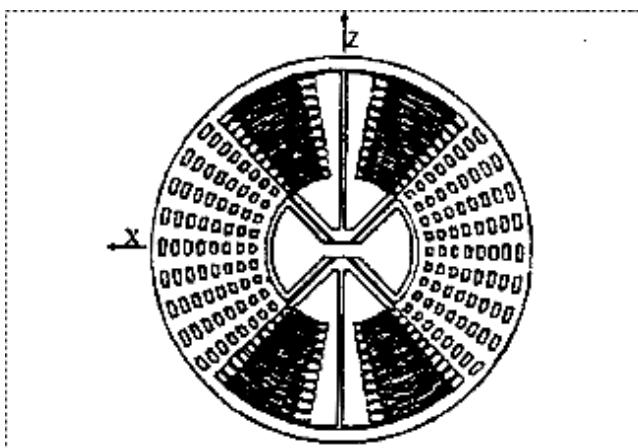


Рис. 2. Роторный ММГ конструкции АОЗТ “ГИРООПТИКА”

колебаний ротора при резонансной настройке составляет $\sim 3^\circ$. Следует отметить острый характер резонанса, объясняющийся высокой добротностью кремниевого осциллятора. Указанное обстоятельство требует применения точной резонансной настройки, заключающейся в обеспечении и поддержании в процессе работы строгого совпадения частоты вибровозбуждения с собственной частотой осциллятора. В этом состоит одна из основных проблем, возникающих при разработке ММГ. В конструкциях разрабатываемых ММГ предусмотрены контуры подстройки частот.

Погрешности ММГ вызываются технологическими погрешностями изготовления элементов прибора, реализации электронных схем, воздействиями (и обусловленными ими разбалансировками и изменением термоупругого состояния), вибрациями и ускорениями основания [4]. Основное влияние на точность ММГ рассматриваемых типов оказывают разбалансировки в плоскости, перпендикулярной плоскости чувствительных элементов (YOZ); в меньшей степени влияют разбалансировки в плоскости чувствительных элементов. Температурные погрешности ММГ вызываются изменением абсолютной температуры окружающей среды прибора, приводящим к температурным разбалансировкам и изменению динамических характеристик ММГ. Влияние изменения температуры в плоскостях XOY и XOZ на точность ММГ оказывается незначительным. Подробные качественные и количественные оценки составляющих угловой скорости дрейфа ММГ, математические модели теплового и технологического дрейфов прибора приведены в статье [4]. Отметим, что применение системы терmostатирования прибора позволяет существенно (более чем на порядок) повысить точность ММГ.

В условиях эксплуатации на высокоскоростных и высокоманевренных объектах ММГ подвергаются интенсивным ударным и вибрационным воздействиям. Как показывают расчеты перемещений, деформаций и напряжений в элементах конструкций ММГ при ударных воздействиях, выполненные с использованием модуля конечно-элементного анализа Pro/MECHANICA (версия 20), и практика испытаний артиллерийских снарядов с системами управления на основе микромеханических датчиков [5], приборы этого типа обладают высокой механической прочностью и способны выдерживать ударные воздействия в десятки тысяч g . Наиболее опасные направления ударных воздействий для гироскопа конструкции, показанной на рис. 1, – направление вдоль оси X , для гироскопа, показанного на рис. 2, – вдоль оси Y . При конструировании ММГ, предназначенных для эксплуатации в условиях интенсивных ударных и вибрационных воздействий, предусматриваются меры для повышения прочностных

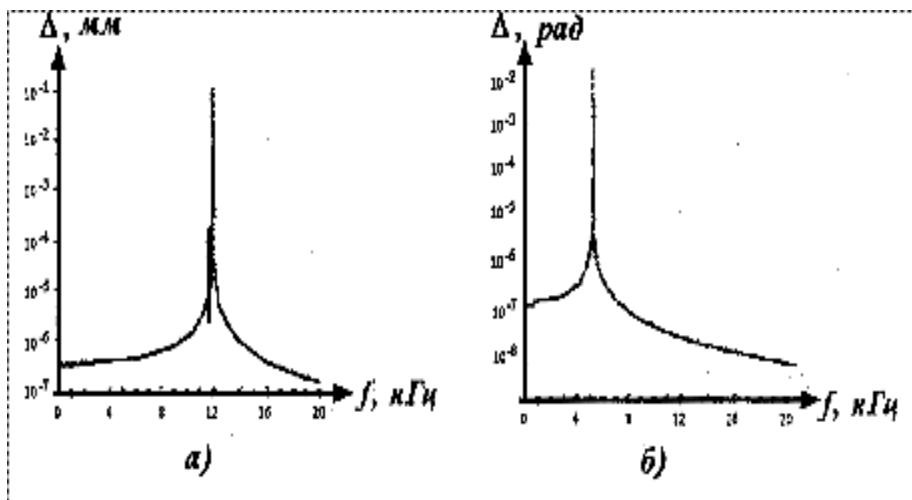


Рис. 3. Частотные характеристики ММГ:

a – с поступательным движением чувствительных масс; *b* – роторного

характеристик приборов. К ним относятся рациональное расположение упругих элементов и мест крепления, установка ограничителей перемещений элементов конструкции и др.

Следует отметить, что многие проблемы конструирования ММГ традиционны при разработках новых типов гироскопических приборов. Вместе с тем учет факторов масштабирования, использование планарных конструктивных схем и групповых микроэлектронных технологий изготовления приборов, расширение областей применения ММГ выдвигают новые проблемы конструкторско-технологического характера. К ним относятся:

- выбор расчетной схемы ММГ, наиболее полно учитывающей факторы, влияющие на технические характеристики прибора;
- оптимизация параметров ММГ, обеспечивающих требуемые соотношения между собственными частотами колебательной системы и соответствующие формы колебаний;
- подбор материалов с необходимыми физическими характеристиками;
- поиск способов уменьшения влияния технологических, температурных и иных факторов на точность и стабильность характеристик приборов;
- выбор электронных элементов с минимальным уровнем собственных шумов и др.

Технологический маршрут изготовления ММГ включает три блока операций:

- ◆ формирование многочипового рельефа кремниевой заготовки и многочиповой диэлектрической несущей платы;
- ◆ сочленение несущей платы и кремниевой заготовки, удаление необработанного массива кремния;
- ◆ разделение сборки на отдельные элементы и их корпусование.

Первый блок операций решает ключевую задачу изготовления ММГ – формирование на планарной поверхности кремниевой пластины многочипового рельефа осциллятора методом реактивного ионно-плазменного травления. Функционально значимыми в

этой технологической операции является точность воспроизведения размеров и степень вертикальности стенок вытравленных участков. При экспериментальной отработке операции плазмохимического травления в плазме, содержащей в качестве активного компонента ионы фтора, исследовались зависимости результатов от степени разрежения в камере травления, скорости протекания парогазовой смеси, удельной мощности разряда, парциального соотношения компонентов парогазовых смесей. Анализ и сравнение результатов проводились по скорости травления, степени анизотропии, стойкости маскирующего слоя к режиму травления и др. В оптимальных режимах скорость травления составила -1 мкм/мин при анизотропии 1:20. Неоднородность рисунка по площади не превышала 15 %. Изолирующая стеклянная пластина – основание ММГ – формируется методами вакуумного напыления и фотолитографии.

Основой сборочных операций являются соединение кремниевой и стеклянной заготовок и удаление балластной массы кремния между тыльной стороной кремниевой пластины и рельефом осцилляторов, сформированным на ее планарной поверхности. Возникающие здесь проблемы связаны с подбором состава стекла, обеспечивающего близкий к кремнию коэффициент температурного расширения и необходимую термостойкость, и с выбором металла токоподводки, сохраняющего свои характеристики при последующих термохимических обработках. Соединение кремниевой и стеклянной заготовок осуществляется методом электротермокомпрессионной сварки при температуре порядка 450°C и разности потенциалов $\sim 1 \text{ кВ}$. Балластный n -кремний удаляется селективным травлением планарной стороны пластины до отделения балластной части кремния от структуры осцилляторов. Сложности заключаются в разработке состава селективного травителя, не взаимодействующего с p^+ -кремнием и элементами микросхем,

но достаточно эффективно вытравливающего слой пористого кремния. Результатом рассмотренных операций является формирование кремниевых осцилляторов, приваренных контактными участками к опорным выступам стекла и шинам токоподводки.

Заключительная операция технологического маршрута изготовления ММГ состоит в дисковой резке пластины на чипы и корпусировании чипов. Отметим, что у некоторой части экспериментальных образцов ММГ обнаруживается коробление кремниевых осцилляторов, вызванное, по-видимому, внутренними напряжениями в материале кремния. В настоящее время экспериментальные образцы ММГ, разрабатываемые АОЗТ "ГИРООПТИКА", доведены до стадии корпусирования [3], проводятся их испытания, корректировка конструкции и доработка технологических процессов.

Список литературы

1. Lestev A.M., Popova I.V. Micromechanical Gyroscopes Present State in Theory and Practice // 5-th St. Petersburg International conf. on integrated navigation systems, May 1998. P. 173-182.
2. Лестев А.М., Попова И.В. Современное состояние теории и практических разработок микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация, 1998. № 3 (22). С.81-94.
3. Разработка и исследование микромеханического гироскопа / А.М. Лестев, И.В. Попова, Е.Н. Пятышев, М.С. Лурье, А.А. Семенов, М.И. Евстифеев // Гироскопия и навигация, 1999. № 2 (25). С. 3-10.
4. Влияние температурных и технологических факторов на точность микромеханических гироскопов / В.Э. Джашитов, А.М. Лестев, В.М. Панкратов, И.В. Попова // Гироскопия и навигация, 1999. № 3 (26). С. 3-16.
5. Гай Э. Наводящиеся снаряды с инерциальной навигационной системой на микромеханических датчиках, интегрированной с GPS // Гироскопия и навигация, 1998. № (22). С.72-81.

НОВАЯ КНИГА

Автономные необитаемые подводные аппараты / Под общ. ред. акад. М.Д. Азееева. Владивосток: Дальнаука, 2000. 272 с.

Рассмотрены проблемы и достижения, связанные с созданием и практическим использованием необитаемых подводных аппаратов для исследования и освоения океана. Представлены основные зарубежные и отечественные глубоководные аппараты и обобщен опыт Института проблем морских технологий ДВО РАН по созданию АНПА на основе модульной технологии.

Описаны состав и структура систем, организация бортовой вычислительной сети и программная среда, задачи и методы управления движением, навигационное обеспечение и научно-исследовательский комплекс.

Особое внимание уделяется вопросам перспективного развития АНПА и создания автоматизированной сети океанографических измерений на основе аппаратов с солнечной энергетикой.

Книга предназначена для специалистов в области морских технологий, океанологии, подводной робототехники, гидроакустики и мониторинга водной среды.

УДК 681.7

А.П. Бартоломеев, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Г.Н. Воробьев, канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, В.П. Кулик, 000 "Дистех", Л.А. Соломонов, канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, А.С. Тельчак, канд. техн. наук, НТЦ ОАО "Красногорский завод им. С.А.Зверева"

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Рассмотрена концепция построения гибких дистанционных измерительных комплексов, обеспечивающих надежное и быстрое измерение геометрических параметров объектов даже в неблагоприятных условиях окружающей среды.

Статья посвящена исследовательским работам, сформировавшимся к настоящему времени в Программу "Создание и развитие технологии дистанционных измерений" (ТДИ), проводимую с 1992 г. творческим коллективом, включающим МГТУ им. Н.Э. Баумана, НТЦ ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева" и ООО "Дистех".

Побудительными причинами можно считать ряд нерешенных комплексных задач обеспечения измерения и контроля машиностроительного производства, транспорта, монтажа крупногабаритных объектов, спасательных работ при чрезвычайных ситуациях, монтажа, сборки истыковки космических станций, экспериментальных исследований и т.п., связанных с измерением и контролем линейных и угловых величин современными измерительными средствами.

Существующие высокоточные измерительные системы - трехкоординатные измерительные машины разработки ведущих зарубежных и отечественных фирм OPTON (MC 550, MC 850, ZMC), Zeiss и KOMTG(C 400, C 700), ЦНИТИ (КИМ-400М, КИМ-900Р, КИМ-900РМ), АО "ЛАПИК" (КИМ-500, КИМ-750, КИМ-1000) обеспечивают как в ручном, так и в автоматическом режиме измерение линейных размеров деталей сложной геометрической формы с труднодоступными полостями.

В основу метрологической схемы этих разработок заложен метод точечного касания. Съем информации осуществляется как механическим (щупы RST), так и оптическим (лазерно-триангуляционный щуп LTP 60) касанием поверхности детали. Пространственное положение точки касания рассчитывается по перемещению подвижных элементов координатно-измерительной машины (КИМ) системой цифрового измерения этих перемещений, например, цифровой системой измерения линейных перемещений ФОКОСИН (фирмы OPTON), в которой сигналы о перемещении по каждой из трех осей контролируются с помощью электронной растро-

вой системы и интерполируются до разрешающей способности $h = 0,5 \text{ мкм}$. На подвижной штанге, перемещение которой контролируется системой измерения линейных перемещений, устанавливается измерительная трехмерная щуповая головка, работающая со статическим съемом измеренных значений или в режиме сканирования.

Параметры щуповой головки

Длина щупов, мм	60-90
Воспроизводимость касания, мкм	0,15
Измерительное усилие при съеме данных механическим щупом	<0,01
Самый маленький шарик щупа	0,5

Высокая разрешающая способность ($0,5 \text{ мкм}$) в измерительных машинах обеспечивается, главным образом, за счет конструктивных решений.

Станина КИМ, располагаемая на основании, находится в динамически устойчивом состоянии благодаря системе уравновешенного пневматического виброгашения. Она несет портал с поперечными салазками и пинолью, а также стойку привода центрального портала. Все направляющие элементы, такие как станина, поперечная перекладина и пиноль, изготавливаются из отборного гранита мельчайшей структуры, обладают правильной формой и высокой жесткостью на изгиб. На их точно доведенные поверхности с помощью износустойчивых подшипников, лишенных трения, опираются салазки с большими базами направляющих. За счет этого достигается прямолинейность движения салазок, прямоугольный ход которых относительно друг друга подвергается точной юстировке. Допустимое отклонение от перпендикулярности любых осей относительно корректирующей прямой $<1^\circ$.

Пространственное измерение размеров, выполняемое методом точечного касания, осуществляется системой, включающей координатно-измерительную машину, ЭВМ и математическое обеспечение.

Универсальное математическое обеспечение (например, UMESS фирмы Zeiss) позволяет измерять широкий спектр комплексных деталей и решать самые различные метрологические задачи. Оно совместимо с КИМ, использующими метод точечного касания, и программами (например, КИМ, U-SOFT) для автоматического измерения различных поверхностей произвольной формы.

Конструкторские решения, математическое обеспечение, программное обеспечение позволили достичь в технике трехкоординатных измерений определение расстояний (L , мм) между двумя точками на детали, включая ощупывание, с погрешностью Δ , определяемую зависимостью:

$$\Delta = (3,5 + L/200) \text{ мкм в зоне } 380 \text{ мм} \times 450 \text{ мм} \times 300 \text{ мм},$$

$$\Delta = (4,0 + L/200) \text{ мкм в зоне } 700 \text{ мм} \times 1000 \text{ мм} \times 600 \text{ мм},$$

При наличии системы автоматического учета температуры окружающей среды в пространстве и по времени достигается высокая разрешающая способность ($0,2 \text{ мкм}$), что соответствует абсолютной (Δ) и относительной (δ) погрешности для:

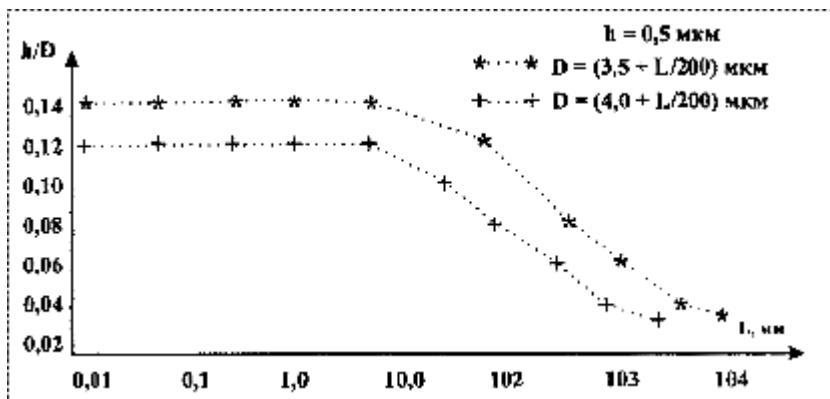


Рис. 1

$$L = 5 \text{ мм} \quad \Delta = 3,52 \text{ мкм или } \delta = 0,07\%$$

$$L = 250 \text{ мм} \quad \Delta = 4,75 \text{ мкм или } \delta = 0,002\%$$

$$L = 1000 \text{ мм} \quad \Delta = 9,52 \text{ мкм или } \delta = 0,001\%$$

Погрешность измерения расстояния между двумя точками на детали существенно отличается от точности измерения перемещения щупа вдоль каждой из координат трехкоординатной измерительной системы.

Приведенные результаты достигнуты при использовании измерительных устройств, обеспечивающих получение информации для расчета расстояния между точками касания с разрешающей способностью, равной $h = 0,5$ мкм.

Однако достигнутый в последние годы прогресс в области измерений позволяет изменить концепцию построения измерительных систем.

Измерительная техника как научная дисциплина за последнее десятилетие подверглась качественным изменениям вследствие необходимости решать задачи построения новых сложных систем научного эксперимента и систем комплексной автоматизации технологических процессов. Эти изменения стали возможны благодаря развитию теории и методики обработки измерительной информации с применением вычислительной техники.

Подтверждением этому может служить тот факт, что фирмы, которые в свое время успешно проводили измерения с помощью традиционных измерительных средств, обратились к бесконтактным лазерным измерительным устройствам. Производители измерительных устройств (CyberOptics, Laser Design Inc. из Миннеаполиса; Cuberware из Монтеррея, штат Калифорния; Tetra Precision из Гейнсвил, штат Флорида; Riegl USA Inc. из Орландо и др.) полагают, что в ближайшие годы около 80% этих устройств будут оптическими.

Для оценки перспектив развития **технологии дистанционных измерений**, т.е. бесконтактного способа определения пространственного положения измерительного щупа, предлагается ввести понятие *коэффициента использования разрешающей способности* (КИРС) измерительной системы - отношения потенциальной

разрешающей способности h к абсолютной погрешности Δ , позволяющего проводить комплексную сравнительную оценку возможностей измерительных систем.

Сравнение координатно-измерительных систем по КИРС дает представление о потенциальных возможностях способов определения координат точек касания (концевой точки щупа). На рис. 1 представлена зависимость КИРС от измеряемых размеров для КИМ фирмы Carl Zeiss.

На рис. 1 видно, что высокая разрешающая способность измерительной системы трехкоординатных машин не реализуется при больших расстояниях между точками касания поверхности детали.

В принципе задача измерения размеров деталей сложной формы методом точечного касания решена. Разработаны измерительные машины и измерительные щупы (с механическим и оптическим "ощупыванием"), математическое и программное обеспечение трехкоординатных измерений. Однако механический контроль положения и перемещения измерительного щупа по поверхности детали предъявляет высокие требования к перемещающимся узлам измерительных машин.

Освоение технологии дистанционных измерений, обеспечивающей бесконтактное определение пространственного положения щупа, позволит расширить возможности измерительных средств.

В основу концепции дистанционных измерительных систем (ДИС) положен принцип бесконтактного измерения положения и ориентации объекта в пределах измерительного поля (с высоким пространственным разрешением), формируемого лазерными полупроводниками излучателями, работающими в импульсном режиме, длина волны излучения которых лежит в пределах 875-920 нм. Размер измерительной зоны луча, закон изменения ее по дальности, конструкция и поле зрения приемной аппаратуры зависят от требований к конструкции и характеристик объекта.

ДИС обеспечивают косвенное измерение пространственного положения и определения ориентации объекта по характерным — реперным точкам (РТ), расположенным непосредственно на объекте. Координаты реперных точек определяются в некотором, формируемом лазерным излучением, поле измерения (ПИ), перемещающемся в пределах зоны измерения (ЗИ).

Разрабатываемые дистанционные измерительные средства высокой точности, сопряженные с ПЭВМ, предназначены для измерений линейных и угловых параметров объекта по патентно защищенной технологии [1, 2] с использованием методов статистического анализа.

Принцип действия дистанционных измерительных средств, обеспечивающих высокоточные измерения положения и ориентации объекта, поясняется рис. 2.

На стенде устанавливается информационный передающий блок (ИПБ) в состав которого входят: формирователь измерительного поля (ФИП); высоко-

точный привод (ПРВТ), осуществляющий наведение центра измерительного поля (ИП) на объект измерения. ПРВТ и ФИП обеспечивают формирование зоны измерения (ЗИ) требуемых для решения данной задачи размеров.

Информационный приемный блок (ИПРБ) устанавливается на объекте измерения. Аппаратура ИПРБ должна определять угловое положение и линейное смещение объекта в системе координат измерительного поля косвенным совокупным измерением координат реперных точек (РТ), которые конструктивно компонуются в блок реперных точек (БРТ). Параметры взаимного положения РТ

и самого БРТ относительно объекта априорно известны с высокой точностью. Оптические сигналы в реперных точках преобразуются в электрические импульсы и обрабатываются вычислителем, а по восстановленным проекциям текущего углового положения сканирующих полос, формирующих измерительное поле, определяются координаты объекта в системе координат ИПБ.

За результат измерения, полученного с помощью дистанционного измерительного средства, принимается среднее арифметическое результатов единичных наблюдений.

В основе дистанционных измерений координат и определения ориентации объекта относительно ИПБ лежит принцип косвенного совокупного измерения. В пределах измерительного поля ИП (рис. 3), формируемого двумя сканирующими в ортогональных направлениях плоскими лазерными лучами и направленного на объект, определяются координаты реперных точек БРТ, однозначно связанного с объектом. Угол расходимости излучения фиксируется с высокой точностью.

Формирование зоны измерения (ЗИ) требуемых для решения конкретной задачи размеров обеспечивает высокоточный привод (ПРВТ), в котором используются высокоточные инкрементные датчики угловых перемещений (разрешающая способность датчика ЛИП-30 до 72 0000 дискрет/оборот).

Прием лазерного излучения (в пределах ИП) осуществляют светочувствительные элементы - реперные точки (РТ), расположенные на объекте измерения. Так как параметры взаимного положения РТ должны быть априорно известны с высокой точностью, РТ конструктивно компонуются в блок реперных точек (БРТ). Сигнал с засвеченной реперной точки обрабатывается

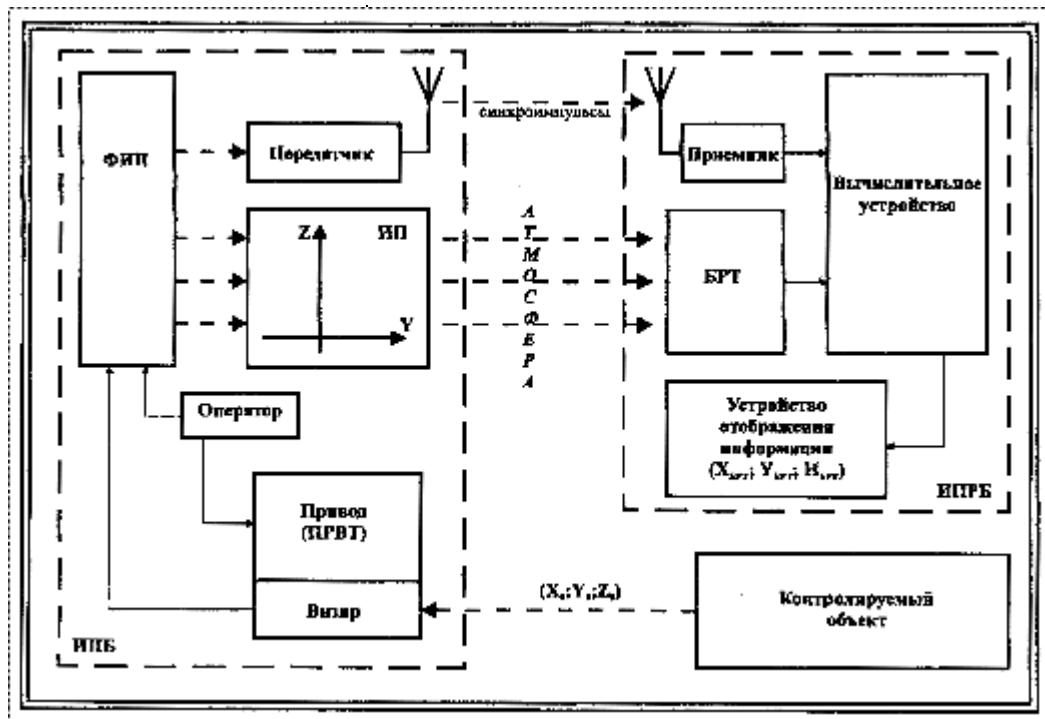


Рис. 2

вычислителем, где по восстановленным проекциям для текущего углового положения сканирующей полосы лазерного луча определяются координаты каждой точки.

Для повышения информативности БРТ, в зависимости от которой находятся возможности и результаты осреднения входной и результирующей информации и фильтрации ошибок измерения, объемной фигурой, связывающей РТ в БРТ, выбрана правильная треугольная пирамида, в вершинах которой располагаются реперные точки (рис. 3). Четыре реперные точки обеспечивают измерение ориентации четырех граней пирамиды, что позволяет с помощью вычислений выполнить минимизацию частных ошибок единичных измерений ориентации главной оси пирамиды, однозначно связанной с ориентацией объекта.

Ожидаемые точностные характеристики предлагаемых дистанционных измерительных средств:

- предельная погрешность линейных измерений (мкм)

$$5 + (L/50) \times \sqrt{1+2D} ;$$
- предельная погрешность угловых измерений (миллирад)

$$3 \times \sqrt{1+2D} ,$$

где (с учетом нормирующих коэффициентов) L - размер стороны зоны измерений (мм); L может устанавливаться от 0,01 до 10,0 м; D - расстояние до объекта измерения, может устанавливаться от 1,0 до 40000,0 м.

Имеется возможность уменьшения погрешностей за счет усложнения алгоритмов обработки первичной информации.

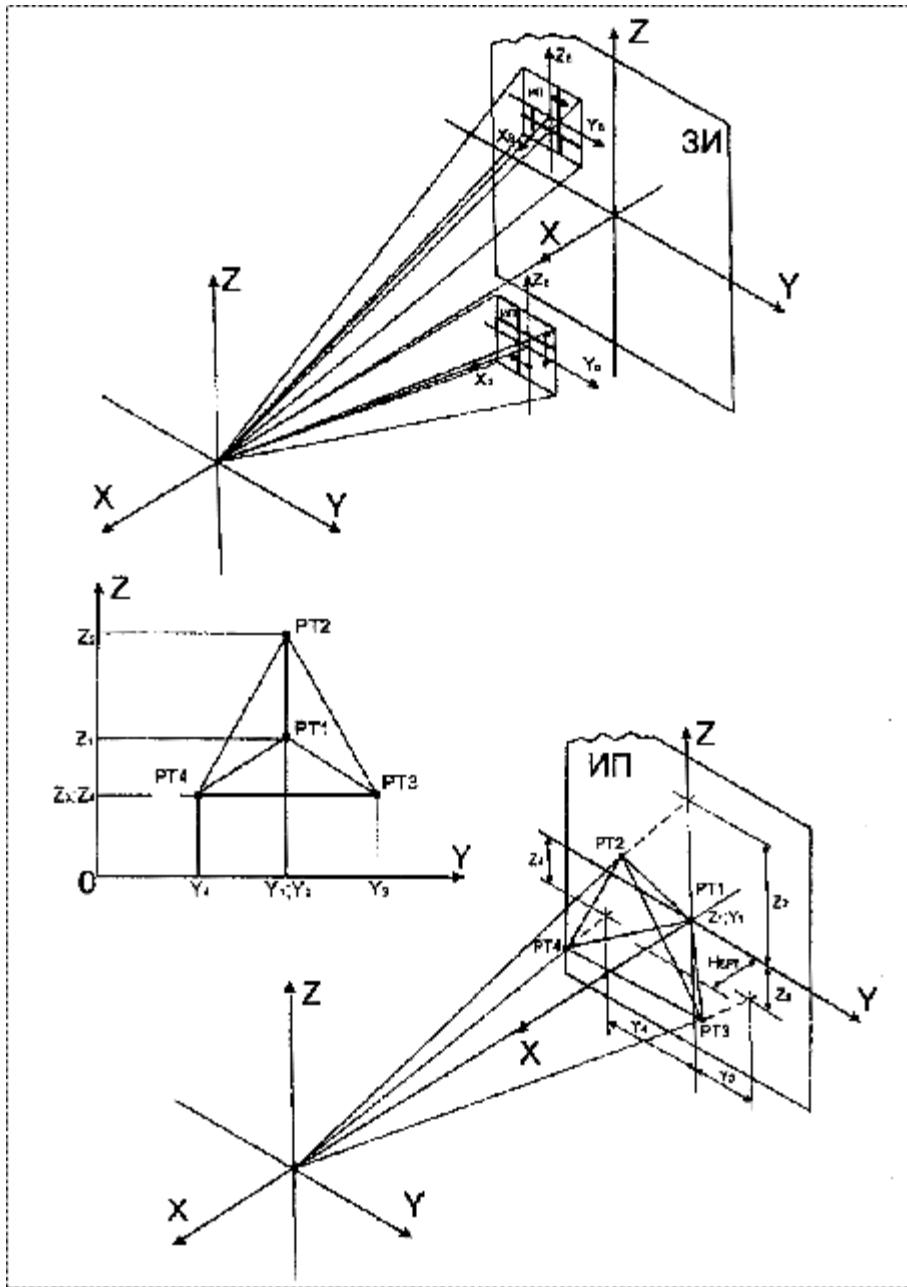


Рис. 3

Выводы

Предлагаемая технология дистанционных измерений при использовании в ДИС высокоточных инкрементных датчиков, высокочастотных лазерных полупроводниковых излучателей, быстродействующих современных вычислительных средств позволяет формировать измерительное поле (ИП) 10×10 мм с разрешением в доли микрометров, что при соответствующей обработке принятых реперными точками (РТ) сигналов обеспечивает точность определения координат центра РТ с ошибкой менее 1 мкм.

Обработка информации с БРТ обеспечивает точность определения угловых координат ориентации БРТ с ошибкой в единицы угловых секунд. Угловая ошибка не зависит от L , а зависит от отношения размеров БРТ и ИП.

Одновременное (за время одного прохода сканирующего луча) определение положения и ориентации двух БРТ,

установленных на разных объектах и находящихся в одном ИП, позволяет избежать ошибок, возникающих при последовательном измерении.

Заключение

При разработке концепции дистанционных измерений учитывалось многообразие задач, встречающихся в технике пространственных измерений.

Результаты разработки могут использоваться при создании многофункциональных координатно-измерительных комплексов, аналогов координатно-измерительных машин серии КИМ, при создании дистанционных измерительных средств, обеспечивающих:

- измерение геометрических величин взаимного расположения перемещающихся объектов;

- измерение геометрических величин взаимного положения деталей корпуса летательного аппарата в полете;

- измерение геометрических величин взаимного положения инструмент - деталь в процессе обработки;

- измерение межцентровых расстояний сквозных отверстий плоских деталей;

- точное совмещение шаблонов при изготовлении изделий микроэлектронной техники;

- измерение геометрических величин взаимного расположения стыковочных узлов сборочных деталей, недоступных для визуального контроля, "слепой монтаж";

- точную посадку беспилотного вертолета ночью и в сложных метеоусловиях;

- измерение геометрических величин взаимного расположения артиллерийских установок относительно выбранной измерительной системы координат (цели);

- определение точки наведения оружия;

- измерение геометрических величин взаимного положения деталей и узлов при сборке орбитальных станций в космических условиях;

- измерение геометрических величин положения шлема оператора относительно кабины летательного аппарата;

- измерение геометрических величин взаимного положения деталей роботов и манипуляторов;

- наведение пожарного вертолета на очаг возгорания и другие задачи, связанные с измерениями и наведением.

Список литературы

- Бартоломеев А.П., Березин Г.Д., Бредихин Д.Г., Жирков В.Ф., Зайцев А.В., Кулик В.П., Мамаев В.А., Сидоренко В.Ф., Соломонов Л.А. Патент РФ № 2049980 на Изобретение "Устройство для определения координат точек поверхности объектов". М.: Изобретения. 1995. 242 с.

- Бартоломеев А.П., Березин Г.Д., Бредихин Д.Г., Жирков В.Ф., Зайцев А.В., Кулик В.П., Мамаев В.А., Сидоренко В.Ф., Соломонов Л.А. Патент РФ № 2074387 на Изобретение "Способ измерения координат точек поверхностей исследуемых тел щупом". М.: Изобретения. 1997.203 с.

УДК 541.183.5

С.И. Касаткин, канд. техн. наук,
Т. Мейдан,
А.М. Муравьев, канд. техн. наук,
Ф.Ф. Попадинец, Институт проблем управления РАН,
П.И. Никитин, канд. физ.-мат. наук. Институт общей
 физики РАН, **Ф.А. Пудонин**, канд. физ.-мат. наук,
 Физический институт РАН

СПИН-ТУННЕЛЬНЫЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ДАТЧИКИ С FeMn ФИКСИРУЮЩИМ СЛОЕМ

Рассмотрены элементы на основе спин-туннельного магниторезистивного эффекта. Описаны теоретические и экспериментальные исследования спин-туннельных структур.

Введение

В настоящее время большой практический интерес представляют элементы на основе структур со спин-туннельным магниторезистивным (СТМР) эффектом, проявляющимся при малых магнитных полях. Разработка элементов, использующих этот эффект, имеет большое значение, так как позволяет резко увеличить плотность записываемой и считываемой информации, чувствительность элементов, а также создавать новые устройства - СТМР-транзисторы [1].

Многослойные тонкопленочные магниторезистивные (МР) элементы обладают энергонезависимостью в режиме хранения и неограниченным числом циклов перезаписи (для запоминающих элементов), радиационной стойкостью, широким температурным и частотным диапазонами, а также весьма важным свойством, присущим только элементам, основанным на гигантском МР эффекте, - возможностью уменьшения их размеров до 0,1 мкм. Последнее является особенно существенным фактором при создании запоминающих устройств с произвольной выборкой (ЗУПВ) новых поколений, так как позволяет рассчитывать на плотность информации до 10^7 бит/мм². Подобным сочетанием свойств не обладают полупроводниковые элементы и устройства, основанные на МР эффекте в толстых пленках, на эффекте Холла.

Для СТМР-структур величина эффекта при нормальной температуре достигает 45% [2, 3].

СТМР-структура имеет следующий вид:

$$M_l / D / M_h / FL,$$

где $M_{l,h}$ - магнитные пленки с различными полями перемагничивания с магнитной напряженностью H_l, H_h , D - разделительный диэлектрический слой, FL - фиксирующий слой, увеличивающий напряженность H_h , прилежащей к нему магнитной пленки.

В качестве магнитных слоев обычно используют пермалloy, CoFe, FeNiCo и др., в качестве диэлектрика - Al_2O_3 , а для FL применяется $Fe_{50}Mn_{50}$.

Зависимость изменения сопротивления ΔR исходной структуры с сопротивлением R от угла φ между векторами намагниченности $M_{h,l}$ магнитных пленок имеет вид

$$\Delta R = 0,5(\Delta\rho/\rho)R(1-\cos\varphi).$$

Минимальное и максимальное сопротивления СТМР-структур соответствуют параллельному $\uparrow\uparrow$ и антипараллельному $\uparrow\downarrow$ расположению векторов $M_{h,l}$ в соседних магнитных пленках. Особенности СТМР-эффекта - это протекание туннельного (сенсорного) тока через многослойную структуру ортогонально плоскости пленок и высокое сопротивление туннельного перехода, что приводит к малой силе сенсорного тока.

К настоящему времени авторам известна одна разработка СТМР-датчика - фирмы NVE [4]. Сотрудники фирмы разработали СТМР-структурь типа

$$FeNiCo(12,5 \text{ нм})/Al_2O_3(1,5-2,5 \text{ нм})/CoFe(7 \text{ нм})$$

и

$$FeNiCo(12,5 \text{ нм})/Al_2O_3(1,5-2,5 \text{ нм})/\\CoFe(7 \text{ нм})/Ru(0,9 \text{ нм})/CoFe(7 \text{ нм})/FeMn(12 \text{ нм})$$

с СТМР-эффектом 25% в первой структуре и 20% - во второй, с чувствительностью 3 %/Э.

Первая структура характеризуется высоким гистерезисом и нелинейностью. Введение антиферромагнитного слоя FeMn приводит к уменьшению гистерезиса, увеличению чувствительности и улучшению линейности. Оценка максимальной чувствительности СТМР датчика на основе второй структуры (с FeMn) составляет 10^{-8} Э в полосе частот $\Delta f = 1$ Гц. В мире активно ведутся работы по разработке запоминающих элементов для МР запоминающих устройств с произвольной выборкой [5].

Экспериментальные исследования спин-туннельных структур

Нами созданы и исследованы многослойные тонкопленочные структуры с разделительным диэлектрическим слоем Al_2O_3 и с комбинациями соседних магнитных пленок из магнитных сплавов: $Co_{68}Fe_5Si_{12}B_{15}$ и $Fe_{19}Ni_{81}$, Co и $Fe_{19}Ni_{81}$, $Co_{90}Fe_{10}$ и $Fe_{15}Ni_{65}Co_{20}$, Co и $Fe_{15}Ni_{65}Co_{20}$ и с двумя одинаковыми $Fe_{15}Ni_{65}Co_{20}$ пленками. Структуры напылены на подслое Ti толщиной 80-200 нм и защищены сверху слоем из Ti толщиной около 3 нм [6,7]. В данной статье приводятся результаты исследования СТМР-структур с FeMn фиксирующим слоем.

СТМР-структура в общем случае имеет вид:

$$Ti(80-200 \text{ нм})/Fe_{19}Ni_{81}(5-8 \text{ нм})/$$

$$Al_2O_3(1,5 \text{ нм})/Fe_{19}Ni_{81}(5-8 \text{ нм})/$$

$$Fe_{50}Mn_{50}(15 \text{ нм})/Fe_{19}Ni_{81}(1 \text{ нм})/Ti(3 \text{ нм})$$

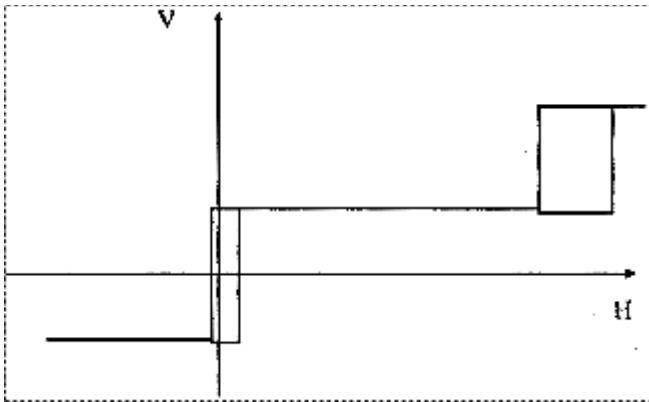
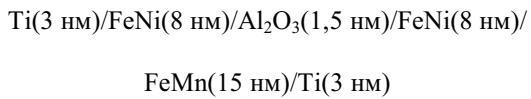


Рис. 1. Петля гистерезиса СТМР-структуры с пленкой FeMn

Изготовлена она методом магнетронного распыления в постоянном магнитном поле на окисленной Si подложке.

Проведенные нами ранее исследования структур FeNiCo/FeMn показали недостаточное увеличение у них напряженности H_c , поэтому основное внимание было обращено на получение структур FeNi/FeMn.

Наилучшие результаты показала следующая структура:



Петля гистерезиса (ПГ) этой структуры имеет вид суммы двух ПГ: слабо сдвинутой ПГ свободной пермаллоевой пленки (благодаря взаимодействию с фиксированной пермаллоевой пленкой) и сильно сдвинутой ПГ фиксированной пермаллоевой пленки (из-за взаимодействия с пленкой FeMn) (рис. 1). Структура обладает следующими характеристиками: коэрцитивная сила свободной пермаллоевой пленки $H_{c, free} = 3,5 \text{ Э}$; коэрцитивная сила фиксированной пермаллоевой пленки $H_{c, fix} = 10 \text{ Э}$; обменное поле между свободной пермаллоевой пленкой и структурой FeNi/FeMn $H_{d, per} = 1 \text{ Э}$; обменное поле в структуре FeNi/FeMn $H_{d, per} = 50 \text{ Э}$.

Было исследовано влияние дополнительных монослоев Ti, напыленных по обе стороны Al₂O₃, на перемагничивание СТМР-структур. Введение монослоев Ti приводит к двух-, трехкратному уменьшению H_c свободной и фиксированной пермаллоевых пленок, что говорит об увеличении однородности этих магнитных пленок и улучшении их качества. Величины обменного взаимодействия изменяются мало. Такое сильное влияние монослоев на перемагничивание структур позволяет надеяться и на их влияние на СТМР-эффект.

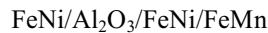
Теоретические исследования спин-туннельного перехода

Разработка многослойных тонкопленочных СТМР-переходов в силу своей новизны и большого объема

работ требует использования разносторонних методов исследования, позволяющих ускорить создание элементов.

Теоретический анализ статических и динамических характеристик СТМР-переходов позволяет оценить не только работоспособность элемента, но и влияние технологических факторов, в первую очередь - разброса магнитных, топологических и электрических параметров, провести оптимизацию СТМР-структур и конструкций, выявить новые функциональные возможности. Это резко повышает научный уровень исследований, дает возможность оценить перспективность избранного направления исследований, сокращает объем экспериментальных и технологических работ, обеспечивает возможность приближения характеристик изделий к оптимальным, ускоряет и удешевляет их разработку.

Авторами на основе теории микромагнетизма и решения уравнения Ландау - Лившица для движения магнитного момента применительно к многослойным МР структурам конечных размеров разработаны методы анализа теоретических статических и динамических характеристик СТМР-переходов и датчиков [7]. В качестве модели распределения $M_{h,l}$ магнитных пленок принято однородное распределение по всему объему пленки. После анализа результатов, полученных в мире, и нашего собственного опыта разработки многослойных МР запоминающих элементов и датчиков магнитного поля, можно предположить, что наиболее перспективными магнитными структурами будут структуры с минимальным гистерезисом и максимально различающимися H_c . К ним относятся структуры с FeMn FL. Свободными пленками в этом случае могут быть пленки FeNi и FeNiCo. Из-за существующих у нас в настоящее время технологических ограничений в качестве свободной и фиксируемой пленок мы смогли использовать только пары одинаковых пленок: или только пермаллой, или только FeNiCo. Как отмечено выше, для структур с FeNiCo пленками нам не удалось получить требуемого увеличения H_c . В связи с этим мы будем анализировать СТМР-переходы на основе структур с пермаллоем и FeMn FL:



Статические характеристики вход-выход. Основной характеристикой СТМР-перехода является его отклик на внешнее магнитное поле H , направленное в плоскость магнитных пленок перпендикулярно к их оси легкого намагничивания (ОЛН). В этом случае при правильно выбранных магнитных пленках должен преобладать процесс перемагничивания за счет вращения $M_{h,l}$, что уменьшает гистерезис.

Возможны два варианта расположения МР полосок: параллельно и перпендикулярно ОЛН. Оба варианта применяются для запоминающих элементов и датчиков. Экспериментальные исследования показали, что наилучшие результаты для СТМР-структур соответствуют минимально возможной толщине МР пленок, составляющей около 5 нм. Для анализа величина СТМР-эффекта принята равной 20 %, поле магнитной анизот-

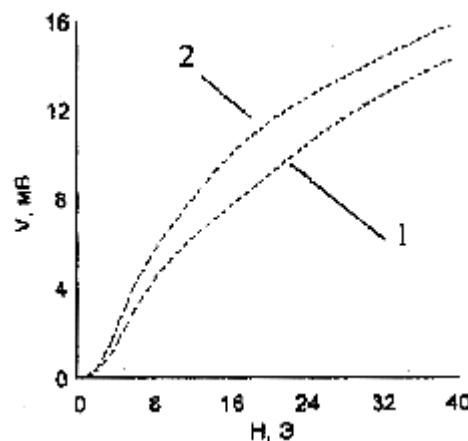


Рис. 2. Характеристики вход - выход СТМР-перехода с размерами полоски, параллельной ОЛН:
1-8×32 мкм; 2-14×42 мкм

ропии $H_{k, free} = 5$ Э, $H_{k, fix} = 50$ Э, напряжение питания 0,1 В. Рассматриваются СТМР-полоски двух размеров: 8×32 и 14×42 мкм (размеры выбраны на основании анализа результатов как наших, так и зарубежных исследований).

МР полоска параллельна ОЛН. На рис. 2 приведены характеристики вход-выход СТМР-перехода с FeMn FL с размерами полоски 8×32 мкм (кривая 1) и 14×42 мкм (кривая 2). Переход с большими размерами обеспечивает больший сигнал и чувствительность (около 21,5 мВ/(В·Э) и 14,5 мВ/(В·Э)) при меньшем поле смещения H_s (5,5 Э и 7 Э).

МР полоска перпендикулярна ОЛН. На рис. 3 приведены характеристики вход-выход СТМР-перехода с FeMn FL с размерами полоски 8×32 мкм (кривая 1) и 14×42 мкм (кривая 2). Характер зависимостей не изменился, хотя перемагничивание происходит при меньших полях, что объясняется различием в величинах размагничивающих полей. Максимальные чувствительности СТМР-переходов достигают 32 и 38 мВ/(В·Э) при

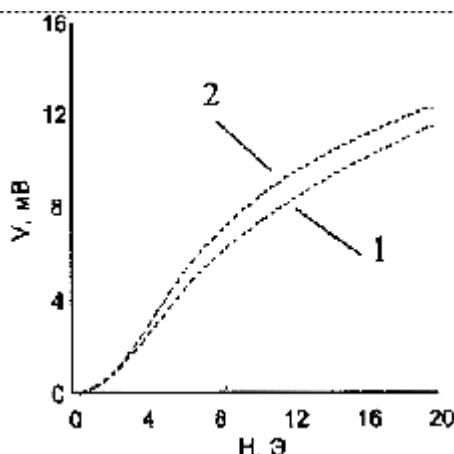


Рис. 2. Характеристики вход - выход СТМР-перехода с размерами полоски, перпендикулярной ОЛН:
1-8×32 мкм; 2-14×42 мкм

полях смещения 4,0 и 3,5 Э. Несмотря на более высокую чувствительность подобные структуры применяются только в комбинации во структурами с ОЛН вдоль полоски в датчиках с четной характеристикой [6] из-за большого гистерезиса.

Подводя итоги проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что от СТМР-датчиков, базирующихся на СТМР-переходах, можно получить чувствительность, более чем на порядок превосходящую чувствительность МР-датчиков, а также о возрастании их чувствительности с увеличением ширины МР-полосок.

Динамические характеристики. Частотные характеристики СТМР-перехода анализировались для слабого высокочастотного (ВЧ) магнитного поля $h = 0,01$ Э, много меньшего H_k . Ввиду слабой зависимости характеристик от размеров полосок рассмотрен переход с размерами 14×42 мкм, ВЧ магнитное поле направлено поперек ОЛН.

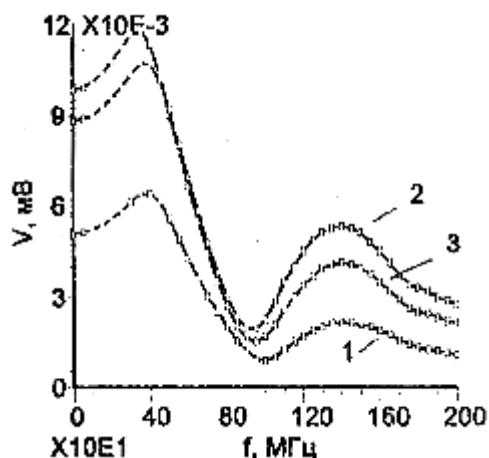


Рис. 2. Частотные характеристики СТМР-перехода для:
1- $H_s = 2$ Э; 2- $H_s = 4$ Э; 3- $H_s = 6$ Э

Анализ показал, что частотные характеристики СТМР-перехода почти не зависят от направления ОЛН и в сильной степени зависят от дополнительного постоянного магнитного поля смещения H_s направленного поперек ОЛН. На рис. 4 приведены частотные характеристики СТМР-перехода (14×42 мкм) с FeMn FL для $H_s = 2, 4$ и 6 Э. Максимальный сигнал соответствует $H_s = 4$ Э, чувствительность достигает 12 мВ/(В·Э). Пик характеристики приходится на 350 МГц и слабо зависит от поля смещения. Поля смещения, соответствующие максимальной чувствительности, в статической и динамической характеристиках несколько отличаются.

Экспериментальные исследования

Нами предложена структура СТМР-перехода, отличающаяся от существующих переходов наличием дополнительного немагнитного проводника, расположенного

женного между изолирующим слоем, отделяющим Si подложку от СТМР-структуры, и нижней МР-пленкой. Введение этого проводника позволяет:

- упростить формирование СТМР-перехода, так как нижняя магнитная пленка перестает выполнять функцию нижнего контакта, что позволяет ей иметь общую с верхними слоями топологию;
- использовать в качестве диэлектрического слоя, отделяющего Si подложку от СТМР-перехода, обычный SiO_2 , а не нитрид кремния. Тогда защитные свойства металла проводника препятствуют проникновению O_2 в сверхтонкие МР-пленки.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в качестве дополнительного нижнего проводникового слоя наиболее подходит Ti [7]. Нами были получены экспериментальные образцы подобных СТМР-переходов, показавшие наличие эффекта [7]. На основе полученных СТМР-переходов был разработан датчик с нечетной характеристикой, представляющий собой мостовую схему из четырех СТМР-переходов с продольным относительно ОЛН расположением МР-полосок. Принцип действия такого датчика и его теоретические характеристики описаны в [6]. Получены первые экспериментальные образцы СТМР-переходов и датчиков, показавшие при сенсорном токе 30 мА наличие эффекта до десятков процентов. К сожалению, с увеличением напряжения питания происходит уменьшение эффекта.

В результате проведенных работ разработаны, изготовлены и исследованы экспериментальные СТМР-переходы и датчики микронных размеров с нечетной характеристикой с FeMn FL . Образцы показали наличие СТМР-эффекта в десятки процентов при типичном сенсорном токе 30 мА. Величина эффекта уменьшается с ростом напряжения питания. Основные проблемы, требующие решения, - однородность и повторяемость параметров магнитных и диэлектрических слоев.

Список литературы

1. Tondra M., Wang D., Daugton J.M. Magnetoresistive characteristics of Scotky-Tunnel hot electron spin transistors // Digests Conf. Intermag'99.1999.P. FC-04.
2. Parkin S.S. Spin dependent tunneling and its application to nonvolatile magnetic random access memory // Digest Conf. MMM-98.1998 P.GA-03.
3. Parkin S.S. et al Exchange-biased magnetic tunnel junctions and application to nonvolatile magnetic random access memory // J. Appl. Phys. 1999.V.85.P.5828-5833.
4. Tondra M., Dauhant J.M., Wang D. et al. Picotesia field sensor design using spin dependent tunneling devices // J. Appl. Phys. 1998. V.83. N.11.P.6688-6690.
5. Васильева Н.П., Касаткин С.И. Новые запоминающие элементы на основе спин-тунNELьных магниторезистивных структур // Автоматика и телемеханика.2000.№ 1.С.165-177.
6. Kasatkin S.I., Murav'ev A.M., Nikitin P.I., Toporov A.Y., Pudonin F.A., Lopatin V.V., Popadinetq F.F., Svatkov A.V. Sandwitched thin-film structures for magnetoresistive spin-tunneling sensors // Sensors & Actuator s A.2000.V.81(1-3).P.57-59.
7. Kasatkin S.I., Murav'ev A.M., Nikitin P.I., Toporov A.Y., Pudonin F.A., Lopatin V.V., Popadinetq F.F., Svatkov A.V. Spin-tunneling magnetoresistive sensor of magnetic field // Sensors & Actuators A.2000 (in print).

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта ИНТАС № 97-2087.

УДК 681.586.33:535.37

А.А. Евстратов, канд. техн. наук, с.н.с.,
Д.О. Муравьев, В.П. Котов, канд. техн. наук, доц.,
В.Е. Курочкин, д-р техн. наук, проф.,
Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СЕНСОРЫ КИСЛОРОДА: ТЕНДЕНЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ

Рассмотрены особенности построения оптических сенсоров кислорода на основе люминесцирующих комплексов, иммобилизованных в пористые матрицы. Обсуждены существующие технологии и способы получения чувствительных элементов. Отмечены факторы, влияющие на свойства чувствительных элементов и выделены основные направления развития по улучшению метрологических характеристик сенсора.

Введение

Современные микро- и оптоэлектроника, а также технологии получения материалов с прогнозируемыми характеристиками позволяют создавать миниатюрные сенсоры (микроэлементы, микрозонды и т.п.), функционирующие как отдельно, так и в составе мультисенсорных микросистем.

Развивающиеся люминесцентные сенсоры находят все большее применение, так как обладают рядом достоинств: малыми габаритами, массой и энергопотреблением, высокими точностью и быстродействием при сравнительно низкой трудоемкости изготовления и небольшой стоимости.

Одним из перспективных методов определения кислорода является люминесцентный метод, основанный на взаимодействии молекул кислорода с люминесцирующими индикаторами, иммобилизованными в газопроницаемые матрицы [1]. В качестве таких матриц могут быть использованы золь-гельевые композиции [2-4], пористые материалы (выщелоченные стекла, изделия из прессованных порошков, кварцевая керамика и др.) [5-6], полимерные материалы (полистерен, поливинилхлорид, поливинилацетат, кремниевая резина и др.) [7-9], цеолиты и т.д. Газопроницаемая матрица с иммобилизованным индикатором представляет собой чувствительный элемент (ЧЭ), реагирующий преимущественно на определенное вещество (в данном случае – на кислород).

Состав и материал матрицы в значительной степени влияет на динамические характеристики ЧЭ сенсоров, а технологии получения ЧЭ, в том числе и метод внедрения индикатора в матрицу, определяют их чувствительность, стабильность, время отклика и линейность.

Модификация поверхности матрицы в целях придания матрице определенных свойств, обусловленных условиями эксплуатации, как правило, состоит в стабилизации поверхности, в том числе путем нанесения специальных покрытий и т.д.

Получение газочувствительного элемента сенсора может происходить по схеме, представленной на рисунке.

Люминесцирующие индикаторы

Люминесцирующие индикаторы характеризуются спектром поглощения и эмиссии, квантовым выходом люминесценции, временем жизни возбужденного состояния, фотохимической стабильностью, чувствительностью к кислороду, а также растворимостью и нейтральностью в матрице.

В качестве кислородочувствительных люминесцирующих индикаторов используют органические красители и полициклические ароматические углеводороды. Сенсоры на основе таких люминофоров отличаются низкой фотостабильностью и чувствительностью к кислороду [10, 11].

Более широкое применение нашли люминесцирующие металлоорганические комплексы Ru^{2+} , Os^{2+} , Ir^{3+} , Pt^{2+} , Rh^{2+} , Pd^{2+} , Au^+ и др. [1-9, 12-15].

К достоинствам индикаторов на основе дицианоплатиновых комплексов ($\text{Pt}(\text{bathophen})(\text{CN})_2$, $\text{Pt}(\text{dtbpy})(\text{CN})_2$) [12] следует отнести высокий квантовый выход люминесценции, низкий уровень фотохимической деградации, а также их нейтральность и хорошую

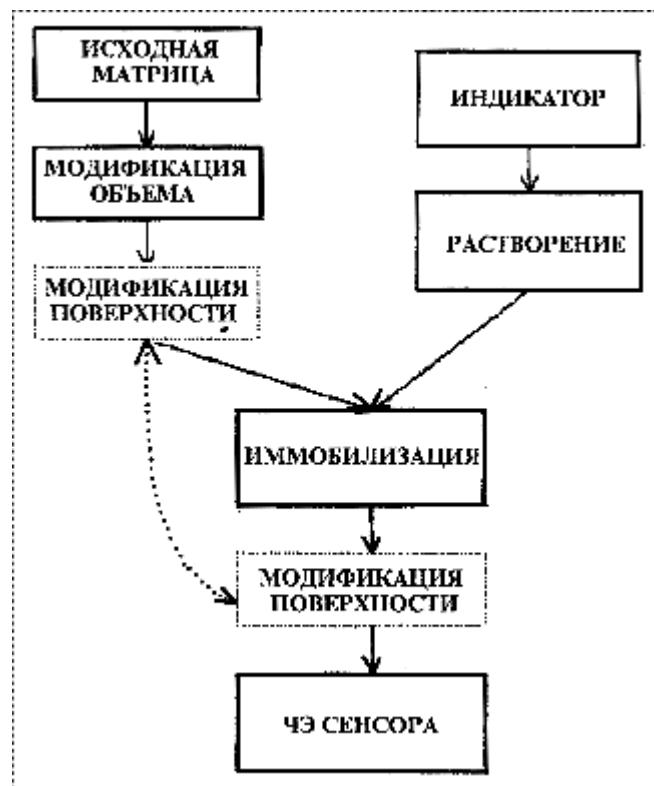


Схема получения газочувствительного элемента сенсора

стабильность в силиконовой матрице, а к недостаткам – плохую совместимость спектральных характеристик комплексов с компактными источниками света (индикаторы имеют поглощение в области 300-400 нм).

Для индикаторов на порфиринах платины и палладия (Pt-OEP, Pd-OEP и др.) [13] отмечена химическая стабильность, гидрофобность комплексов в используемых матрицах и высокая чувствительность к кислороду. Спектры поглощения и люминесценции индикаторов лежат в видимой области спектрального диапазона.

Высокая интенсивность люминесценции, фотохимическая стабильность и хорошая стабильность свойств сенсора при длительном хранении свойственна ЧЭ на основе диминовых комплексов осмия ($[Os(Ph_2phen)_3]^{2+}$, $[Os(Ph_2phen)(phen)]^{2+}$ и др.) [14]. Спектр возбуждения таких индикаторов характеризуется широкой полосой с максимумом в области 500 нм, что дает возможность использовать многочисленные источники возбуждения. Спектр люминесценции индикаторов лежит в области высокой чувствительности большинства кремниевых фотодиодов, что позволяет получать электрические сигналы большой величины. К недостаткам следует отнести низкую чувствительность к кислороду.

Хорошо изученными, наиболее распространенными и доступными для промышленного использования являются полипиридиновые (диминовые) комплексы Ru^{2+} , $(Ru(Ph_2phen)_2)^{3+}$, $Ru(phen)_2^{3+}$, $Ru(bpy)_2^{3+}$, $Ru(Ph_2phen)_2^{3+}$, $Ru(Ph_4B)_2$ и др.). Полосы поглощения и эмиссии таких индикаторов лежат в видимой области спектра и имеют значительный стоксов сдвиг, удобный для эффективной регистрации тушения флуоресценции. Кроме того, эти комплексы обладают высокими квантовыми выходами флуоресценции до 0,4 ($t = 25^{\circ}C$), хорошей чувствительностью к кислороду, фотостабильностью и имеют стабильные физико-химические свойства [15].

Технологии получения кислородочувствительных элементов

Процесс получения люминесцентного ЧЭ можно разделить на два этапа:

- получение пористой матрицы;
- иммобилизация индикатора в матрицу.

Иногда эти процессы объединены. Каждый этап процесса так или иначе влияет на свойства ЧЭ в целом. Матрицами ЧЭ, в которые адсорбируется люминесцентный индикатор, могут быть либо объемно-пористые материалы, либо тонкие пленки (получаемые при золь-гельных и зольных процессах).

Одним из перспективных направлений развития люминесцентных ЧЭ сенсоров кислорода является использование золь-гельных технологий для создания оптически активной органической смеси в кремниевой стеклянной матрице [2-4]. По сравнению с полимерами матрица, полученная по золь-гельной технологии, обладает следующими преимуществами: большой площадью поверхности, заданной шероховатостью, высокой химической, фотохимической и температурной

стабильностью и малыми оптическими потерями в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Золь-гельный процесс синтеза проводится обычно при низких (нормальных) температурах, что создает благоприятные условия для иммобилизации органических молекул в неорганической стеклянной "клеточной" структуре (гибридные гели). Гибкость золь-гельной технологии облегчает получение заданных свойств покрытия, которые определяют критические параметры сенсора – чувствительность и время отклика. Так, пористость покрытия может быть изменена регулированием начального значения pH раствора и подбором температурного режима. Использование оптического волокна с большой площадью поверхности в сочетании с применением кремниевого геля в качестве матрицы ЧЭ позволяет получить сенсор с высокой чувствительностью, широким динамическим диапазоном и хорошей химической стабильностью. Золь-гельный процесс может быть использован при создании пленок толщиной до 0,2 мкм, обеспечивающих малые времена отклика сенсора. Необходимо отметить, что одной из привлекательных особенностей золь-гельной технологии является возможность минитюаризации ЧЭ сенсора вплоть до микроразмеров.

Наряду с золь-гельными пленками в качестве матриц для ЧЭ широко используются полимерные материалы с высоким коэффициентом пористости (пластифицированный кремний или полимеры на основе кремния, поливинилхлорид, поливинилацетат, полистирол, полистерен и др.) [7-9]. Полимерные пластифицированные материалы позволяют получать чувствительные пленки и элементы практически любого размера и геометрии в интервале толщин от 1 до 300 мкм. Время отклика таких сенсоров может варьироваться от 0,2 до 40 с. Введение пластификаторов улучшает гибкость и эластичность пленки, увеличивает коэффициент газовой диффузии. Чувствительность кислородных пленочных сенсоров зависит не только от коэффициента диффузии кислорода, но также от растворимости кислорода в пленке. Поэтому особое значение уделяется оптимальному соотношению пластификатора и полимера [9, 13].

Наиболее известным методом получения пористых материалов является метод выщелачивания боросиликатных стекол, ведущий к образованию пористых объемных структур с большой площадью поверхности пор. Так, выщелачивание боросиликатного стекла по методике, описанной в [5], приводит к созданию структур с удельной площадью поверхности пор порядка $100 \text{ м}^2/\text{см}^3$ и средним размером пор 7,5-8,0 нм. Иммобилизация индикаторных комплексов может осуществляться разными способами в зависимости от требуемых характеристик сенсора.

Следует отметить, что такие ЧЭ склонны к фотодеструкции и нуждаются в модификации поверхности для усиления гидрофобных свойств.

К преимуществам пористых стекол относится возможность получения ЧЭ любой геометрической формы с заданными площадью и размерами пор.

Разнообразие люминесцентных индикаторов, материалов и технологий приготовления матриц

Состав и характеристики кислородчувствительных элементов

Матрица	Индикатор, концентрация	Растворитель	Чувствительность I_0 / I_{100}^{max}	Толщина, быстродействие (время тушения / время восстановления)
Cab-0-Sil	Ru(Ph ₂ phen) ₃ ²⁺ , Ru(phen) ₃ ²⁺ , Ru(bpy) ₃ ²⁺	Вода, метанол	23	130 мкм
PMMA, PVAc, PVC, PS, CAB	Ru(Ph ₂ phen) ₃ ²⁺ , (Ph ₄ B) ₂ , 9,6·10 ⁻⁴ М	Ацетон, этиленгликоль	17	20 мкм (0,4 с / 4,5 с)
PS,CAB,RTV-118, PVA, PMMA, PVC	JM6277, JM6280 (1-10)·10 ⁻³ М	Дихлорметан	5,8	10 мкм (6 с / 11 с); 15-20 мкм (23 с / 71 с)
RTV-118, RTV-732, SG-197, PS, PVC, PMMA, CAB	Pd-CPP, Pt-OEPK, Pd-OEPK, Pd-TPP, Pt-TDCPP, Pt-TFMPP, Pt-Br ₈ TMP, Pd-OEP, Pt-OEP 1 г/10 мл	Ацетон, дихлорметан, метанол, хлороформ, полистерен	25	5-50 мкм (1 с / 60 с)
RTV-118, RTV-732	Pt(bathophen)(CN) ₂ , Pt(dt bpy)(CN) ₂ , Ru(Ph ₂ phen) ₃ ²⁺ , Ru(Ph ₂ phen) ₃ (TSPS) ₂ , Ru(phen) ₃ (DS) ₂ 10 ⁻³ М/л	Дихлорметан, хлороформ, этилацетат, этанол	14	200 мкм (10 с / 60 с) 1-50 мкм <1 с
PDMS	Ru(Ph ₂ phen) ₃ ²⁺ 0,03 г/л	Дихлорметан	78	300-2000 мкм
PVA, RTV-732	(Bu ₄ N) ₄ [Pt(pop)4]	Этанол, вода	2,2	300 мкм (< 20 с)
Polypropylene, Porous teflon, Cellulose	BNK ⁵⁺ , BNK ¹⁰⁺ , BNK 50H, BNK 17 10 ⁻³ М	Вода, тетрагидрофуран, диэтилэфир	2,8	200-1000 мкм (3-5 мин)
RTV-118, RTV-615, PVC	Ru(Me ₂ phen) ₃ ²⁺ , Ru(phen) ₃ ²⁺ , Ru(Ph ₂ phen) ₃ ²⁺ , Ru(bpy) ₃ ²⁺ , 10 ⁻³ М	Метанол, дихлорметан	25	125-375 мкм (12с)
PDMS, GP-163	Os(Ph ₂ phen) ₃ ²⁺ , Os(phen) ₃ ²⁺ , Os(Ph ₂ phen)(phen) ₂ ²⁺ , Os(Me ₂ phen)(phen) ₂ ²⁺ 0,03 г/л	Этанол, вода, дихлорметан	4,5	100 мкм
Silicone, Silicagel, PVC, PS, Ethylcellulose, TEOS, MTEOS, ETEOS, MTMS	Ru(phen) ₃ ²⁺ , Ru(5odap) ₃ ⁺ , Ru(Ph ₂ phen) ₃ ²⁺ , Ru(bpy) ₃ ²⁺ , 0,025-0,4 г/л; 2,537 г/л	Тетрагидрофуран, дихлорметан, метанол, ацетонитрил, хлороформ, вода, этанол	9	10-175 мкм (5с)
ZeoliteY, Silicagel	Ru ²⁺ (bpy) ₃ , Ru ²⁺ (bipy) ₃ 5·10 ⁻³ ; 1·10 ⁻² М	Вода	4,5	50 мкм (6-10 с)

PDMS, MMA, TGDA,Gp-163,DAC	Pyrene	Дихлорметан	120	-
Обозначения				
<p>I_0 / I_{100}^{max} – отношение сигналов N₂-O₂; Cab-O-Sil – прессованный кремниевый порошок; PMMA – polymethylmethacrylate, PVAc - polyvinylacetate, PVC – polyvinylchloride; PS – polystyrene CAB – cellulose acetate butyrate; RTV – silicon rubber; PVA – polyvmylalcohol; SG - silicone Genesee; PDMS – polydimethylsiloxane; TEOS – tetraethylorthosilicate; MTEOS – methyltnethoxysilan; ETEOS – ethyltnethoxysilan; MTMS – methyltrimethoxysilane; MMA – methylmethacrylate; TGDA – tetraethylene glycol diacrylate; DAC – diacetoxy/</p> <p>Ru(Ph₂phen)₃²⁺ – tris(4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline) ruthenium(II); Ru(phen)₃²⁺ – tris (1,10-phenanthroline) ruthenium(II); Ru(bpy)₃²⁺ – tris(2,2'-bipyridyl) ruthenium(II); Ru(Ph₂phen)3²⁺(Ph₄B')₂ - -tris(4,7-diphenyl-1, 10-phenanthroline) ruthenium(II) ditetraphenylborate; JM6277 – bis{μ-(bis(diphenylphosphino)octadecylamine-P,P')} diiododigold(I); JM6280 -1,1,1,-tris(2-diphenylphosphenitomethyl)-ethane gold(I) chloride, Pd-CPP – palladium (II) coproporphyrin; Pt-OEPK – platinum (II) octaethylporphyrin ketone; Pd-OEPK – palladium (II) octaethylporphyrin ketone; Pd-TPP – palladium (II) tetraphenylporphyrin; Pt-TDCPP – platinum (II) meso-tetrakis(2,6-dichlorophenyl) porphyrin; Pt-TFMPP - platinum (II) meso-tetrakis(3,5-bis(tri!uoromethyl)phenyl) porphyrin; Pt-Br₈TMP – platinum (II) meso-tetramesityl-p-octabromoporphyrin; Pd-OEP-palladium (II) octaethylporphyrin; Pt-OEP – platinum (II) octaethylporphyrin; Pt(bathophen)(CN)₂ – (bathophen = 4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline); Pt(dt bpy)(CN)₂ – (dt bpy = 4' -di-tertbutyl-2,2'-bipyridine); Ru(Ph₂phen)₃(TSPS)₂ – [(Ph₂phen = 4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline), (TSPS = (CH₃)₃SiCH₂CH₂SO₃)]; Ru(phen)₃(DS)₂ – [(phen = 1,10-phenanthroline) (DS = n-C₁₂H₂₅SO₃], (Bu₄N)[Pt(pop)₄] – tetrakis (pyrophosphito)dplatinate(II) {pop = P₂O₅H₂²⁻}; BNK 5+ – 5-(4-bromo – 1-naphthoyl) pentyltnmethylammonium bromide; BNK 10+ – 10-(4-bromo – 1-naphthoyl) decylnmethylammonium bromide; BNK 50H – 5-(4-bromo – 1-naphthoyl)-1-pentanol; BNK 17- 1-(4-bromo – 1-naphthoyl) heptadecane; [Os(Ph₂phen)₃²⁺ – tris(4,7-diphenyl-1 10-phenanthroline) osmium(II); [Os(Ph₂phen)(phen)]₂²⁺ – [(1,10-diphenanthroline) (4,7-dipheyl-1 10-phenanthroline)] osmium(II); [Os(Me₂phen)(phen)]₂²⁺ – [(1,10-diphenanthroline) (4,7-dimethyl-1,10-phenanthroline)] osmium(II); [Os(phen)₃²⁺ – tris (1, 10-phenanthroline) osmium(II), Ru(5-odap)₃²⁺ – tris (5-octadecanamide-1,10-phenanthroline) ruthenium(II).</p>				

позволяет успешно осуществлять оптимизацию ЧЭ в соответствии с требуемой областью применения и является причиной для их всестороннего изучения.

Некоторые данные по кислородчувствительным элементам представлены в таблице [1].

Методы иммобилизации индикаторов

Временная стабильность свойств ЧЭ зависит от метода внедрения индикатора в матрицу. Наиболее распространены следующие способы иммобилизации молекул индикатора [13, 16-19]:

- физическая адсорбция из водных растворов и растворов органических растворителей (деионизированная вода, этанол, метанол, дихлорэтан и др.);
- физическое внедрение (оль-гельная технология, изготовление полимерных пластифицированных пленок),
- ковалентная адсорбция;
- ковалентная сополимеризация.

Первый способ иммобилизации является самым простым и из-за слабой связи молекул индикатора с поверхностью матрицы используется для сенсоров со сравнительно небольшим ресурсом работы (несколько дней) [16].

Физическое внедрение люминофора состоит в помещении и фиксации индикатора в "ловушке" или иной структуре наподобие "клеточной". Такой способ наиболее часто используется для комплексов Ru²⁺ [17]. Стабильность свойств подобных сенсоров определяется в основном фотостойкостью индикатора и степенью гидрофобности матрицы.

Способ ковалентной адсорбции индикатора заключается в образовании групп ионов либо при модификации поверхности матрицы, либо при присоединении к индикатору противоположно заряженного иона (при этом образуется ионно-парный комплекс). Такой способ

фиксации индикатора повышает фотостабильность ЧЭ и используется для сенсоров с ресурсом работы несколько месяцев [18].

При ковалентной сополимеризации происходит пришивка к индикатору группы, родственной по химическому составу матрице, что используется для приятия ЧЭ гидрофобных свойств [13, 19].

Особенности построения люминесцентных ЧЭ

Создание оптических люминесцентных сенсоров для той или иной области применения является сложной многопараметрической задачей, требующей всестороннего изучения физических основ функционирования сенсора с учетом воздействия разных факторов окружающей среды

Анализ условий работы сенсора и требования к точностным и динамическим характеристикам позволяют выбрать матрицу ЧЭ, индикатор, определить технологию адсорбции индикатора, сформулировать требования к защитным покрытиям ЧЭ и в какой-то степени определяют выбор метода и схемы регистрации тушения люминесценции.

Особенностью некоторых конструкций сенсоров является расположение ЧЭ относительно источника возбуждения и регистрирующего фотоприемника. Выбор оптической схемы зависит как от самого сенсора (геометрии и размеров ЧЭ, состава матрицы, типа индикатора), так и от условий его эксплуатации. Сигнал изменения люминесценции может регистрироваться в отраженном и проходящем свете, а также под углом к возбуждающему излучению (обычно под углом 90°).

Сенсоры в зависимости от используемого способа регистрации тушения люминесценции могут различаться по интенсивности тушения [20], по времени затухания (фазовый и импульсный методы) [2]. Нельзя однозначно

определить преимущества того или иного способа регистрации тушения люминесценции, так как они имеют свои достоинства и недостатки. Выбор схемы и способа регистрации люминесценции, в конечном итоге, является одним из этапов проектирования сенсора и определяется в каждом случае отдельно.

Одной из важных характеристик кислородочувствительного элемента является стабильность его свойств в процессе хранения и эксплуатации. Изменение характеристик оптического сенсора может быть обусловлено процессами фотодеструкции (выцветания) ЧЭ при воздействии возбуждающего излучения, процессами загрязнения матрицы и другими химически обратимыми и необратимыми воздействиями. Длительность хранения и эксплуатации при сохранении метрологических характеристик ЧЭ в сочетании с низкими стоимостью и трудоемкостью в основном и определяет конкурентную способность люминесцентных сенсоров по сравнению с широко распространенными электрохимическими детекторами.

Стабильность характеристик сенсора связана с гидрофобностью ЧЭ [3]. Поверхностные группы SiOH, имеющиеся на поверхности пор матриц, содержащих кремний, способствуют адсорбции влаги, которая при взаимодействии с индикатором приводит к изменению метрологических характеристик сенсора (например, за счет выщелачивания индикатора). Широко распространенные гидрофобные полимеры, такие как силиконовая резина, не всегда могут быть использованы, поскольку большинство индикаторов имеет низкую растворимость в этих матрицах, что создает дополнительные трудности.

Гидрофобизация сенсора может быть достигнута следующими способами:

- модификацией поверхности матрицы, что чаще всего осуществляется замещением силанольных групп на метиловые или фторовые (метилирование или фторирование поверхности). Подобная модификация поверхности сенсора иногда позволяет повысить чувствительность в несколько раз [3];
- добавлением в состав матрицы модификаторов, имеющих высокую степень гидрофобности (чаще всего используется при золь-гельной технологии получения ЧЭ) [9];
- применением ионно-спаренных комплексов, нейтральных к влажности [19];
- использованием специальных защитных водонепроницаемых пленок.

Ряд веществ при взаимодействии с ЧЭ может создавать помехи, вызывая тушение или усиление люминесценции. В связи с этим были разработаны определенные технологические приемы для уменьшения влияния этих веществ на отклик сенсора: введение дополнительных компонентов в матрицу, модификация поверхности ЧЭ, изменение проницаемости элементов и пленок. Но, тем не менее, для некоторых сенсоров кислорода (например, с матрицей из силиконовой пористой резины) отмечено влияние следующих

веществ на отклик сенсора: SO₂, CO₂, H₂S, N₂O, Cl₂, галотана и анестезионных газов [21]. Замечено также влияние ионов меди, железа и некоторых солей, а также pH поверхности ЧЭ на величину его отклика [22].

Предпринимаются определенные попытки увеличения селективности ЧЭ сенсора за счет использования пленок с разными диффузионными свойствами, что позволяет получать высокоселективные сенсоры с хорошими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что наиболее важными задачами являются решение проблем, связанных с получением устойчивых метрологических характеристик сенсоров в процессе хранения и эксплуатации.

Заключение

В настоящее время можно выделить следующие основные направления развития люминесцентных сенсоров:

- синтез новых стабильных индикаторов, имеющих высокие квантовые выходы;
- создание ЧЭ со слабозависимыми (в идеале – независимыми) от температуры параметрами;
- получение ЧЭ, обладающих гидрофобными свойствами;
- создание материалов со стабильными характеристиками люминесценции, не зависящими от влияния окружающей среды, которые могут быть использованы для получения опорных элементов;
- разработка новых методик устойчивого внедрения индикаторов в матрицу в целях повышения временной стабильности сенсора;
- введение компонентов, повышающих чувствительность и время отклика сенсора в рабочем диапазоне концентраций кислорода;
- создание высокоселективных ЧЭ.

Кроме того, перспективным является разработка линеек ЧЭ. Такие сенсоры могут быть созданы с использованием:

- люминесцирующих индикаторов с различными свойствами для разных анализаторов, иммобилизованных в одну матрицу;
- покрытий с различной проницаемостью для разных анализаторов;
- набора селективных сенсоров (сенсорная линейка) на основе современных микротехнологий.

Направление создания люминесцентных сенсоров кислорода, несомненно, является перспективным, так как при всех сопутствующих проблемах отражает тенденцию развития современного приборостроения, направленного на создание микросенсоров и сенсорных мультисистем на основе передовых научно-технических технологий.

Список литературы

1. Евстратов А.А., Котов В.П., Муравьев Д.О., Курочкин В.Е. // Научное приборостроение 1999. Т. 9. №4. С. 32-51.
2. O'Keeffe G., MacCraith B.D., McEvoy A.K. et al. // Sensors and Actuators. 1995. V. 29. P. 226-230.

3. **McEvoy A.K., McDonagh C.M., MacCraith B.D.** // Analyst. 1996. V. 121. P. 785-788.
4. **McDonagh C., MacCraith B., McEvoy A.** // Anal. Chem. 1998. V. 70. P. 45-50.
5. **Novikov A.F., Zemskii V.I.** // SPIE. 1995. V. 2550. P. 119-129.
6. **Carraway E.R., Demas J.N., DeGraff B.A.** // Langmuir. 1991. V. 7. P.2991-2998.
7. **Carraway E., Demas J., DeGraff B., Bacon J.** // Anal. Chem. 1991. V. 63. P. 337-342.
8. **Wolfbeis O.S., Weis L.J., Leiner M.J.P., Ziegler W.E.** // Anal. Chem. 1988. V. 60. P. 2028-2030.
9. **Mills A., Thomas M.** // Analyst. 1998. V. 123. P. 1135-1140.
10. **Лакович Дж.** Основы флуоресцентной спектроскопии М.: Мир, 1986. 496 с.
11. **Optiz N., Graf H., Lubbers D.** // Sens. Actuators. 1988. V. 13. P. 159.
12. **Lee W., Wong K., Li X.** // Anal. Chem. 1993. V. 65. P. 255-258.
13. **Mills A., Lepre A.** // Anal. Chem. 1997. V. 69. P. 4653-4659.
14. **Xu W., Kneas K., Demas J., DeGraff B.** // Anal. Chem. 1996. V. 68. P. 2605-2609.
15. **Juris A., Balzani V., Barigelletti F. et al** // Ru (II) polypyridine complexes photophysics photochemistry electrochemistry and chemiluminescence. Elsevier Science Publishers. Amsterdam. 1988. P. 86-281.
16. **Патент США №5012809, 7.05.91.**
17. **Патент США № 5580527, 3.12.96.**
18. **McNamara K.P., Li X., Stull A.D., Rosenzweig Z.** // Analytica Chimica Acta. 1998. V. 361. P. 73-83.
19. **Mills A., Thomas M.** // Analyst. 1997. V. 122. P. 63-68.
20. **MacCraith B.D., McDonagh C.M., O'Keefe G. et al** // Analyst. 1993. V. 118. P. 385-388.
21. **Bacon J.R., Demas J.N.** // Anal. Chem. V. 59. P. 2780-2785.
22. **Klimat, O.S.Wollbeis** // Anal. Chem. 1995. V. 67. P. 3160-3166.

Поздравляем лауреатов!

Редакционная коллегия и редакция журнала

"Микросистемная техника"

поздравляют членов редколлегии журнала

чл корр РАН дра физ мат наук профессора
Мокерова Владимира Григорьевича

дра техн наук профессора
Мальцева Петра Павловича

дра техн наук профессора
Петросянца Константина Орестовича

**с присуждением премии Правительства Российской Федерации
в области науки и техники за 1999 год
за разработку новой техники.**

Желаем нашим лауреатам дальнейших творческих успехов!

УДК 621.384.

П.П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
К.М. Пономарев, канд. техн. наук,
Секция прикладных проблем при Президиуме РАН,
Ю.И. Степанов, канд. техн. наук,
22 ЦНИИ МО РФ

"УМНАЯ ПЫЛЬ" НА ОСНОВЕ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Анализируются возможности создания датчиков, разрабатываемых в виде функционально-сложных и автономных устройств. Физический объем этих датчиков предполагается сократить до нескольких кубических миллиметров. Массовое производство таких датчиков (при себестоимости, сравнимой с себестоимостью обычных микросхем) будет обеспечиваться используемой для их изготовления технологией микросистем, близкой по применяемым методам и средствам к технологии интегральных схем.

Технология микросистем (microsystem technology) относится, по мнению зарубежных ученых, к числу перспективных технологий, способных определять техническое развитие человечества в XXI веке. Она используется для создания микроминиатюрных устройств, прототипы которых изготавливались ранее традиционными способами точного приборостроения. Широкое внедрение технологии микросистем в производство различных приборов началось на рубеже 80-90-х годов в США, Японии, Германии и некоторых других европейских странах.

Мировой объем продаж изделий на основе микросистемной техники (microsystems engineering), по некоторым прогнозам, при сохранении годовых темпов роста 20-30 % к 2002 г. может достичь 6,4 млрд долл. По данным швейцарской консалтинговой фирмы Intecho Consulting на долю США в 1998 г. приходилось более 45% мирового сбыта указанных изделий [1].

О внимании, которое уделяется в США руководством ДАРПА (Управление перспективных исследований Министерства обороны США – DARPA) внедрению технологии "микроэлектромеханических систем" (microelectromechanical systems – MEMS) [2] в разработки новых систем оружия, свидетельствует факт реорганизации в конце 1999 года Отдела электронных технологий (Electronic Office) этого управления в Отдел технологий микросистем (MEMS Office). В функции последнего входит, в том числе, руководство программой разработки датчиков для систем тактического назначения.

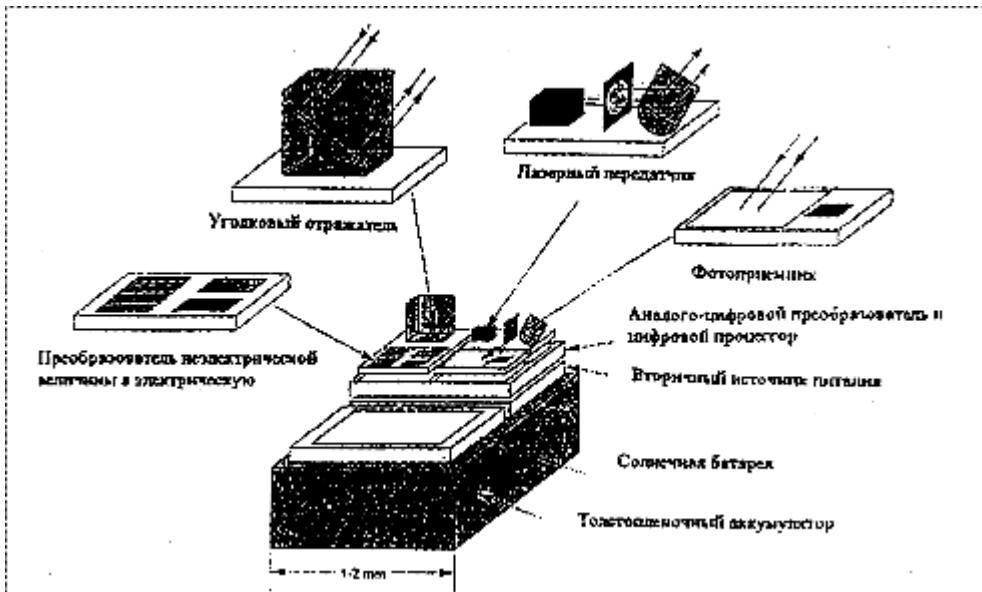
В рамках программы "Tactical Sensor Program", осуществляющейся ДАРПА с 1998 г. и направленной на разработку датчиков для систем тактического назначения, поставлена цель создания микроминиатюрных автономных датчиков (micro unattended ground sensors) на основе обобщения результатов выполненных ранее программ аналогичного профиля. Объем финансирования программы в период 1998-2000 гг. составит 10 млн долл.

Датчики, разрабатываемые по этой программе, являются функционально-сложными автономными устройствами. Физический объем этих датчиков предполагается сократить до нескольких кубических миллиметров. Массовое производство таких датчиков при себестоимости, как оценивают ее разработчики, сравнимой с себестоимостью обычных микросхем, будет обеспечиваться используемой для их изготовления технологией микросистем, близкой по применяемым методам и средствам к технологии интегральных схем.

Оценочные расчеты, выполненные при проектировании микроминиатюрных датчиков, показывают, что при объеме датчика 1 мм^3 и использовании наиболее совершенных источников питания исходный запас энергии датчика составит 1 Дж. Следовательно, при равномерном расходовании этой энергии в течение суток уровень потребляемой датчиком мощности не должен превышать 10 мкВт. Восполнение энергетических запасов датчика предполагается осуществлять посредством солнечной батареи, причем ее активная площадь ограничивается размерами датчика. Максимальный КПД солнечной батареи, достигнутый в настоящее время для лабораторных образцов, составляет не более 40 % (теоретический предел 60 %). При указанном уровне потребляемой датчиком мощности даже такая, наиболее совершенная солнечная батарея сможет обеспечить суточный баланс запаса энергии датчика только лишь при благоприятных условиях (длительном световом дне, отсутствии облачности, надлежащей ориентации датчика и пр.). Эти расчеты носят весьма приблизительный характер, но они позволяют судить о предельно возможном энергоресурсе датчика. Причем этот энергоресурс будет снижаться при попытках дальнейшего уменьшения габаритных размеров датчика.

Одну из сложных задач при построении элементной базы датчиков, функционирующих при столь жестких ограничениях на потребляемую ими мощность, представляет создание устройств внешней дуплексной связи. Такой связью датчик необходимо обеспечить для доведения зарегистрированной им информации до ее конечного потребителя, а также для внешнего управления функционированием самого датчика. Решение указанной задачи осуществляется за счет использования как радиоволновых, так и оптических средств связи.

С первой половины 90-х годов ДАРПА финансирует ряд программ, целью которых является разработка микроминиатюрных датчиков, снабженных радиоволновыми устройствами связи. Результаты, полученные при выполнении одной из этих программ "Маломощные беспроводные интегральные микродатчики" (Low Power Wireless Integrated Microsensors), послужили основой для развертывания последующей программы "Беспроводные интегральные сетевые датчики" (Wireless Integrated Network Sensors). Эта программа наряду с ДАРПА финансируется также по линии Исследовательской лаборатории Армии США и выполняется Калифорнийским университетом (г. Лос-Анджелес) совместно с научным центром американской фирмы Rockwell.



Конструкция датчика

Основное внимание в рамках этой программы уделяется вопросам создания средств радиосвязи микроминиатюрных датчиков и способам построения систем с такими датчиками. Исследовались проблемы взаимодействия разрабатываемых систем по радиоканалам с внешними информационными сетями. Усовершенствовалась также элементная база микроминиатюрных датчиков, включающая первичные преобразователи неэлектрических величин в электрические, аналого-цифровые преобразователи, цифровые процессоры. Габаритные размеры разрабатываемых устройств и значения потребляемой ими мощности были жестко ограничены.

В 1999 г. ДАРПА начало финансирование четырехлетней программы "Беспроводной датчик со сверхнизкой потребляемой энергией" (Ultra Low Power Sensor). Программа выполняется группой исследователей Массачусетского технологического института под руководством Ch. Sodini. Аппаратурное воплощение сконструированных устройств на технологической базе производства радиоэлектронных интегральных схем под руководством доктора T. Tewksbury осуществляется фирмой Analog Devices (г. Норвуд, шт. Массачусетс). Эта же фирма планирует промышленное внедрение результатов, полученных при выполнении указанной программы.

Предметом разработки в этой программе является устройство, состоящее из кремниевого матричного преобразователя изображения, интегрированного с микроминиатюрным радиопередатчиком. Скорости потока передаваемой информации по радиоканалу этого устройства могут принимать значения от 1 бит/с до 1 Мбит/с. Мощность, потребляемая устройством в целом, ограничена и не должна превышать соответственно значений от 10 мкВт до 10 мВт.

Несмотря на значительные успехи в разработке устройств радиосвязи для оснащения микроминиатюрных датчиков, дальнейшему совершенствованию этих устройств препятствует ряд факторов. Малые размеры датчиков ограничивают размеры приемопередающих антенн, что, в свою очередь, определяет необходимость использования радиоволн миллиметрового диапазона. Вместе с тем, такая необходимость плохо согласовывается с ограничениями на мощность, потребляемую радиопередатчиками. Кроме того, значительную мощность в приемопередатчиках расходуют устройства преобразования полезного сигнала.

Для обеспечения датчиков связью на расстояниях прямой видимости весьма перспективными являются средства оптической пространственной (не волоконной) связи, работающие в видимом и ближнем ИК-диапазонах излучения. Применение полупроводниковых лазерных источников, снабженных коллиматорной оптикой, позволяет добиться узконаправленного потока излучения и тем самым снизить требования к мощности выходного сигнала передатчика [3].

Предпочтение оптическим средствам внешней связи было отдано разработчиками микроминиатюрных автономных датчиков при выполнении программы "Умная пыль" (Smart Dust) в Калифорнийском университете (г. Беркли) по заказу ДАРПА [4]. Руководителями работ по программе являются проф. J. Pister и J. Khan.

В процессе создания этих датчиков исследуется возможность предельного уменьшения их размеров. Такая задача усугубляет, как уже отмечалось выше, проблему энергообеспечения датчиков, что подтверждает обоснованность выбора оптических средств связи, несмотря на зависимость ее качества от состояния атмосферы (запыленности, задымленности, тумана и т.д.) и ограничения, связанные с условием обеспечения прямой видимости между абонентами.

В начале 1999 г. исследователи Калифорнийского университета выполнили разрабатываемый ими датчик в виде таблетки диаметром около 5 мм. К 2001 г. они планируют уменьшить габаритные размеры датчика до 1-2 мм. Для датчиков с такими размерами (или еще меньшими) было использовано условное понятие "умная пыль", которое определило название программы.

Конструкция микроминиатюрного датчика системы "Умная пыль" представлена на рисунке. Выполненные на отдельных кристаллах кремния первичный преобразователь неэлектрической величины в электрическую,

аналого-цифровой преобразователь, цифровой процессор совместно с запоминающим устройством, вторичный источник питания и солнечная батарея смонтированы на аккумуляторе, изготовленном в виде бескорпусной толстопленочной структуры. По вычислительным возможностям каждый датчик, как считают его разработчики, в перспективе будет соответствовать процессору "Intel 8086". Устройства внешней связи представлены блоками фотоприемника, лазерного передатчика и уголкового отражателя.

В состав блока лазерного передатчика входит полупроводниковый лазер, коллиматорная линза Френеля и зеркало. Зеркало размещено на отклоняющем устройстве (на котором впоследствии предполагается разместить и фотоприемник), посредством которого излучение передатчика может распространяться в любом направлении в пределах воображаемой полусферы, опирающейся на плоскость основания датчика. Информация о положениях отклоняющего устройства при проведении сеансов связи датчика с различными внешними абонентами может потом храниться в запоминающем устройстве для воспроизведения этих положений при последующих сеансах связи с абонентами.

Внешним абонентом датчика, которому поступает зарегистрированная им информация, служит центральная станция. Устройствами дуплексной связи этой станции являются фотоприемник модулированного оптического излучения, поступающего от датчика, демодулятор и дешифратор полученного сигнала, а также лазерный источник излучения. Передача информации от датчика на центральную станцию осуществляется в активном или пассивном режимах.

В случае активного режима используется лазерный блок датчика. Этим блоком генерируется излучение, импульсно промодулированное в соответствии с сигналами первичного преобразователя. Лазерный передатчик потребляет относительно большую мощность, значение которой составляет около 1 мВт. Поэтому сеанс связи в таком режиме может продолжаться в течение короткого промежутка времени. Передача информации при этом осуществляется, как указывают разработчики датчика, либо на расстояние нескольких километров при низких скоростях потока передаваемой информации, либо на значительно меньшие расстояния, но при высоких скоростях этого потока, достигающих нескольких мегабит в секунду.

При пассивном режиме используется уголковый отражатель. Конструктивно он состоит из трех взаимно перпендикулярных плоскостей, выполненных из поликристаллического кремния с пленочным покрытием из золота. Одна из плоскостей отражателя сопряжена с электростатическим приводом (актуатором), который может отклонять эту плоскость от ее исходного положения, что позволяет осуществлять импульсную модуляцию отраженного излучения лазера центральной станции.

Отраженное лазерное излучение направляется уголковым отражателем строго обратно к центральной

станции и одновременно модулируется в соответствии с сигналами первичного преобразователя датчика. Угол падения исходного оптического излучения на уголковый отражатель должен совпадать с осью симметрии, проходящей через точку сопряжения плоскостей отражателя, и выдерживаться с допуском в несколько десятков градусов. С целью снижения требований со стороны устройств внешней связи к ориентации датчика его конструкция может содержать несколько уголковых отражателей разной направленности. Однако в этом случае увеличиваются размеры датчика.

Экспериментально осуществлена передача информации в пассивном режиме от датчика на центральную станцию, удаленную на 150 м (при выходной мощности лазера базовой станции – 5 мВт и скорости потока передаваемой информации – 1 кбит/с). Разработчики датчика отмечают, что скорость этого потока может быть увеличена в несколько раз при расстоянии между центральной станцией и датчиком в несколько сотен метров (в условиях яркого солнечного освещения). Ночью при отсутствии движения воздуха это расстояние может быть увеличено до нескольких километров.

Таким же образом в пассивном и активном режимах может осуществляться связь между двумя датчиками. При этом устройства связи одного из них функционируют как аналогичное устройство центральной станции.

С целью экономии мощности, потребляемой датчиком, предусмотрена возможность его работы при отключенных устройствах внешней связи и накапливании информации, зарегистрированной первичным преобразователем, в запоминающем устройстве. Последующая передача этой информации на центральную станцию осуществляется в определенные промежутки времени в пассивном режиме. Эта передача информации может производиться в некоторых случаях по программе центральной станции, когда ее лазерное излучение включается в определенное время суток, или через определенные промежутки времени в зависимости от специфических особенностей регистрируемых датчиком событий. В других случаях лазерное излучение центральной станции включается в ответ на короткие сигналы запроса самого датчика, передаваемые в активном режиме.

Центральная станция может осуществлять одновременную многоканальную связь с группой датчиков. В этом случае в ее составе используется фотоприемник матричного типа. Излучение лазера этой станции охватывает район, где находятся датчики. Отраженное и модулированное каждым из датчиков излучение регистрируется фоточувствительными элементами матрицы, входящей в состав центральной станции. При этом необходимо, чтобы поток оптического излучения, отраженного определенным датчиком, приходился на соответствующий ему фоточувствительный элемент матрицы центральной станции.

Для оценки такого требования разработчики указанных датчиков рассматривают случай, когда пространственное поле зрения центральной станции

составляет 17×17 м, а матрица приемника содержит 256×256 ячеек. Поле зрения, соответствующее каждой ячейке, составляет в этом случае $6,6 \times 6,6$ см, т.е. датчики должны быть удалены друг от друга на расстояние не менее $6,6$ см.

В подавляющем большинстве практических случаев потребуется гораздо менее плотное распределение датчиков в пространстве. Однако в случае, когда на один и тот же фоточувствительный элемент матрицы поступают сигналы от нескольких датчиков, наряду с описанным пространственным разделением сигналов датчиков, может быть использовано их временное разделение.

Исполнители проекта "Умная пыль" изучают возможность использования большой совокупности микроминиатюрных датчиков в качестве некоего искусственного облака, образованного датчиками, распыленными в атмосфере и медленно оседающими на Землю. Выброс микроминиатюрных датчиков в атмосферу может осуществляться как с борта летательных аппаратов, так и посредством ракетных или артиллерийских систем. Предполагается, что вследствие малых размеров и массы таких датчиков они могут поддерживаться в атмосфере потоками воздуха на протяжении часов или дней, выполняя при этом разведывательные функции.

Активное управление полетом датчика, находящегося в воздухе, может осуществляться посредством матрицы микроминиатюрных твердотопливных ускорителей, разработанной фирмой TRW совместно с Калифорнийским технологическим институтом по заказу ДАРПА. Объем финансирования работ составил 3,5 млн долл.

Матрица изготовлена на базе технологии микросистем и содержит множество углублений, каждое из которых заполнено зарядом твердого топлива. Воспламенение снаряда осуществляется индивидуально электрическим импульсом. Плотность компоновки ускорителей в матрице достигнет, как ожидается, 1 тыс./мм. Такая матрица позволит существенно увеличить продолжительность нахождения в воздухе микроминиатюрного датчика, которому будет придана в этом случае специальная геометрическая форма.

Доведение информации, полученной рассеянными в атмосфере микроминиатюрными датчиками, до потребителя может осуществляться через центральную станцию, вмонтированную в бинокль. Это позволит наблюдать в бинокль изображение контролируемой местности одновременно с условными отметками, соответствующими, например, присутствию в атмосфере агентов химического или биологического оружия, выявленных посредством указанных датчиков.

Сопоставление уровней развития систем автономных датчиков, стоящих на вооружении (например, REMBASS) и вновь разрабатываемых по программам ДАРПА (например, по программе "Умная пыль"), свидетельствует о том, что использование высоких технологий открывает реальную перспективу резкого

сокращения размеров разрабатываемых датчиков. Соответственно, становится возможным снизить их демаскирующие признаки, усовершенствовать способы доставки датчиков на боевые позиции. Ожидаемая низкая себестоимость производства таких датчиков позволит многократно увеличить их количество в системах, разведывательные возможности которых при этом существенно возрастут.

Из общей теории построения разведывательных телеметрических систем следует, что вместо применения сложного и дорогого датчика с высокими возможностями выявления объекта по заданной сигнатуре в ряде случаев целесообразнее использовать совокупность менее совершенных, но дешевых датчиков. Эта целесообразность проявляется особенно отчетливо, когда речь идет о микроминиатюрных датчиках, характеризующихся, как отмечалось, низкой себестоимостью производства. Использование совокупности датчиков вместо одного, более сложного, позволяет в ряде случаев экономить также временные и энергетические ресурсы соответствующих систем.

Например, факт появления человека на контролируемой территории может быть выявлен посредством автономной телекамеры, которая, с одной стороны, должна обладать способностью сканировать всю эту территорию, а с другой – обеспечить такое качество изображения, которое позволило бы отличить, например, человека от крупного животного. Очевидно, что для решения этой задачи потребуется затрата определенного времени, а также энергии, потребленной телекамерой.

Экономичнее, с точки зрения расходования указанных ресурсов, эта же задача может быть решена, в частности, посредством направленного сканирующего микрофона и более простой видеокамеры с небольшим полем зрения. Ориентация камеры непосредственно на выявленный с помощью микрофона источник звука заданной сигнатуры позволит резко сократить как продолжительность поискового режима работы камеры, так и расходуемую ею энергию, при той же достоверности выявления заданного объекта. Таким образом, к числу особенностей перспективных систем относится ожидаемый рост числа используемых в них датчиков.

Другая особенность обусловлена дефицитом энергетических ресурсов датчиков, что накладывает ограничения на объем и скорость передаваемой ими информации; энергию, затрачиваемую на бит передаваемой информации; расстояние, на которое передается эта информация. С учетом этих особенностей приобретает значение выбор способов передачи на центральную станцию информации, зарегистрированной датчиками. Эти способы должны быть оптимальными как с точки зрения расходуемой датчиками мощности, так и скорости поступления на центральную станцию потоков информации.

Оптимальность указанных способов может быть обеспечена комплексно скоординированным информационным взаимодействием не только датчиков с

центральной станцией, но и датчиков между собой. Такое взаимодействие позволит ограничить распространение циркулирующих в системе некоторых информационных потоков совокупностью близрасположенных датчиков и устраниТЬ энергозатратную передачу этих потоков на более удаленную центральную станцию. Речь идет о потоках информации, связанных, например, с перепроверкой близрасположенными датчиками данных, полученных одним из соседних датчиков, или связанных с управляющими командами для группы близрасположенных датчиков.

Осуществить указанное взаимодействие, построенное по принципу самоорганизации, целесообразно, по мнению американских специалистов, на основе изучения закономерностей поведения коллективных насекомых, таких как термиты, муравьи, пчелы.

Информационные связи в перспективных системах автономных датчиков, по-видимому, будут строиться на основе децентрализованной схемы, когда информация между датчиками передается, минуя на промежуточных этапах центральную станцию (при централизованной схеме все связи датчиков осуществляются исключительно через центральную станцию). Каналы связи между датчиками устанавливаются при этом по принципу "от равного к равному" или по "узловому" принципу. В последнем случае двусторонняя связь с центральной станцией осуществляется только "узловыми" датчиками, которые, в свою очередь, имеют двустороннюю связь с несколькими близрасположенными датчиками, не имеющими связи с центральной станцией.

Децентрализованная схема может быть использована также при нарушении каналов связи между некоторыми датчиками и центральной станцией. Выявить такое нарушение можно путем регистрации промежутка времени, необходимого для прохождения контрольного сигнала, передаваемого датчиком на центральную станцию, и ответа на этот сигнал. В случае, когда этот промежуток времени превышает заданный порог, канал связи датчика с центральной станцией считается нарушенным.

Построение децентрализованной схемы представляет особенно сложную задачу, когда датчики установлены на подвижных платформах и их взаиморасположение меняется, а наличие или отсутствие каналов связи между ними носит динамичный характер. На современном этапе разработка алгоритмов организации связи в децентрализованных системах автономных датчиков с динамично меняющимися связями осуществляется в рамках программы "Умная пыль".

Уже достигнутые результаты, полученные при выполнении ряда из перечисленных программ, были еще в 1998 г. высоко оценены экспертами правительственные структур САШ и квалифицированы в качестве одного из технологических прорывов.

Доступность систем с многочисленными и недорогими миниатюрными автономными датчиками приведет к принципиальным изменениям практики их применения. Вместо размещения датчиков в местах наиболее

вероятного появления противника, как в случае применения систем REMBASS/IREMBASS, становится возможным массовое использование датчиков, число которых в системах может достигать многих тысяч, по всей территории военных действий. Это позволит посредством относительно простых и дешевых устройств, но применяемых в большом количестве, получить результаты, которые ранее достигались за счет использования сложных и дорогих систем. Таким путем, по мнению американских военных экспертов, будут "созданы новые возможности для наблюдения и контроля за развитием событий в зонах боевых действий", что отвечает концепции "Всеобъемлющего знания боевой обстановки", принятой командованием ВС САШ.

Проблемы создания широкохватной "умной" сети датчиков (Smart Sensorweb), предназначеннной для обеспечения войск максимально полной информацией о ситуации на поле боя в режиме реального времени, обсуждались на встрече, которая в феврале 2000 г. по инициативе ДАРПА была проведена с представителями промышленных фирм.

Исходя из результатов, полученных в ходе выполнения программ, развернутых ДАРПА с целью создания нового поколения систем с микроминиатюрными датчиками, утверждалось, что уже сейчас существуют реальные возможности практической реализации "умной" сети с множеством недорогих датчиков. Компьютерная среда этой системы будет содержать обширные кумулятивные базы данных и программное обеспечение для автоматизированного поиска, систематизации и анализа массивов информации, поступающей от датчиков. В результате резко возрастут разведывательные возможности системы в целом.

Дополнение обсуждаемой системы вновь разрабатываемыми датчиками электромагнитных сигнатур систем зажигания двигателей внутреннего сгорания, химических сигнатур выхлопных газов этих двигателей, одоральных сигнатур военного персонала, боеприпасов и взрывчатых веществ в сочетании с видовыми приборами обнаружения позволит расширить номенклатуру выявляемых целей и повысить достоверность их идентификации.

Современные достижения в области робототехники позволяют обеспечить мобильность находящихся на боевом дежурстве микроминиатюрных автономных датчиков, что особенно важно для проведения войсковой разведки или спецопераций в городских условиях.

Перемещения датчиков даже на сравнительно небольшие расстояния необходимы для обследования зданий, включая внутренние помещения, для слежения за подвижными объектами, выбора такого месторасположения каждого датчика, которое наиболее эффективно для получения требуемой информации, а также осуществления надежной связи с центральной станцией или между отдельными датчиками. В случае борьбы с распространением оружия массового уничтожения подвижность датчиков позволит, в частности, определ-

лить характер деятельности в контролируемых помещениях, идентифицировать установленное в них оборудование.

Подвижными носителями микроминиатюрных датчиков послужат микророботы [5]. Эти устройства, воплощающие последние достижения робототехники и имеющие размеры, сравнимые с размерами микроминиатюрных датчиков, предполагается реализовать на базе технологии микросистем. Системы автономных датчиков будут обслуживаться сообществами (колониями) микророботов, каждый из которых выполняет индивидуальную задачу, подчиненную общей цели.

Микророботам присущ ряд важных достоинств. Малая обнаруживаемость микророботов как визуальным, так и инструментальным путем позволит скрытно использовать их в непосредственной близости от объекта разведки. Ввиду сравнимой стоимости микророботов и микроминиатюрных датчиков микророботы могут стать техникой одноразового применения, что исключит необходимость решения проблемы их возвращения после выполнения поставленной задачи. При наличии разработанных базовых инструкций микророботов временные и материальные затраты на их оборудование микроминиатюрными датчиками будут минимальными.

На настоящем, начальном этапе развития микроробототехники, микросистемы используют в роботах лишь частично, а остальная аппаратурная часть выполняется в виде обычных неминиатюризованных устройств. Размеры таких мини-роботов сравнимы с размерами крупных насекомых [5].

В США создаются не только наземные мини- и микророботы, но и аналогичные летающие средства [6, 7], а также, по-видимому, плавающие (см. статью Бочарова Л.Ю., Эпинатьева И.Д. в данном номере журнала). Важное значение могут иметь проводящиеся по заказам МО США и НАСА разработки миниатюрных спутников, оснащенных соответствующими микроминиатюрными датчиками и являющимися, по существу, низкоорбитальными мини- и микрокосмическими аппаратами. Можно полагать, что применение таких спутников в составе группировок, запускаемых на орбиту легкими и сверхлегкими носителями [8], намного повысит оперативность космического разведывательного мониторинга.

Все виды перечисленных робототехнических устройств могут служить также носителями коммуникационных ретрансляторов, используемых в системах автономных датчиков.

Вновь создаваемые микроминиатюрные датчики характеризуются высокой востребованностью для решения военных и гражданских задач. Поэтому процессы развития этих датчиков по мере достижения практически полезных результатов получат приток новых значительных средств и станут, по-видимому, носить резко ускоряющийся характер. Есть основания полагать, что находит подтверждение прогнозная оценка, сделанная американскими экспертами десятиле-

тие назад, о наступлении эры микроминиатюрных датчиков в электронике".

Микроминиатюрные датчики займут важное место в сфере гражданской деятельности. Далеко не полный перечень задач, которые могут решаться такими датчиками, включает экологический, метеорологический, геофизический относительно малозатратный глобальный мониторинг, инспекцию городских транспортных потоков, медицинскую внутриполостную диагностику, телемедицинский контроль, обследование протяженных трубопроводных магистралей.

На основе датчиков нового поколения станет возможным построение систем, обеспечивающих поступление самой широкой информации о материальном мире в информационные сети, включая сеть Интернет. Поступление этой информации в отличие от существующей практики сможет осуществляться без участия человека.

Адекватность уровня развития разрабатываемых автономных датчиков современным возможностям компьютерной техники позволит, наконец, устранить основное препятствие на пути решения проблемы автоматизации и компьютеризации систем управления сложными промышленными, энергетическими и транспортными объектами.

Свободный доступ в сети Интернет к материалам программы "Умная пыль", имевшийся летом 1999 г., в последующее время прекращен. Это может означать, что результаты проводимых поисковых исследований имеют реальную перспективу быть использованными в целях создания разведывательных систем.

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. Бочаров Л.Ю., Мальцев П.П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. 1999, № 1. С. 41-46.
3. Chu P.B., Lo N.R., Berg E.G., Pister K.S.J. Optical communication using micro corner cube reflectors / 10th IEEE International workshop on electro mechanical systems, 1997. Р. 1-6.
4. Beware swarms of tiny airborne spies / New Scientist, August 28, 1999. Р.6
5. Рубцов И.В., Несторов В.Е., Рубцов В.И. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника. // Микросистемная техника. 2000, № 3 С. 36-42.
6. Петросян Э.А., Никифорова Л.Н. Беспилотные вертолеты – от мини- до микроаппаратов. // Микросистемная техника. 2000, № 1. С.33-36.
7. Янкевич Ю.И., Веркин Ю.В. Состояние и перспективы развития летательных микроаппаратов // Микросистемная техника. 2000, № 1. С.37-39.
8. Жирнов М.А. Микрокосмические информационные аппараты на основе микросистемной техники // Микросистемная техника. 2000, № 2. С.35-37.

УДК 621.3

Л.Ю. Бочаров, канд. техн. наук, И.Д. Эпинатьев,
Институт проблемных исследований

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОДВОДНЫХ МИНИ- И МИКРОРОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗА РУБЕЖОМ

Рассмотрены возможности создания различных мини- и микросистем, используемых под водой, для достижения нового уровня развития морских технологий.

Современное развитие микроботехнических систем способно оказать существенное влияние на многие области деятельности человека, в том числе и в морской среде. Как считают зарубежные эксперты, в промышленном производстве и контроле за окружающей средой микророботы в XXI веке будут играть ведущую роль. Технологической базой микробототехники является микроэлектромеханика - высокая технология двойного назначения, базирующаяся на использовании методов и средств микроэлектроники [1]. В США и Японии осуществляется ряд проектов, целью которых является создание подводных мини- и микророботов.

В США инициирующим фактором в развитии микросистемной технологии стало появление программы микроэлектромеханических систем (МЭМС), разработанной по заказу Управления перспективных исследований министерства обороны США (DARPA) с названием "MEMS - Microelectromechanical Systems" [2].

Предполагается, что новые разведывательные подводные лодки, которые планируют поставить на вооружение с 2005 г., будут оснащены как подводными разведывательными микророботами, так и летательными микроаппаратами, запускаемыми в воздух из подводного положения [3].

В лаборатории Дрейпера (Draper) США интенсивно ведутся исследования по созданию безэкипажных подводных аппаратов (*unmanned undersea vehicle-UUV*) повышенной маневренности на основе технической имитации движения рыб. Предполагается, что будут созданы подводные аппараты, характеризующиеся малым радиусом разворота, малым временем разгона и торможения. Внешний вид одного из опытных образцов такого подводного робота-рыбы показан на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки). Робот-рыба имеет массу -130-150 кг, длину -2,4 м и может развивать скорость до 5 км/ч.

В течение 1998 г. данный образец прошел многократные испытания как в закрытом бассейне Нью-Гемпширского университета (рис. 2, см. четвертую сторону обложки), так и в открытых акваториях. В ходе испытаний были отработаны гибкая конструкция корпуса подводного робота и алгоритмы управления его движением.

В Массачусетском технологическом институте (MIT) создан подводный робот "Pike"("Щука") длиной ~0,7-0,8 м, способный развивать скорость до 5-6 м/с (рис. 3, см. четвертую сторону обложки). Данный робот является следующим этапом развития экспериментального подводного робота "Типа", созданного в 1994 г. в этом же институте.

Большой объем НИОКР по созданию подводных микророботов в США проводится в рамках комплексной программы "Подводные роботы на принципах биомимикрии - Biomimetic Underwater Robot". Данная программа реализуется под руководством Департамента электроники и вычислительной техники США при участии Центра морских наук и Северо-Восточного университета в Бостоне. Основной задачей программы является создание полностью автономных подводных микророботов, имитирующих движение морских биологических объектов. Подобные разработки проводятся и в Северо-Западном университете в Чикаго [4].

Ожидается, что данные разработки найдут широкое применение в военных целях, среди которых можно выделить следующие:

- обнаружение подводных мин в мелком море;
- освещение подводной обстановки;
- решение задач по боевому охранению надводных кораблей и подводных лодок;
- поддержка аварийно-спасательных работ на затонувших объектах;
- организация связи с подводными лодками.

В ходе реализации программы "Biomimetic Underwater Robot" были разработаны макетные образцы двух подводных микророботов: "Робот-лобстер – Lobster Robot" и "Робот-минога- Undulatory Robot" (рис. 4 и 5, см. четвертую сторону обложки). Разработки осуществлялись при финансовой поддержке Управления перспективных исследований и разработок МО США - DARPA (Отдел оборонных наук DSO) и Управления научных исследований ВМС США - ONR (грант №00014-98-1-0381).

В Японии компания по производству игрушек "Takara Co" разработала две модели подводных роботов "Aquaroid Fish" (рис. 6, см. четвертую сторону обложки) [5]. По заявлению президента компании стоимость этих игрушек не будет превышать 140 дол. США. "Аквароиды" представляют собой рыбы и медузы, которые работают от солнечных и световых батарей. В результате четырех летних исследований, проведенных японской компанией *Mitsubishi Heavy Industries*, был создан малогабаритный рыбоподобный робот (рис. 7, см. четвертую сторону обложки). Общие затраты на проведение этих исследований составили 1 млн дол. США. Рыбоподобный робот имеет массу ~2,5 кг, длину 50 см и способен под водой развивать максимальную скорость ~0,9 км/ч. Размещенные в нем аккумуляторные батареи обеспечивают его плавание под водой в течение 30 мин.

Создаваемые подводные микросистемы характеризуются высокой востребованностью для решения военных и гражданских задач. Поэтому процессы развития этих микророботов по мере достижения практически полезных результатов получат приток новых значительных средств и станут, по-видимому, носить резко ускоряющийся характер.

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. Бочаров Л.Ю., Мальцев П.П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 41-46.
3. Лазарев А. Супер "Джимми Картер" - подлодка будущего // "Новые известия"-01.04.2000.
4. Покровский В. Киборг-амфибия // "Общая газета" - 22-28.06.2000, № 25 (359).
5. Рыбы-роботы для японских детей // "Сегодня" - 17.03.2000, № 58.

УДК 541.183.5+548.571

**В.Е. Земляков, Р.Г. Крышталь, канд. физ.-мат. наук,
А.В. Медведь, д-р физ.-мат. наук, В.В. Шемет, канд. хим.
наук, Институт радиотехники и электроники РАН,
г. Фрязино. E-mail: avm@ms.ire.rssi.ru**

ГАЗОВЫЙ ДАТЧИК С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ПАВ-ВОЛНОВОДА

Описан перестраиваемый газовый датчик на поверхностных акустических волнах (ПАВ), в основе конструкции которого лежит волноводная линия задержки на ПАВ. Обсуждается перспективность использования такого датчика в газовых хроматографах и решетках сенсоров газового анализатора типа "электронный нос", а также в миниатюрных газоанализаторах, изготовленных методами микросистемной техники.

Газовые датчики на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в настоящее время находят широкое применение в газовых анализаторах типа "электронный нос" [1]. Основной частью этого прибора является так называемая решетка датчиков - набор из некоторого числа датчиков, которые обладают разной чувствительностью к различным химическим веществам. Различие откликов достигается здесь за счет использования различных чувствительных покрытий на каждом датчике решетки. Основной недостаток, присущий этим датчикам, заключается в неодинаковой скорости старения чувствительных покрытий.

В настоящей работе описывается перестраиваемый газовый ПАВ-датчик, селективность которого определяется не свойствами чувствительного покрытия, а значением электрического напряжения, приложенного к металлическому волноводу, по которому распространяется ПАВ. Обсуждаются возможности использования такого датчика в решетках датчиков газового анализатора типа "электронный нос" и газовых хроматографах. Отметим, что описываемый датчик, ширина газочувствительного канала которого может составлять всего несколько микрометров, представляется перспективным для применения в газоанализирующих устройствах микросистемной техники.

Конструкция датчика схематично изображена на рис. 1, а. В качестве подложки был использован пьезоэлектрический кристалл 127,8° Y-XLiNbO₃, размером 12×5×0,25 мм³. Для возбуждения и приема ПАВ использовались два встречно-штыревых преобразователя (ВШП) 1. Каждый ВШП состоял из 30 пар электродов с пространственным периодом 8 мкм и апертурой 110 мкм. Расстояние между ВШП было 6,5 мм. Алюминиевый ПАВ-волновод 2, в виде узкой полоски шириной 24 мкм и длиной 5 мм, вместе с акустическими концентраторами 3 и электродами волновода 4 был расположе-

жен между ВШП. Электроды находились на расстоянии всего лишь 30 мкм от волновода, это позволяло получать сильные электрические поля вблизи волновода при сравнительно небольших значениях напряжения на нем. Вносимые потери линии задержки (с ПАВ-волноводом), которой по существу и является рассматриваемый ПАВ-датчик, на основной частоте 486 МГц в 50-омном тракте и без согласующих элементов составили 15 дБ. Полоса пропускания на уровне 3 дБ равнялась 18 МГц. Впервые такая акустическая линия задержки была использована авторами [3], [4] в высокочувствительных датчиках электрического напряжения и в фазовращателях на ПАВ.

Для измерения отклика датчика использовалась экспериментальная установка, показанная схематично на рис. 1, б. Исследуемый ПАВ-датчик в металлическом корпусе с электрическими выводами для подключения к измерительной аппаратуре и со штуцерами для подачи и отвода газа помещался в термостат T₁, в котором поддерживалась постоянная температура 50 °C ± 0,05 °C. Внутренний объем металлического корпуса был около 0,8 см³. В качестве газа-носителя использовался азот. Скорость газового потока в эксперименте равнялась 30 см³/мин ± 1 %. Тестовые аналиты в виде

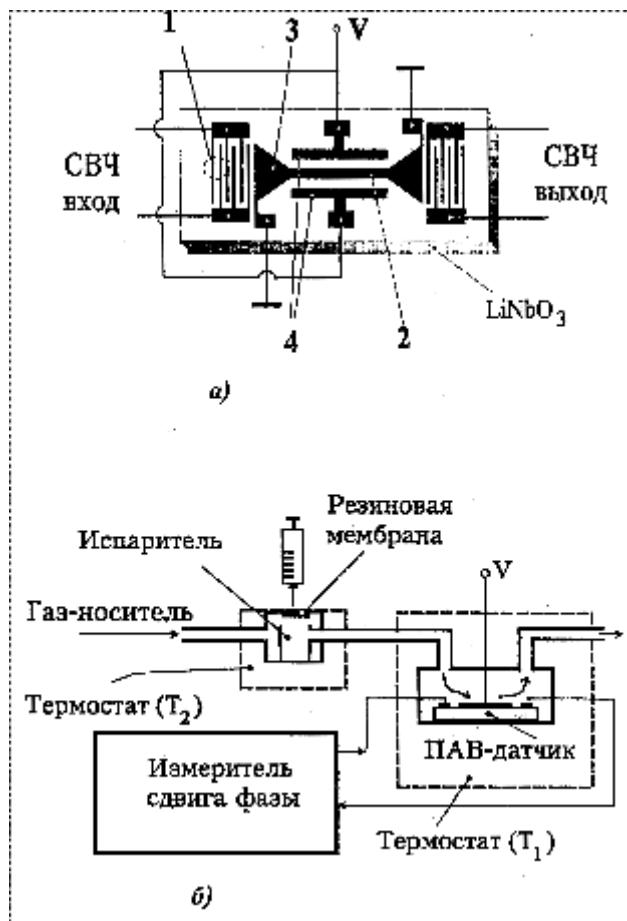


Рис. 2. Схематичное изображение конструкции ПАВ-датчика и экспериментальной установки:
а - конструкция ПАВ-датчика; б - экспериментальная установка

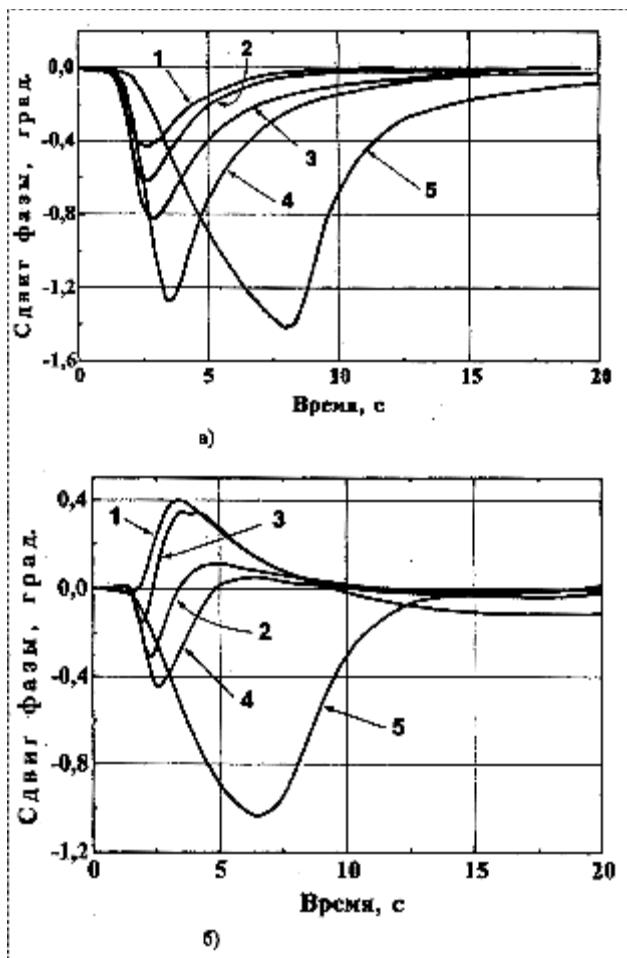


Рис. 2. Измеренные отклики датчика на пары различных спиртов (1 - метанол, 2 - пропанол-2, 3 - этиловый спирт, 4 - пропанол, 5 - изоамиловый спирт):
 а - при отсутствии электрического напряжения на волноводе, б - при приложении на волновод электрического напряжения 25 В.

жидкости объемом 0,1 мкл с помощью микрошприца подавались в испаритель, помещенный в термостат Т2 с постоянно поддерживаемой температурой 135 °C. Эта температура была выше температуры кипения всех используемых в эксперименте анализаторов.

На входной ВШП датчика подавался сигнал частотой 486 МГц и мощностью 1 мВт. Сигнал снимался с выходного ВШП и с помощью фазометра измерялся сдвиг фазы сигнала как функция времени (отклик ПАВ-датчика).

На рис. 2,а представлены измеренные отклики датчика на различные спирты в отсутствии напряжения на электродах волновода (в этом случае волновод и электроды электрически закорочены). Видно, что ПАВ-датчик различает спирты даже без чувствительного пленочного покрытия. И это понятно, так как физические свойства различных спиртов (температура кипения, плотность, вязкость, давление насыщенных паров) отличаются друг от друга, то они и по-разному влияют на распространение ПАВ при адсорбции и десорбции молекул спиртов.

Приложенное на электроды волновода напряжение меняет картину откликов датчика. Из рис. 2,б видно, что одно и то же значение электрического напряжения (в нашем эксперименте это +25 В), приложенного к волноводу, по-разному влияет на отклик датчика на пары различных спиртов.

Физический механизм влияния приложенного к датчику напряжения на его отклик в настоящее время для нас не полностью понятен. Мы полагаем, что несколько факторов одновременно вносят свой вклад в это явление. Наиболее значительный из них, по нашему мнению, - это зависимость отклика датчика на данный газ от изменений компонентов механических смещений в ПАВ при действии электрических полей [5]. Среди других факторов следует упомянуть о возможном влиянии электрических полей на процессы адсорбции и десорбции молекул анализа на рабочей поверхности датчика.

Для исследования возможности работы волноводного датчика в качестве хроматографического детектора между дозирующим устройством и датчиком устанавливалась разделительная колонка с неподвижной фазой (длиной 3 м, внутренним диаметром 2 мм и рабочей температурой 118°C) "Полисорб-1". В качестве анализируемых веществ использовались ацетон и этиловый спирт. В результате при введении пробы этилового спирта на отклике датчика появляются уже два пика, один из которых обусловлен парами воды, а другой - парами спирта. Продифференцировав полученные кривые откликов датчика на пробы этилового спирта и ацетона и объединив их на одном графике, мы получили отклик нашего датчика на разные вещества с более четким разделением пиков, аналогичный по виду обычной хроматограмме (рис. 3).

С помощью волнового датчика проводился анализ трехкомпонентной смеси (рис. 4). Для этого в водку был добавлен метиловый спирт (кривая 3). Анализируя

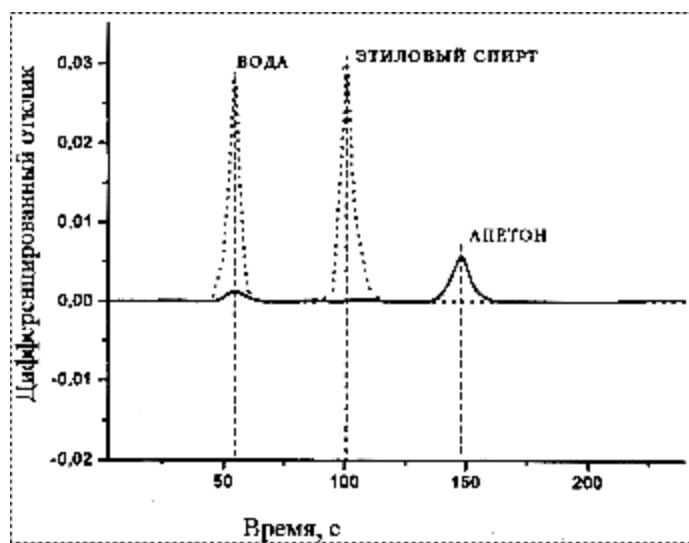


Рис. 3. Отклики датчика на пробы этилового спирта и ацетона в эксперименте с хроматографической колонкой

хроматографические кривые этилового спирта (кривая 1), водки (кривая 2) и нашей приготовленной смеси (кривая 3), можно заметить, что на хроматографической кривой 3 уменьшились пики воды и этилового спирта и появился пик метилового спирта, а на хроматографической кривой 2 увеличился пик воды. То есть с помощью волноводного датчика возможно не только распознавание веществ и смеси веществ, но и количественное определение объемных концентраций компонентов газовой смеси, значит его можно вполне успешно применять в качестве хроматографического детектора.

Для сравнения волноводного датчика с другими хроматографическими детекторами будем следовать методике, изложенной в работе [6]. Обычно предполагают, что пик анализируемого вещества имеет форму распределения Гаусса и связь между концентрацией вещества в максимуме пика, хроматографическими параметрами и массой введенной пробы записывают как

$$c_{i \min} = \frac{2R_n m_i s}{h_i Y_{h/2} F_m} 0,9394, \quad (1)$$

где m_i - масса вводимой пробы, г; h_i - высота пика вещества на хроматограмме, см; s - скорость движения ленты самописца, см/с; $Y_{h/2}$ - ширина пика вещества на половине его высоты, см; F_m - скорость потока газоносителя, см³/с.

Минимально определяемая концентрация компонента [7] в пике на хроматограмме $c_{i \min} = 2R_n / K$ (рис. 5). Минимальная детектируемая высота пика $h_{\min} = 2R_n$. При линейной зависимости между высотой пика и концентрацией вещества, $c_{i \min} / c_{i \max} = h_{\min} / h_i$, получаем уравнение для расчета минимально определяемой концентрации анализируемого вещества

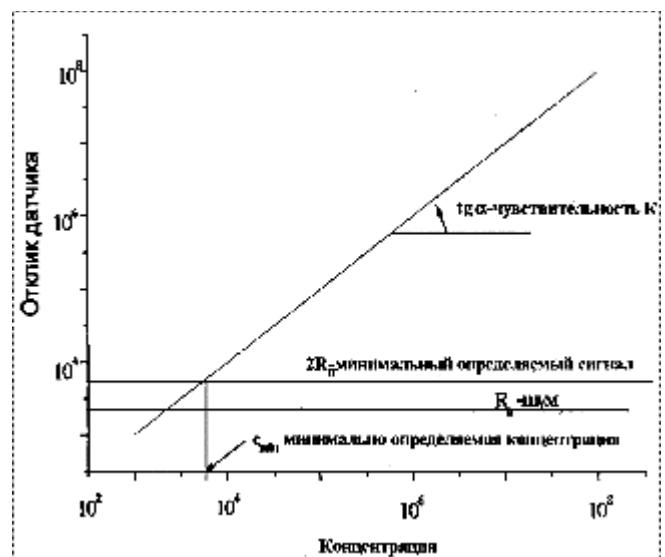


Рис. 5. К методике определения чувствительности датчиков

$$c_{i \max} = \frac{m_i s}{Y_{h/2} F_m} 2 \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}}. \quad (2)$$

Рассчитаем пороговую чувствительность волноводного датчика (минимально определяемую концентрацию), используя эту методику [6]. Наименьший отклик, который удается различить при измерениях, равен 0,2° изменения фазы акустической волны, поэтому определим уровень шума как $R_n = 0,1^\circ$. Используя данные, приведенные на рис. 4, и выражение (2), получаем $c_{i \min} = 2 \cdot 10^{-6}$ г/см³.

Применяя термоэлектрический элемент Пельтье в качестве термостабилизирующего устройства, удалось поддерживать рабочую температуру датчика в диапазоне от 2 до 60°C с точностью 0,01°C. При понижении рабочей температуры датчика наблюдалось увеличение его чувствительности (уменьшение значения минимально измеряемой концентрации).

Введение жидкой пробы даже объемом 0,1 мкл (при температуре датчика ниже ~20 °C) приводило к сильному застужению акустической волны и к невозможности измерений. Для оптимизации значения отклика при пониженных температурах был применен метод дозирования пробы с помощью трубы калиброванного объема и барботирования газа-носителя через соответствующий жидкий аналит.

Результаты измерений отклика датчика (в относительных единицах) на пробу этилового спирта в зависимости от температуры датчика приведены на рис. 6. За единицу на вертикальной оси графика принято значение отклика при температуре 2,3 °C.

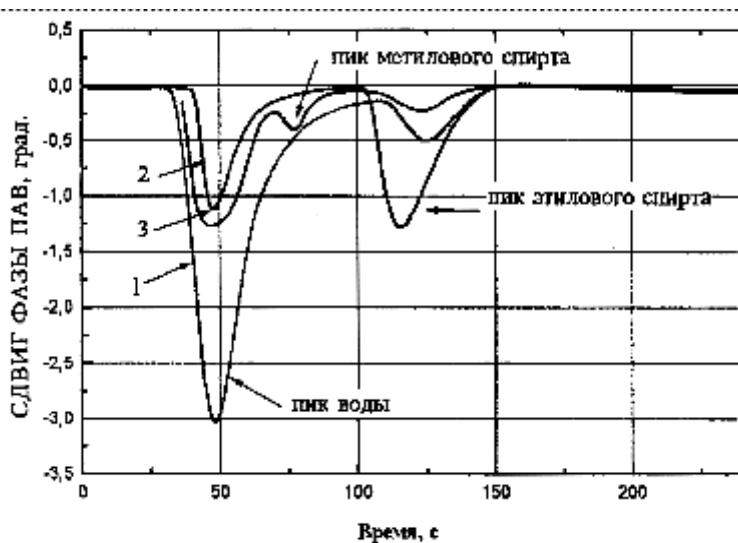


Рис. 4. Отклики датчика на различные смеси в эксперименте с хроматографической колонкой:

1 - отклик датчика на пары 96 %-го этилового спирта, 2- отклик датчика на пары водки; 3 - отклик датчика на пары смеси 25 %-го раствора метилового спирта в водке

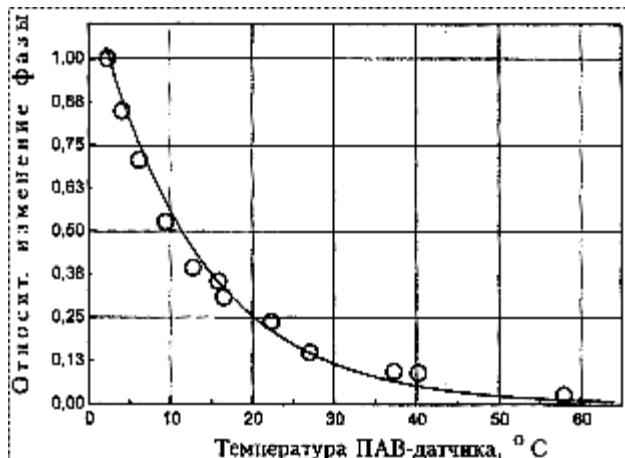


Рис. 6. Измеренная и рассчитанная зависимости отклика датчика на пары этилового спирта от его температуры (O - эксперимент; сплошная линия - рассчитанная зависимость нормированного давления насыщенного пара этилового спирта от температуры)

Зависимость отклика датчика от температуры оказалась аналогичной зависимости давления насыщенного пара от температуры, т.е. отклик датчика определяется условиями конденсации паров анализа на поверхности датчика. При уменьшении рабочей температуры можно уменьшить его пороговую чувствительность до уровня катарометра и даже ниже. Дальнейшее уменьшение минимально детектируемой концентрации возможно при уменьшении объема измерительной камеры. Здесь он равен 0,8 см³, значит отношение площади активной поверхности датчика (газочувствительного канала) к площади внутренней поверхности измерительной камеры равно 5000, т.е. на датчике осаждается 1/5000 часть пробы.

Таким образом, поместив наш датчик в соответствующую камеру, скажем, изготовленную методами микросистемной технологии, можно увеличить его чувствительность еще в -1000 раз. Еще один путь увеличения чувствительности состоит в уменьшении коэффициента шума датчика. В приборах на ПАВ он определяется, как правило, в основном значением вносимых потерь ВШП, поэтому при уменьшении

потерь ВШП возможно и дальнейшее уменьшение значения минимально определяемой концентрации анализа описываемым датчиком.

Таким образом, можно сказать, что предлагаемый нами датчик обладает возможностью перестройки химической селективности (без применения различных чувствительных покрытий) и, следовательно, хорошо подходит для использования в решетке сенсоров "электронного носа". То есть, набрав решетку из любого числа совершенно одинаковых датчиков и приложив различное электрическое напряжение к различным датчикам, можно сделать различной их селективность.

Как показывают наши предварительные эксперименты, такой волноводный датчик может быть использован в качестве хроматографического детектора. Для него характерны сравнительно малые времена отклика и восстановления (несколько секунд), а также высокая чувствительность, которую можно менять в большом диапазоне. Следует отметить, что такие волноводные датчики на ПАВ, газочувствительный канал которых может не превышать всего нескольких микрометров, представляются нам весьма привлекательными для использования в перспективных миниатюрных газоанализаторах, изготовленных методами микросистемной техники.

Список литературы

1. Nagle H.T., Schiffman S.S., Gutierrez-Osuna R. The how and why of electronic noses. // IEEE Spectrum. 1998. September. P. 22-31.
2. Holmberg M., Winquist F., Lundstrom I., et al. Drift counteraction for an electronic nose//Sensors and Actuators B. 1996.35-36, P. 528-535.
3. Gulyaev Yu.V., Mal'tzev O.A., Medved A.V., et al. Tunable phase shifter on the basis of Av/v acoustical wave guide. // Technical Physics Lett. (Russian original). 1985 V.11, N 13. P. 824-828.
4. Medved A.V., Mishkinis R.A., Rutkovsky P.P. Highly sensitive electrostatic voltage sensor on SAW double-waveguide. // Electron. Lett. 1990. V.26. N. 14. P.973-974.
5. Anisimkin V.I., Kotelyanskii I.M., Fedosov V.I., et al. Analysis of the different contributions to the response of SAW gas sensors. // Proc. 1995. IEEE Ultrason. Symp. Seattle. USA. V, 1. P.207-212.
6. Крейчик М., Паюrek Я., Комарс Р. Вычисления и величины сорбционной колоночной хроматографии. М.: Мир. 1993.
7. Столяров Б.В., Савинов И.М., Витенберг А.Г. Руководство к практическим работам по газовой хроматографии. Л.: Химия. 1988.

Зарубежные новости в области МСТ

Компания **Cronos Integrated Microsystems**, активно работающая в области микроэлектромеханики, разработала **микрореле с размерами $1,5 \times 1 \times 0,6$ мм**. По заявлению специалистов фирмы (15 января 2000 года) - это самое миниатюрное из коммерчески доступных **механическое реле** в мире. При изготовлении использовалась технология микроэлектромеханических систем (MEMS). Реле может коммутировать постоянный ток величиной до 300 мА. На испытаниях после 10 млн циклов срабатывания отсутствовали какие-либо механические повреждения контактов. Реле имеет термическое возбуждение с напряжением 5 В. Микрокомпоненты конструкции выполнены из никеля, с золотым покрытием контактов. Изделие **выпускается** в плоском корпусе, совместимом по габаритам с PCMCIA-устройствами. Дополнительно раз-

работаны наборы микрореле, содержащие в одном корпусе до 10 контактных пар. Эти устройства могут найти применение в аппаратуре связи и передачи данных. Цена реле в бескорпусном исполнении составляет \$3(при промышленных объемах поставок).

Источник

*Electronic Products Jan 2000 issue:
[http://electronicproducts.com/
ShowPage1.asp](http://electronicproducts.com>ShowPage1.asp)*

САПР в области микроэлектромеханических систем (MEMS) на кремнии

Фирма Cronos Integrated Microsystems предлагает пакет САПР для разработки микроэлектромеханических систем (MEMS) на кремнии с применением технологии микрообработки. Можно использовать инструментальные средства Jumpstart (которые являются результатом сотрудничества между

Microcosm Technologies и Cronos Integrated Microsystems) для разработки конструкции и процесса. Набор включает MEMS-конструкцию Catapult компании Microcosm со встроенными генераторами формата и комплектом сертифицированных многопользовательских процессов MEMS компании Cronos для инженерного проектирования.

Вместе эти элементы позволяют создать, проверить и оптимизировать конструкцию (которая затем передается на фирму Cronos для изготовления). Получение 15 чипов прототипа - через 12 недель. Стоимость набора для разработки - \$6000. За эту цену пользователь получает набор фотоматриц многоразового использования, а также возможность изготовления и скрайбирования пластин на чипы размерами до 1×1 см.

Источник

*[http://www.ednmag.com/ednmag/reg/
2000/03162000/leadingedge.htm
#06le13](http://www.ednmag.com/ednmag/reg/2000/03162000/leadingedge.htm#06le13)*

Учебная литература по МСТ

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) выпустил учебное пособие "Полупроводниковые сверхрешетки: свойства, применение" (авторы Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Войцеховский А.В.).

В пособии изложены основы теории, электронные и оптические свойства полупроводниковых сверхрешеток. Приведена классификация сверхрешеток. Рассмотрены различные типы полупроводниковых сверхрешеток. Наибольшее внимание уделено сверхрешеткам типа HgTe-CdTe. Рассмотрены параметры легированных и композиционных сверхрешеток. Обсуждаются вопросы создания оптоэлектронных приборов на основе полупроводниковых сверхрешеток.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей "Микросистемная техника" (201800) и "Электронные приборы и устройства" (200300). Оно может быть использовано ими при изучении дисциплин "Компоненты микросистемной техники", "Физические основы электронной техники", "Твердотельные приборы и устройства", "Основы микрофотоэлектроники", а также при выполнении курсовых и дипломных проектов. Пособие может быть полезно студентам других специальностей.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" ЗА 1999, 2000 гг.

Адамов Ю.Ф., Корнеев Н.В., Мокеров В.Г., Неволин В.К. Формирование и электрические свойства планарных 20-наноразмерных структур. № 1, 2000 г.

Бартоломеев А.П., Воробьев Г.Н., Куллик В.П., Соломонов Л.А., Тельчак А.С. Дистанционные измерительные средства систем управления технологическими процессами. № 4, 2000 г.

Белоглазов В.И., Суховеев С.П., Суэтин Н.В. Создание микронных и субмикронных трехмерных структур с использованием стекловолоконных технологий. № 1, 2000 г.

Бочаров Л.Ю., Мальцев П.П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом. № 1, 1999 г.

Бочаров Л.Ю., Эпинатьев И.Д. Состояние и перспективы развития подводных мини- и микrorobotотехнических систем за рубежом. № 4, 2000 г.

Будкин В.Л., Паршин В.А., Прозоров С.В., Соломатин А.К., Соловьев В.М. Инерциальные датчики для систем навигации и ориентации. № 2, 2000 г.

Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии. № 1, 2000 г.

Власов А.И., Семенцов С.Г., Поляков Ю.А. Микропроцессорные микросистемы активной акустической индивидуальной защиты. № 2, 2000 г.

Волчихин В.И., Воячек А.И., Смогунов В.В. Модель гетерогенных структур микросистемной техники. № 3, 2000 г.

Градецкий В.Г. Международный симпозиум "Микроботы, микромашины и системы". № 1, 1999 г.

Градецкий В.Г., Кравчук Л.Н., Пушкин М.М. Динамические процессы в многозвездных микросистемах. № 4, 2000 г.

Гребенников Е.П. Технологические и оптико-физические характеристики бактериородопсинодержащих полимерных пленок. № 2, 3, 2000 г.

Дряхлушин В.Ф., Востоков Н.В., Климов А.Ю., Рогов В.В., Шашкин В.И. Разработка методов сканирующей зондовой литографии для создания нанометровых элементов. № 3, 2000 г.

Дятлов В.Л., Косцов Э.Г. Высокоэнергоемкие микродвигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок. № 1, 1999 г.

Евстратов А.А., Муравьев Д.О., Котов В.П., Курочкин В.Е. Люминесцентные сенсоры кислорода: тенденция и перспектива развития. № 4, 2000 г.

Жирнов М.А. Микрокосмические информационные аппараты на основе микросистемной техники. № 2, 2000 г.

Земляков В.Е., Крышталь Р.Г., Медведь А.В., Шемет В.В. Газовый датчик с перестраиваемой селективностью на основе ПАВ-волновода. № 4, 2000 г.

Зимина Т.М., Лучинин В.В., Крапивина Е.В., Ресин А.С. Микросистемная техника и проблемы биомедицинского анализа. № 2, 3, 2000 г.

Зотов А.В., Коробцов В.В., Лифшиц В.Г. Формирование микроструктур с "захороненными" поверхностными фазами на кремнике. № 3, 2000 г.

Иващенко Е.И., Цветков Ю.Б. Метод размерного стоп-травления кремния в производстве изделий микромеханики. № 1, 2000 г.

Каляев И.А., Котов В.Н., Клиндухов В.Г., Кухаренко А.П. Микроэлектронные сенсорные системы: опыт создания и применения. № 1, 1999 г.

Касаткин С.И., Муравьев А.М., Попадинец Ф.Ф., Никитин П.И., Пудонин Ф.А. Спин-туннельные магниторезистивные переходы и датчики с FeMn фиксирующим слоем. № 4, 2000 г.

Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке. № 1, 1999 г.

Колясников В.А., Рахимбабаев Т.Я. Микрожидкостные системы и их реализация с использованием LIGA-технологии. № 1, 1999 г.

Колясников В.А., Рахимбабаев Т.Я. Синхротронное излучение в микротехнологии. № 1, 2000 г.

Корляков А.В., Лучинин В.В. Перспективная элементная база микросистемной техники. № 1, 1999 г.

Корляков А.В., Лучинин В.В., Никитин И.В. Применение SiC-микронагревательных систем в микросистемной технике. № 2, 2000 г.

Корляков А.В., Лучинин В.В., Четвергов М.В. Сенсоры "жесткого" ультрафиолетового излучения на основе широкозонных материалов. № 2, 2000 г.

Корнеев Н.В., Неволин В.К. Электронные устройства с квазидиодными микроконтактами. № 2, 2000 г.

Котов В.Н., Клиндухов В.Г., Черепахин И.И. Модификация структуры и оптических свойств кремния электроимпульсной обработкой. № 3, 2000 г.

Кригер Ю.Г., Игуменов И.К. Перспективы в молекулярной нанотехнологии. № 4, 2000 г.

Лестев А.М., Попова И.В., Евстифеев М.И., Пятышев Е.Н., Лурье М.С., Семенов А.А. Особенности микромеханических гироскопов. № 4, 2000 г.

Лучинин В.В., Таиров Ю.М. К вопросу об организации подготовки инженерных кадров по специальности "Микросистемная техника". № 2, 2000 г.

Лучинин В.В., Таиров Ю.М., Васильев А.А. Особенности материаловедческого и технологического базиса микросистем. № 1, 1999 г.

Мальцев П.П., Пономарев К.М., Степанов Ю.И. "Умная пыль" на основе микросистемной техники. № 4, 2000 г.

Мельников А.А. Расчет температурных полей в многослойных фотоприемных структурах. № 2, 2000 г.

Петросян Э.А., Никифорова Л.Н. Беспилотные вертолеты - от мини- до микроаппаратов. № 1, 2000 г.

Погалов А.И., Тимошенков В.П., Тимошенков С.П., Чаплыгин Ю.А. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла. № 1, 1999 г.

Рубцов И.В., Несторов В.Е., Рубцов В.И. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника. № 3, 2000 г.

Чомая В.Б. Термомолекулярная энергетика и перспективы ее применения. № 3, 2000 г.

Шалобаев Е.В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней. № 4, 2000 г.

Шелепин Н.А. Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных приборов. № 1, 2000 г.

Янкевич Ю.И., Веркин Ю.В. Состояние и перспективы развития летательных микроаппаратов. № 1, 2000 г.

CONTENTS

Kriger I.G., Igumenov I.K. <i>The Perspectives in Molecular Nanotechnology</i>	3	Evstrapov A.A., Muravyev D.O., Kotov V.P., Kurochkin V.E. <i>Luminescence Sensors of Oxygen: The Tendency and Perspectives of Development</i>	27
It's shown that the most effective results from the development of molecular electronics it should be expected in the areas connected with use of the functional specific properties of molecular systems.			
Shalobaev E.V. <i>Microsystems Technology and Mechatronic: The peculiarities of Correlation Between Micro- and Macrolevels</i>	5	The features construction of optical oxygen sensors on luminescence complexes immobilized in porous matrixes are considered. The existing technologies and ways obtaining of sensing elements are discussed. The factors in fluencing on a property of sensing elements are marked and the main directions of development on improving metrological characteristics of the sensor are chosen.	
Gradetsky V.G., Kravchuk L.N., Pushkin M.M. <i>The Dynamic Processes in Manylink Microsystems</i>	10	Maljtshev P.P., Ponomarev K.M., Stepanov Iu.I. <i>"The Clever" Dust on the Base of Microsystems Technology</i>	33
The results of dynamic processes researches in spline microsystems are presented. The forces stipulating the movement and the forces movement strength in the different mediums for microsystems are considered and estimated. It's represented the mathematical model of microrodot capsule for its movement at the expense of peristalsis taking into account delay times.			
Lestev A.M., Popova I.V., Evstifeev M.I., Patyshev E.N., Lurje M.S., Semenov A.A. <i>The Peculiarities of Micromechanical Gyroscopes</i>	16	The possibilities of creation of transmitters being developed in the form of functionally compound and autonomous devices for preparation of which it's assumed to use the new technologies of microsystems are analysed.	
The results of mathematical simulation, the research of dynamics and errors, the shock actions, the development of designs and paying by work of the technological preparation processes of micromechanical gyroscopes are reduced			
Bartolomeev A.P., Vorobiev G.N., Kulik V.P., Solomonov L.A., Telchak A.S. <i>Remote Control Measuring Means of the Control Systems of Technological Processes</i>	19	Bocharov L.Iu., Epinatjev I.D. <i>Slate and Perspectives of Development of Submarine Mini- and Microrobototechnical Systems Abroad</i>	39
The concept of construction of flexible remote control measuring systems, which provide a reliable and rapid measuring of geometrical parameters of the objects even under infavourable conditions, has been discussed.			
Kasatkin S.I., Muravjev A.M., Popadincts F.F., Nikitin P.I., Pudonin F.A. <i>Spin-Tunnel Magnetoresistant Jumps and Transmitters with FeMn Fixing Layer</i>	23	The possibilities of creation of the different mini- and microsystems using under the water for achievement of the new level of development of sea technologies.	
The elements on the base of spin-tunnel magnetoresistant effects are considered. The theoretical and experimental researches of spin-tunnel structures are described.			
Zemlyakov V.E., Kryshchal R.G., Medved A.V., Shemet V.V. <i>SAW Gas Sensors With Tunable Selectivity Based on Waveguide</i>	40	Zemlyakov V.E., Kryshchal R.G., Medved A.V., Shemet V.V. <i>SAW Gas Sensors With Tunable Selectivity Based on Waveguide</i>	40
In the present article a new SAW chemosensor that contains no sensitive layer is suggested, the selectivity being provided rather by the variation of electric voltage applied to the sensor in a proper manner.			
The sensor is based on a SAW delay line with a metallic waveguide on the surface of the rotated 128°Y - cut LiNbO ₃ piezoelectric substrate. Electrical voltage applied between this waveguide and two electrodes placed on the substrate surface aside the waveguide gives rise to a certain local perturbation of substrate properties in the vicinity of the waveguide and thus permits to vary sensor selectivity to different chemical vapors. Some experimental results on investigation of such a device and demonstrating its selectivity dependence on the applied voltage are presented. Several alcohols (methanol, propanol, ethanol, propanol-2, isoamyl alcohol) were used as testing analytes. Evaluation of this sensor sensitivity in comparison with sensitivity of standard chromatograph detector has been done. Some possible application of the sensor in electronic nose and as a detector of gas chromatograph will be discussed. It should be noted that such a waveguide sensor is promising for future miniature gas analyzing systems fabricated by micromachining technology.			

<p><i>Подписку за рубежом принимает</i> АО "НАУКА ИНТЕРНЕЙШНЛ" Россия, 107076, Москва, Стромынский пер., 4 Тел. (095) 269-71-41. Факс (095) 269-48-97 <u>Remittance may be wired to Bank:</u></p> <p style="text-align: center;">COMMERCIAL BANK "ROSBANK" (SWIFT IRVT US3N) (P.O. Box 208, 11, Masha Poryvaeva Str., 107078, Moscow, Russia) Ace. № 890-0372-508 with BANK OF NEW YORK, NEW YORK, USA, In favour of Joint-Stock Company "Nauka International", Ace. № 40702840100000014653/USD</p> <p style="text-align: center;"><i>The "Nauka international" address is:</i> 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia Tel. (095) 269-71-41 Fax (095) 269-48-97</p>
<p>Journal "Microsystems Engineering" (MSE) Editor in Chief Ph. D Petr P. Maltsev Index 79493. Preis 96.00 \$ Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel. (095) 269-55-10</p>