

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 681.586

С. Е. Александров, д-р техн. наук,
Ю. Д. Акульшин*,
В. К. Васильев, канд. техн. наук СПП РАН,
А. В. Коротынский, канд. техн. наук,
А. В. Коршунов*,
Е. Н. Пятышев*, канд. физ.-мат. наук,
С. С. Тимофеев, канд. техн. наук
ГНЦ ЦНИИ РТК (г. Санкт-Петербург)
*СПбГТУ

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИКРОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ МСТ

Рассматривается ряд разработок реактивных микродвигателей различного назначения, создаваемых на базе технологий микросистемной техники. Разработки микродвигателей охватывают самый широкий круг от двигателей холодной тяги до охлаждаемых микроЖРД, от сверхвысокооборотных микроТРД до твердотопливных многоэлементных конструкций.

Выделены некоторые характерные особенности и направления развития в области энергетических микромашин — одной из новых областей МСТ.

Развитие микросистемной техники и связанных с ней технологий привело к возникновению класса энергетических микромашин [1–5].

Одной из перспективных областей применения энергетических микромашин является создание различных микродвигателей для летательных микроаппаратов (ЛМА). Создание ЛМА авиационного и космического назначения ведется целым рядом организаций в США, европейских странах, в Японии и Китае. Если для успешного создания малогабаритных летательных аппаратов в 80-е годы было достаточно уменьшения габаритных размеров радиоэлектронных систем простым уменьшением традиционных компоновочных схем, то для создания ЛМА необходимо принимать принципиально новые решения и проводить исследования в различных областях науки и техники [6–8].

Другой важной областью применения является энергообеспечение как устройств микросистемной техники (микророботы, "разумная" пыль), так и макрообъектов. Так, планируется обеспечить замену химических элементов питания на более компактный микротурбоэлектрогенератор для применения в системе энергообеспечения "электронной амуниции солдата" [1].

Реактивные микродвигатели являются предметом ряда проектов и разработок для различных

объектов авиационного, ракетного и космического назначения [5–14]. Осуществляемые разработки охватывают самый широкий круг типов и видов реактивных двигателей: от двигателей холодной тяги до охлаждаемых жидкостных ракетных микродвигателей (микроЖРД), от сверхвысокооборотных твердотопливных ракетных двигателей (микроТРД) до твердотопливных многоэлементных конструкций. С точки зрения микросистемной техники это одна из самых сложных областей, требующая теснейшего междисциплинарного взаимодействия таких научных направлений как газодинамика, физика и техника сжигания топлива, теория реактивных двигателей, материаловедение, динамика газовых опор, технологии микромеханических систем.

В существующих технологиях микрообработки в основном используется литография для построения планарных (плоских) конфигураций, по которым затем формируются объемные структуры методами травления или осаждения в вакууме. Некоторое число таких слоев с заданной структурой обеспечивает создание сложных трехмерных устройств (к настоящему времени число слоев достигает 10...15). Достоинствами такого технологического подхода при создании энергетических устройств являются:

- обеспечение очень высокой точности изготовления (менее микрометра);
- параллельное ("групповое") изготовление большего числа одинаковых устройств (обеспечивающее низкую стоимость единичного изделия);
- однотипное и одновременное изготовление механических, электрических и других (например, химических) элементов устройств со сложной топологией и комплексной структурой.

В противоположность обычным технологическим методам усложнение геометрической конфигурации (в рамках планарности) не является ограничением и не ведет к удорожанию устройства [2].

Работы, которые ведутся в рамках проекта "The MIT Microengine Project" с 1995 г., привели к созданию в 1999 г. демонстрационных вариантов микроГТД и микроЖРД. В основу разработок положена концепция энергетических MEMS-устройств (power MEMS) [1–3]. Концепция микротепловых машин основывается на микрообработке (micromachining) высокотемпературных неметаллических материалов: керамики, ситаллов и монокристаллических материалов, таких как кремний и карбид кремния. Положенный в основу концепции анализ и выполненные к настоящему времени эксперименты показывают, что в микротепловых машинах достижимы удельные мощности наибо-

лее совершенных двигательных установок и стационарных турбогенераторов [5].

Показано, что наиболее приемлемыми для реализации высокоэффективных тепловых машин являются размеры 1...5 мм. В этом диапазоне размеров в достаточной мере обеспечиваются благоприятные с точки зрения масштабирования сочетания эффективности газо- и термодинамических законов, при том что неблагоприятное нарастание потерь из-за вязкости еще невелико.

Демонстрационный микротурбореактивный двигатель (рис. 1, см. третью сторону обложки) при диаметре 21 мм, толщине 3,7 мм и массе в 2 г имеет тягу в 11 гс при потреблении 16 г/ч водорода. Эффективность микромашины определяется температурой на входе в турбину 1600 К и высокой частотой вращения ротора — до 1,2 млн об/мин. Микродвигатель имеет одноступенчатый центробежный компрессор, изолированную кольцевую камеру сгорания и центростремительную турбину (рис. 2, см. третью сторону обложки, рис. 3). Ротор (компрессор на валу с турбиной) вращается в газовых подшипниках. Выбранная схема удачно отвечает особенностям микротехнологий, требующих планарной компоновки элементов структуры.

Микродвигатель выполнен из монокристаллического кремния методами глубокого реактивного ионного травления (*deep reactive ion etched — DRIE*). Каждый слой шестислойной "этажерочной" конструкции имеет свою топологию, причем до конечных операций сварки частей и разрезания ведется обработка методами глубокого реактивного ионного травления одновременно нескольких одинаковых структур (частей будущих отдельных микромашин). Так на кремниевой пластине (*silicon wafer*) диаметром 76 мм помещается одновременно десять отдельных заготовок. Пластины соединяются в "этажерку" методами анодной сварки (*anodizing bonding*) (рис. 4) [14].

Первым применением этого микродвигателя была установка его в качестве источника тяги на летающем

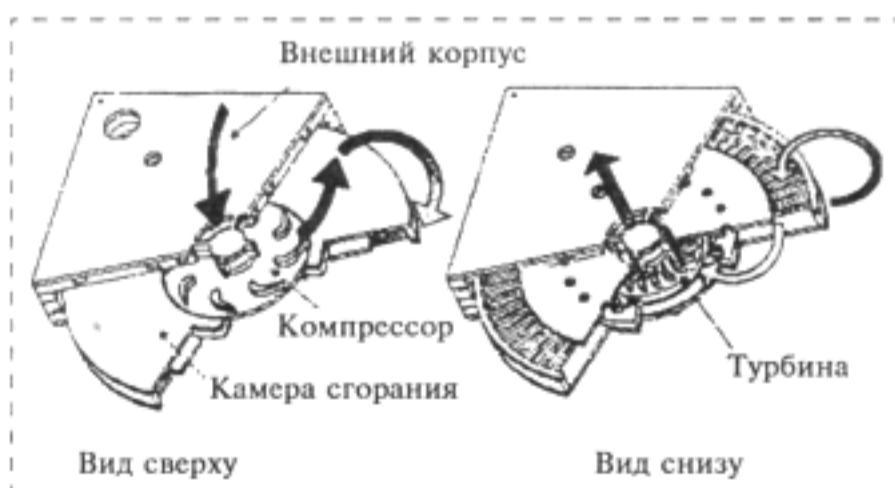


Рис. 3. Разрез трехмерной проекции и схема течения в проточной части демонстрационного микрореактивного двигателя, разрабатываемого в MIT [14]

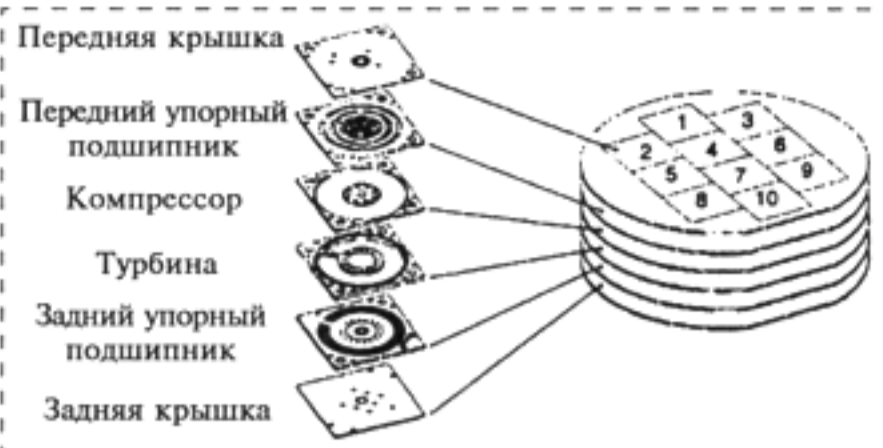


Рис. 4. "Этажерочное" устройство демонстрационного микрореактивного двигателя [14]

микроаппарате (ЛМА) — (*MAV micro air vehicle*). В качестве топлива был использован бутан [14].

Ведется разработка технологии изготовления микроГТД методами усовершенствованного газофазного осаждения карбида кремния. Переход на материал, имеющий существенно более высокую жаропрочность, должен обеспечить возможность более эффективно использовать потенциал топлива и достигнуть существенного улучшения характеристик разрабатываемой схемы микроГТД. Повышение температуры на входе в турбину до 2450 К обеспечит увеличение тяги до 20 гс (вместо 11 гс у демонстрационной модели двигателя) при увеличении расхода топлива с 17 до 27 г/ч при сохранении массогабаритных показателей [14].

Разработка микроЖРД, проводимая в рамках того же проекта "The MIT Microengine Project", основана на тех же концептуальных и технологических принципах, что и разработка микроГТД. Демонстрационный вариант (рис. 5, см. третью сторону обложки), имеющий габаритные размеры $15 \times 7,5 \times 3$ мм и массу около 1 г, должен обеспечивать 15 Н (1,5 кгс) тяги (отношение тяги к массе более 1500), расходуя 5 г/с топлива (жидкий кислород и метанол) при давлении в камере сгорания 125 атм. МикроЖРД имеет планарную (плоскую) структуру. Топливо в камеру сгорания поступает с боковых стенок (рис. 6, см. третью сторону обложки, рис. 7) по системе встречных инжекторов (по 242 для горючего и окислителя). Двигатель имеет систему охлаждения камеры и сопла, для охлаждения используется метанол. Выполнено несколько вариантов сопел, отличающихся степенью расширения. В демонстрационном варианте микроЖРД используется внешняя система подачи горючего и окислителя.

Микродвигатель выполнен из монокристаллического кремния по той же технологии, что и микроГТД. "Этажерочная" шестислойная структура и две половины камеры сгорания в промежуточной стадии сборки изображены на рис. 6 [13].

На рис. 8 представлен вариант микроЖРД со степенью расширения сопла ~1:15 для условий выхода в атмосферу на уровне моря [3].



Рис. 7. Демонстрационный микроЖРД. Схема расположения инжекторов встречной подачи компонентов [13]

Дальнейшая разработка проекта ведется по пути отработки МСТ-технологий жаростойких материалов и усовершенствованных методов структурного, газодинамического и системного проектирования, нарабатываемых на этапе создания демонстрационных микроЖРД и микроГТД. Ход разработок позволяет считать, что в ближайшем будущем будут созданы микротепловые машины с удельными параметрами, близкими к уровню "больших" машин, и с эквивалентной удельной стоимостью.

Разработка МРД холодного газа проводится для первого европейского наноспутника [16]. Двигатель является частью системы, имеющей модульную структуру. Каждый двигательный модуль содержит четыре независимых микротяговых устройства на диапазон тяги от 0,1 до 5 мН. Модуль имеет "этажерочную" семислойную структуру и вписывается в защитный сферический кожух диаметром 40 мм (рис. 9). Четыре слоя герметично сварены друг с другом, образуя узел микротяговых устройств, массой не более 10 г. Три других слоя содержат управляющую электронику. Каждое из микротяговых устройств состоит из фильтра, пропорционального клапана, сопла и соединяющих каналов. Пять пьезоэлектрических элементов управляют

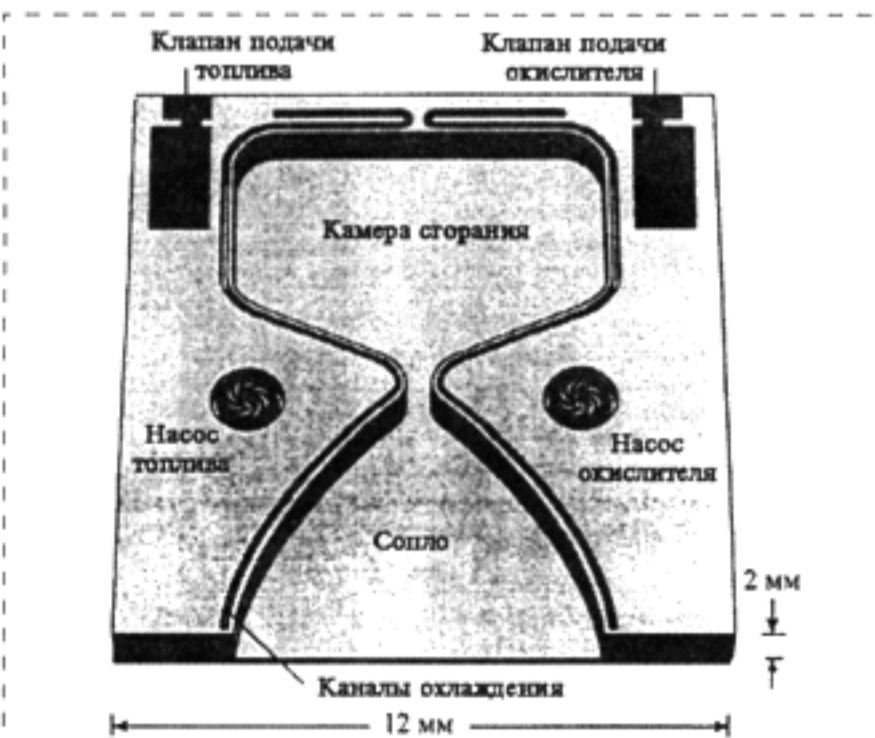


Рис. 8. Схема микроЖРД [3]

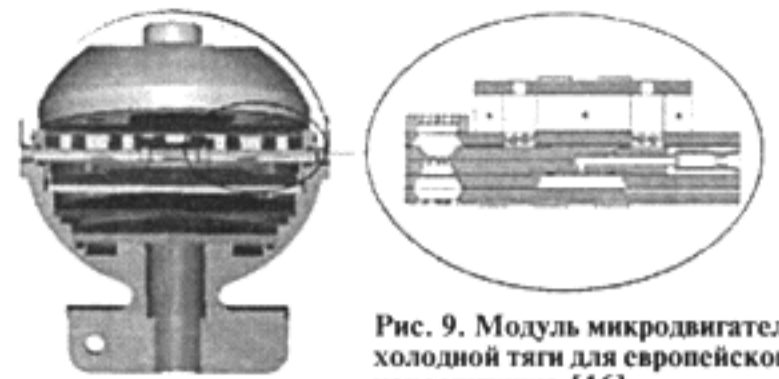


Рис. 9. Модуль микродвигателя холодной тяги для европейского наноспутника [16]

положением седла клапана. Газ поступает в сопло через небольшую полость, в которой имеется дифференциальный датчик давления, выполненный в общем цикле изготовления одного из слоев как его интегральная часть. Сигнал от датчика давления используется в качестве сигнала обратной связи в контуре регулирования пропорционального клапана. Сопло каждого из микротяговых устройств выполнено с помощью лазерного травления с точностью порядка 1 мкм. Разрабатывается модификация двигателя, отличающаяся тем, что в газовом тракте имеется интегральный подогреватель газа, что повышает эффективность двигателя. Элемент нагревателя, выполненный из поликремния, представлен на рис. 10 [16].

Аэрокосмическая корпорация TRW совместно с Калифорнийским технологическим институтом разрабатывают концепцию "цифровой микрореактивной тяги" [17]. Прототипный твердотопливный микротяговый чип предназначен для решения задач ориентации и поддержания высоты орбиты для перспективных микроспутников, функционирующих как "облако" (массив спутников — *array*). Предполагается использование наборов из большого числа таких микротяговых устройств, каждое из которых рассчитано на выработку только одного импульса тяги точной величины. Микротяговый чип имеет размеры 3 × 2 мм, содержит 15 одноразовых микротяговых устройств и обеспечивает соз-

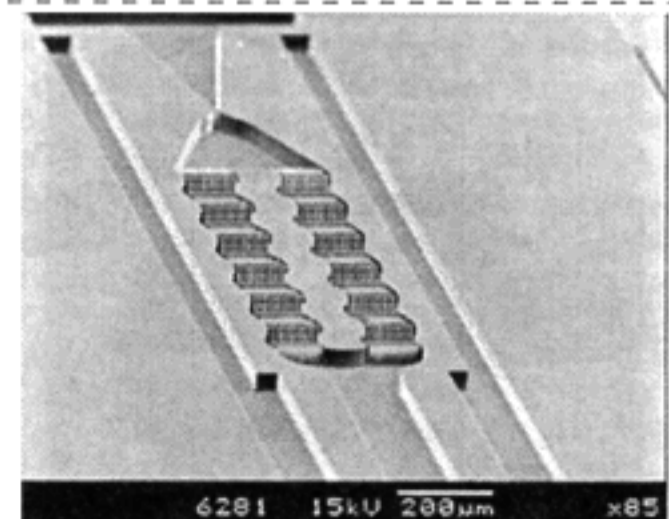


Рис. 10. Сопло с интегральным нагревателем для одного из вариантов микродвигателя европейского наноспутника [16]

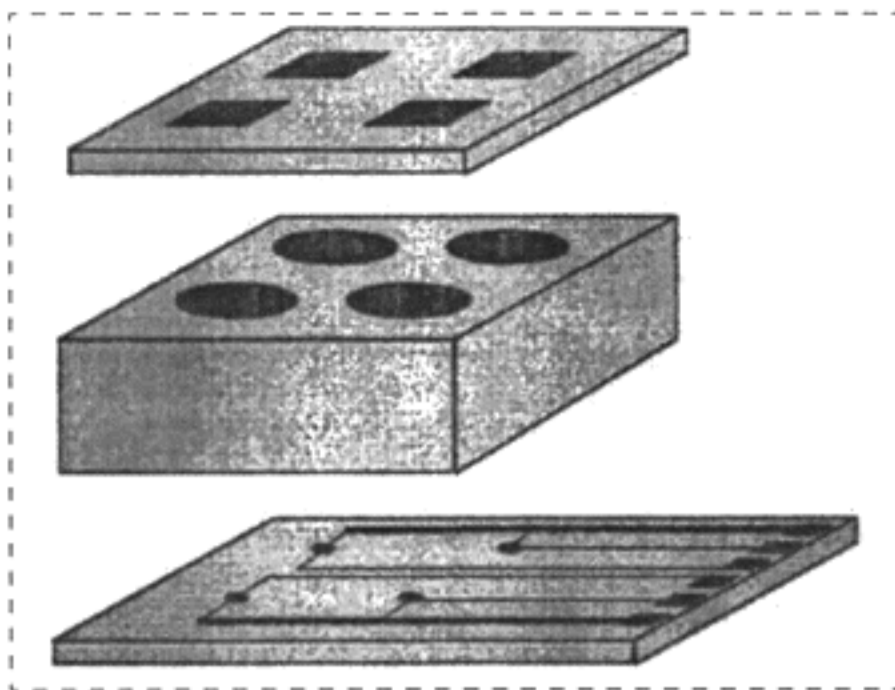


Рис. 11. Вид этажерочной схемы "цифрового" микротягового устройства [17]

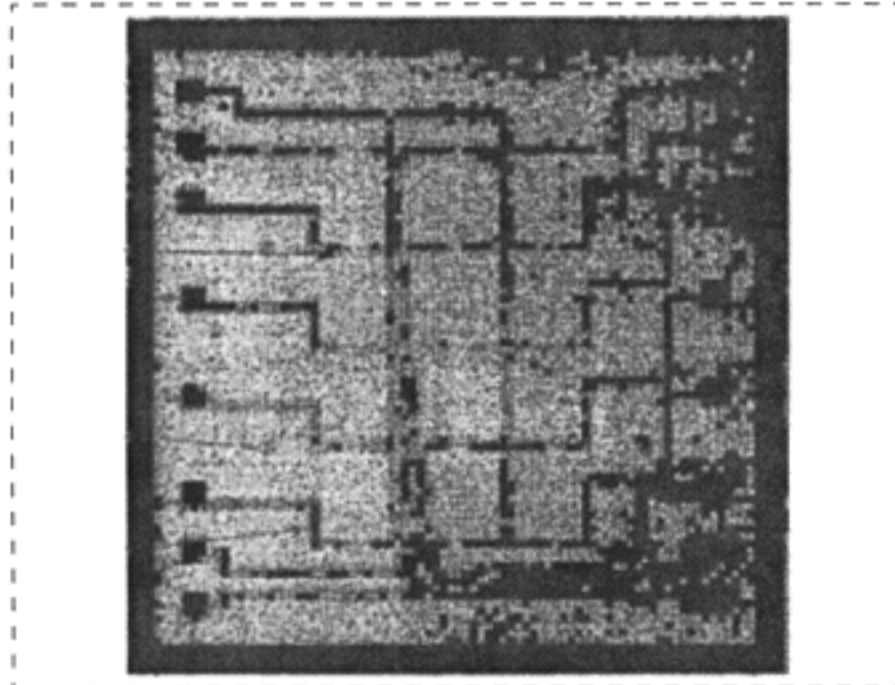


Рис. 12. Вид нижнего слоя "цифрового" микротягового устройства, содержащего микрорезисторы-воспламенители [17]

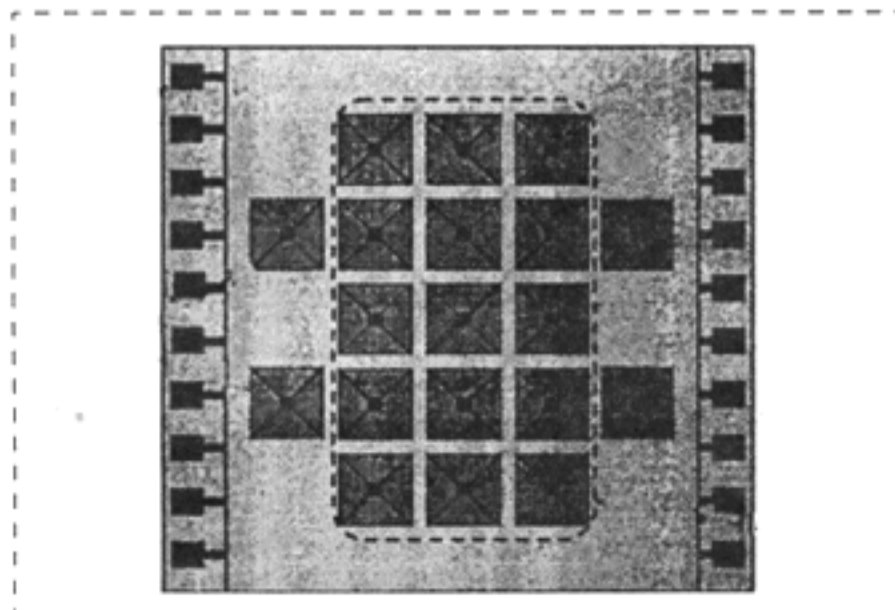


Рис. 13. Вид верхнего слоя "цифрового" микротягового устройства, содержащего сопла [17]

дание импульсов тяги от $0,1 \text{ мН} \cdot \text{с}$ и с мощностью около 100 Вт . Топливом служит стифнат свинца. Индивидуальное микротяговое устройство содержит электрически нагреваемый воспламенитель, камеру с твердотопливным зарядом и сопло. Микротяговый чип имеет "этажерочную" трехслойную структуру (рис. 11). Нижний слой (рис. 12) выполнен из монокристаллического кремния, на котором стандартными для микроэлектроники методами изготовлены 15 поликремниевых микрорезисторов — воспламенителей, соединенных металлическими дорожками с выполненными по периферии контактными площадками (в этом слое планируется размещение электронных схем, обеспечивающих обработку, адресацию, управление). Средний слой (рис. 13) выполнен из фотостекла Foturan толщиной $1,5 \text{ мм}$ с 15 отверстиями — камерами твердотопливных зарядов. Отверстия выполнены методами фотолитографии и селективного травления. В зависимости от назначения чипа (создание одного из трех по дискретности уровней тяги) размеры отверстий выбираются из ряда $300, 500$ или 700 мкм . Верхний слой (рис. 14) содержит массив из 15 тонких квадратных в плане диафрагм образующих в средней части сопла. Диафрагмы выполнены методами анизотропного жидкостного травления.

Преимущество данной разработки состоит в отсутствии движущихся частей (клапанов), подводящих газ магистралей и топливных баков. Дальнейшее развитие "цифровой микрореактивной тяги" планируется вести по линии уменьшения элементарного микротягового устройства. Предполагается, что при этом удастся получать до миллиона отдельных тяговых устройств в одном цикле на одной стандартной шестидюймовой пластине (*wafer*) с очень низкой стоимостью отдельного микротягового чипа [17].

В ГНЦ ЦНИИ робототехники и технической кибернетики ведутся работы в области разработки

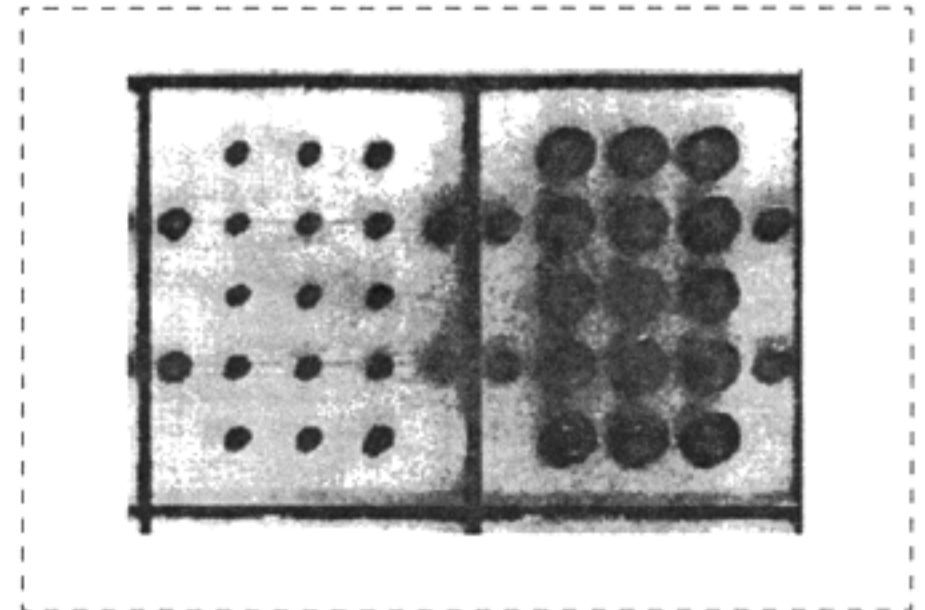


Рис. 14. Вид среднего слоя "цифрового" микротягового устройства, содержащего камеры с зарядами твердого топлива [17]

микророботов, в том числе по созданию микроактиваторных устройств и, в частности, микрореактивных двигателей различного назначения. Планируемые применения: двигатели малой тяги, двигатели для ЛМА, устройства для адаптивного управления газовыми потоками и распределенной тяги. В ходе работ совместно с лабораториями "МТ и МЭМС" и "Вычислительная механика" СПбГПУ разрабатываются микросопловые устройства для микрореактивного двигателя (рис. 15, см. четвертую сторону обложки).

Для потоков в плоском сверхзвуковом сопле малых размеров характерен как переходный к турбулентному, так и ламинарный режимы течения. Течения при высоких скоростях в устройствах, имеющих малые размеры, изучены недостаточно. Экспериментальные исследования пограничного слоя в соплах показывают сложный характер течения, в том числе возникновение областей, в которых потери на трение практически не зависят от числа Re и связаны с типом шероховатости [9, 15].

Для предварительной оценки разрабатываемых конструкций проводился ряд численных экспериментов, на рис. 16 (см. четвертую сторону обложки) показано распределение скоростей в расчетной зоне для одной из конструкций проектируемых сопловых аппаратов.

Разрабатываемая конструкция плоского сопла обеспечивает возможность его изготовления методами микротехнологий. В качестве материала для микросопловых устройств выбрано фоточувствительное ситализируемое стекло. Устройство представляет собой многослойную структуру (рис. 17, см. четвертую сторону обложки), состоящую из ряда слоев свариваемых легкоплавким стеклом. Методы микротехнологий позволяют сравнительно просто моделировать устройства с различной геометрией, изготавливая в одном технологическом цикле образцы сопел, отличающихся профилированием проточной части. На рис. 18 приведен пример фотошаблона для деталей сопловых устройств с различной геометрией.

Выполнено экспериментальное исследование микросопловых устройств на продувке сжатым воздухом (холодная тяга). Для эксперимента были выбраны образцы сопел МРД пяти типов профилирования проточной части. Для каждого из типов профилирования проточной части были изготовлены образцы с различной высотой — от 400 до 2000 мкм с шагом 400 мкм. Выбранные образцы продувались на экспериментальном стенде (рис. 19, см. четвертую сторону обложки).

Таким образом, для существующих разработок микрореактивных двигателей характерны следующие особенности:

1. Возможность получения высокой эффективности, сравнимой по удельным параметрам с эф-

фективностью современных крупномасштабных реактивных двигателей.

2. Использование высокоэффективных методов сжигания топлива при высоких температурах и давлениях не приводит к увеличению массогабаритных показателей, характерному для макромасштабных машин.

3. Реализуются тенденции создания многоэлементных устройств, характерные как для развития МСТ, так и для эволюции макродвигателей (многокамерные, многосопловые схемы).

4. Микромасштабы проточных частей и узлов приводят к необходимости создания датчиков и исполнительных устройств, выполненных как одно целое с конструкцией. Просматривается тенденция к интегрированию в микрообъеме не только "тепловой" машины, но и систем управления, контроля и диагностики.

Анализ опубликованных результатов и накопленный в ходе разработок опыт показывает, что:

- разработки необходимо вести, обеспечивая взаимодействие таких научных направлений, как газодинамика, физика и техника сжигания топлива, теория реактивных двигателей, материаловедение, динамика газовых опор и др. с возможностями и технологиями МСТ;
- прямой перенос существующих методик расчета "макротехник" на разработки микротепловых машин обеспечивает в лучшем случае приближенные оценки тенденции развития процессов;
- для применения современных программных средств вычислительной механики требуется их адаптация к условиям течения газа и жидкости в узких каналах с использованием вновь получаемой экспериментальной информации;
- низкая стоимость и возможность группового изготовления деталей прототипа делает весьма желательной постановку оптимизации узлов, систем и всего двигателя путем активного перебора параллельного ряда вариантов;
- для экспериментальных исследований необходимо создание специализированной микросенсорной базы, агрегатированной со структурой микроканалов МРД, разработка методик измерений и создание новых приборов, обеспечивающих получение достоверной информации в микромасштабах.

Список литературы

1. Epstein A. H. et al. Power MEMS and Microengines // IEEE Transducers on Solid State Sensors and Actuators, Chicago, IL, June 1997.
2. Epstein A. H. et al. Micro-heat engines, gas turbines and rocket engines. The MIT Microengine Project, 28th AIAA Fluid Dynamics and 4th Shear Flow Control Conference, June 1997.
3. US Patent US5932940: Microturbomachinery. Epstein A. H. et al. 1999.
4. 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.

5. Epstein A. H. et al. Shirbutton-sized gas turbines: the Engineering Challenges of micro high speed rotating machinery // 8th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-8), Honolulu, HI, March 2000.
6. Янкевич Ю. И., Веркин Ю. И. Состояние и перспективы развития летательных микроаппаратов // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 37—39.
7. Bayt R. L., Ayon A. A., Breuer K. S. Micropropulsion for the Aerospace Industry // Sensors: Technology and Design. February 2002.
8. McMichael J. M., Francis M. S. Micro air vehicles — Toward a new dimension in flight // http://www.darpa/mil/tto/MAV/mav_auvsi.html.
9. Janson S. W., Helvajian H., Breuer K. MEMS, Microengineering and Aerospace Systems // AIAA 99-3802. 1999.
10. Lewis D., Janson S., Cohen R., Antonsson E. Digital Micro-Propulsion // Proc. IEEE int. MEMS conf. (MEMS 99), Jan. 17—21, 1999.
11. Stenmark L. Micro propulsion thrusters aim at space // Micro Structure Bulletin. N Aug. 1998.
12. Pranajaya F. M. Progress on colloid micro-thruster research and flight testing // Proceeding of the International Conference on Integrated Micro/Nanotechnology for Space Applications. 1997.
13. London A. P., Ayon A. A., Epstein A. H. et al. Microfabrication of a high pressure bi propellant rocket engine // Sensors and Actuators A92 (2001). P. 351—357.
14. Lohner K. A. Microfabricated refractory ceramic structures for micro turbomachinery // M. S. D. Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, Cambridge, MA, 1999.
15. Al-Midani O. Preliminary design of liquid bipropellant micro-fabricated rocket engine // M. S. D. Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, Cambridge, MA, 1998.
16. Stenmark L. Micro propulsion thrusters aim at space // Micro Structure Bulletin N Aug 1998.
17. Lewis D., Janson S., Cohen R., Antonsson E. Digital Micro-Propulsion // Proc. IEEE int. MEMS conf. (MEMS 99), Jan 17—21, 1999.
18. Livermore C. Here come the microengine // The Industrial Physicist. Dec 2001/Jan 2002. P. 20—25.
19. Лучинин В. В. Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение. 1999. Том 9, № 1. С. 3—18.

УДК 621.315.617.5

М. Л. Баранчиков, А. В. Леонов,
П. П. Мальцев*, д-р техн. наук, проф.,
 А. Д. Мокрушин, канд. физ.-мат. наук,
 В. Н. Мордкович, д-р физ.-мат. наук, проф.,
 Н. М. Омеляновская, канд. физ.-мат. наук, Д. М. Пажин,
 Институт проблем технологии микроэлектроники
 и особо чистых материалов РАН
 * СПП РАН

ПОЛЕВОЙ ДАТЧИК ХОЛЛА НА ОСНОВЕ СТРУКТУР "КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ"

Рассматриваются основные характеристики нового типа магниточувствительного элемента — полевого датчика Холла (ПДХ) на основе структур "кремний-на-изоляторе". ПДХ сочетает в себе возможности традиционного МОП транзистора и датчика Холла и обладает очень широким динамическим диапазоном магниточувствительности (от 10^{-7} Тл до единиц Тл), повышенной рабочей температурой (до 300 °С), низким энергопотреблением (рабочий ток не более 0,4 мА), высокой устойчивостью к воздействию облучения, низким уровнем шумов.

Датчики Холла (ДХ) являются самыми распространенными преобразователями магнитного поля в электрический сигнал, применяемыми в различных областях науки и техники. Принцип их действия основан на эффекте Холла, т. е. на возникновении поперечной разности потенциалов в проводнике, по которому протекает электрический ток, при одновременном воздействии поперечного по отношению к направлению тока магнитного поля. Для изготовления ДХ широко

используются полупроводниковые материалы типа Si, GaAs, InSb [1].

При всем разнообразии конструкций ДХ и технологий их изготовления все современные ДХ представляют собой пассивный регистратор внешнего воздействия, не обладающий свойствами внутреннего усиления полезного сигнала. В данной статье рассматривается новый тип преобразователя магнитного поля — полевой датчик Холла на основе структуры "кремний-на-изолято-

ре" (КНИ ПДХ), обеспечивающий не только регистрацию магнитного сигнала, но и возможности управления величиной сигнала и измерения в режимах цифровой и аналоговой модуляции [2]. Принципиальная возможность создания таких датчиков обсуждалась ранее [3, 4].

Как известно, к основным параметрам ДХ относятся:

- пороговая магнитная чувствительность;
- динамический диапазон магнитной чувствительности;
- энергопотребление;
- удельная магнитная чувствительность;
- диапазон рабочих температур;
- остаточное напряжение* [1].

Из общих физических соображений следует, что переход от кремния к КНИ-структуре позволяет улучшить каждый из этих параметров.

Пороговая магнитная чувствительность ДХ обратно пропорциональна толщине тела магниточувствительного элемента [5]. Кремниевые ДХ обычно форми-

*Остаточное напряжение — это напряжение на холловских контактах при протекании тока через ДХ при нулевом магнитном поле.

5. Epstein A. H. et al. Shirbutton-sized gas turbines: the Engineering Challenges of micro high speed rotating machinery // 8th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-8), Honolulu, HI, March 2000.
6. Янкевич Ю. И., Веркин Ю. И. Состояние и перспективы развития летательных микроаппаратов // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 37—39.
7. Bayt R. L., Ayon A. A., Breuer K. S. Micropropulsion for the Aerospace Industry // Sensors: Technology and Design. February 2002.
8. McMichael J. M., Francis M. S. Micro air vehicles — Toward a new dimension in flight // http://www.darpa/mil/tto/MAV/mav_auvsi.html.
9. Janson S. W., Helvajian H., Breuer K. MEMS, Microengineering and Aerospace Systems // AIAA 99-3802. 1999.
10. Lewis D., Janson S., Cohen R., Antonsson E. Digital Micro-Propulsion // Proc. IEEE int. MEMS conf. (MEMS 99), Jan. 17—21, 1999.
11. Stenmark L. Micro propulsion thrusters aim at space // Micro Structure Bulletin. N Aug. 1998.
12. Pranajaya F. M. Progress on colloid micro-thruster research and flight testing // Proceeding of the International Conference on Integrated Micro/Nanotechnology for Space Applications. 1997.
13. London A. P., Ayon A. A., Epstein A. H. et al. Microfabrication of a high pressure bi propellant rocket engine // Sensors and Actuators A92 (2001). P. 351—357.
14. Lohner K. A. Microfabricated refractory ceramic structures for micro turbomachinery // M. S. D. Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, Cambridge, MA, 1999.
15. Al-Midani O. Preliminary design of liquid bipropellant micro-fabricated rocket engine // M. S. D. Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, Cambridge, MA, 1998.
16. Stenmark L. Micro propulsion thrusters aim at space // Micro Structure Bulletin N Aug 1998.
17. Lewis D., Janson S., Cohen R., Antonsson E. Digital Micro-Propulsion // Proc. IEEE int. MEMS conf. (MEMS 99), Jan 17—21, 1999.
18. Livermore C. Here come the microengine // The Industrial Physicist. Dec 2001/Jan 2002. P. 20—25.
19. Лучинин В. В. Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение. 1999. Том 9, № 1. С. 3—18.

УДК 621.315.617.5

М. Л. Баранчиков, А. В. Леонов,
П. П. Мальцев*, д-р техн. наук, проф.,
А. Д. Мокрушин, канд. физ.-мат. наук,
В. Н. Мордкович, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Н. М. Омеляновская, канд. физ.-мат. наук, **Д. М. Пажин**,
 Институт проблем технологии микроэлектроники
 и особо чистых материалов РАН
 * СПП РАН

ПОЛЕВОЙ ДАТЧИК ХОЛЛА НА ОСНОВЕ СТРУКТУР "КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ"

Рассматриваются основные характеристики нового типа магниточувствительного элемента — полевого датчика Холла (ПДХ) на основе структур "кремний-на-изоляторе". ПДХ сочетает в себе возможности традиционного МОП транзистора и датчика Холла и обладает очень широким динамическим диапазоном магниточувствительности (от 10^{-7} Тл до единиц Тл), повышенной рабочей температурой (до 300 °С), низким энергопотреблением (рабочий ток не более 0,4 мА), высокой устойчивостью к воздействию облучения, низким уровнем шумов.

Датчики Холла (ДХ) являются самыми распространенными преобразователями магнитного поля в электрический сигнал, применяемыми в различных областях науки и техники. Принцип их действия основан на эффекте Холла, т. е. на возникновении поперечной разности потенциалов в проводнике, по которому протекает электрический ток, при одновременном воздействии поперечного по отношению к направлению тока магнитного поля. Для изготовления ДХ широко

используются полупроводниковые материалы типа Si, GaAs, InSb [1].

При всем разнообразии конструкций ДХ и технологий их изготовления все современные ДХ представляют собой пассивный регистратор внешнего воздействия, не обладающий свойствами внутреннего усиления полезного сигнала. В данной статье рассматривается новый тип преобразователя магнитного поля — полевой датчик Холла на основе структуры "кремний-на-изолято-

ре" (КНИ ПДХ), обеспечивающий не только регистрацию магнитного сигнала, но и возможности управления величиной сигнала и измерения в режимах цифровой и аналоговой модуляции [2]. Принципиальная возможность создания таких датчиков обсуждалась ранее [3, 4].

Как известно, к основным параметрам ДХ относятся:

- пороговая магнитная чувствительность;
- динамический диапазон магнитной чувствительности;
- энергопотребление;
- удельная магнитная чувствительность;
- диапазон рабочих температур;
- остаточное напряжение* [1].

Из общих физических соображений следует, что переход от кремния к КНИ-структуре позволяет улучшить каждый из этих параметров.

Пороговая магнитная чувствительность ДХ обратно пропорциональна толщине тела магниточувствительного элемента [5]. Кремниевые ДХ обычно форми-

*Остаточное напряжение — это напряжение на холловских контактах при протекании тока через ДХ при нулевом магнитном поле.

руются по эпитаксиальной технологии, и толщина тела магниточувствительного элемента составляет несколько микрометров [6]. Характерная же толщина рабочего слоя кремния КНИ ПДХ составляет 0,2 мкм. Отсюда следует, что пороговая чувствительность КНИ ПДХ в десятки раз превосходит таковую для кремниевых ДХ.

Рабочий ток ДХ при постоянном напряжении питания определяется омическим сопротивлением тела магниточувствительного элемента. Из-за разницы толщин рабочих областей (~0,2 для КНИ ПДХ и ~5 мкм для кремниевого аналога) сопротивление КНИ ПДХ гораздо больше, чем для кремниевых датчиков Холла. Поэтому при равных напряжениях питания рабочий ток КНИ ПДХ гораздо ниже, чем у кремниевого ДХ. Такое уменьшение тока помимо выигрыша в энергопотреблении обуславливает также уменьшение *токового шума* ПДХ и увеличение отношения сигнал/шум.

Увеличение пороговой чувствительности КНИ ПДХ приводит к *расширению динамического диапазона* по сравнению с традиционными кремниевыми ДХ.

Высокая пороговая магнитная чувствительность и малый потребляемый ток определяют гораздо более высокую *удельную магнитную чувствительность* — крутизну функции преобразования КНИ ПДХ, которая по определению представляет собой отношение величины ЭДС Холла к значениям магнитной индукции и тока через ДХ.

Верхний предел рабочей температуры кремниевых ДХ определяется токами утечки эпитаксиального *p-n*-перехода, отделяющего тело магниточувствительного элемента от подложки. С увеличением температуры ток утечки быстро возрастает и рабочая температура кремниевых датчиков Холла не превышает 120 °С [1]. В КНИ ПДХ тело чувствительного элемента отделено от подложки скрытым диэлектриком, умень-

шающим токи утечки в подложку на несколько порядков. В этом заключается причина значительного увеличения рабочей температуры КНИ ПДХ по сравнению с традиционными кремниевыми ДХ (до 300 °С).

Величина *остаточного напряжения* ПДХ, как будет показано ниже, может быть значительно уменьшена благодаря выбору соответствующего потенциала на управляющих затворах.

Помимо отмеченных достоинств КНИ ПДХ *способен функционировать в условиях экстремальных радиационных полей*. Известно, что ионизирующая радиация генерирует в теле магниточувствительного элемента избыточные носители заряда (электроны и дырки). Число радиационно-индуцированных носителей в рабочем слое кремния КНИ полевого датчика Холла будет, как минимум, во столько же раз меньше, во сколько различаются толщины рабочих областей ДХ и ПДХ. В этом и заключается физическая причина увеличения радиационной стойкости КНИ ПДХ по сравнению с кремниевыми аналогами при импульсных радиационных воздействиях. Ниже будет показано, что КНИ ПДХ обладает также повышенной устойчивостью к стационарному ионизирующему облучению.

Конструкция КНИ ПДХ

КНИ ПДХ изготавливают на основе структур "кремний-на-изоляторе", т. е. структур, в которых рабочий слой кремния отделен от подложки встроенным диэлектрическим слоем. В кремнии *n*-типа был сформирован слой

скрытого оксида толщиной 400 мкм путем имплантации ионов кислорода и последующего отжига. Отсекаемый им слой приборного кремния имел толщину 0,2 мкм. В нем был сформирован холловский крест из Si полосок длиной 80 и шириной 30 мкм. Для получения омических контактов прилегающие к концам полосок участки длиной 10 мкм были легированы фосфором до уровня 10^{20} см⁻³. На поверхность креста была нанесена пленка пиролитического SiO₂ толщиной 100 нм, поверх которой был осажден Al (верхний затвор). Нижним затвором служило основание подложки с осажденной пленкой Al. Схематически конструкция КНИ ПДХ приведена на рис. 1 (см. вторую сторону обложки).

Из рассмотрения рис. 1 становится очевидным факт, что в КНИ ПДХ объединены возможности традиционного датчика Холла и двухзатворного полевого элемента типа металл—диэлектрик—полупроводник—диэлектрик—металл. Отличие КНИ ПДХ от традиционных кремниевых МДП приборов состоит в том, что одна из управляющих систем образована кремниевой подложкой КНИ структуры, на поверхности которой сформирован металлический электрод.

Основные электрические характеристики КНИ ПДХ

Возможные электрические схемы включения электродов (в процессе измерения) рассматриваемых КНИ магниточувствительных элементов приведены на рис. 2. Холловские электроды, соответ-

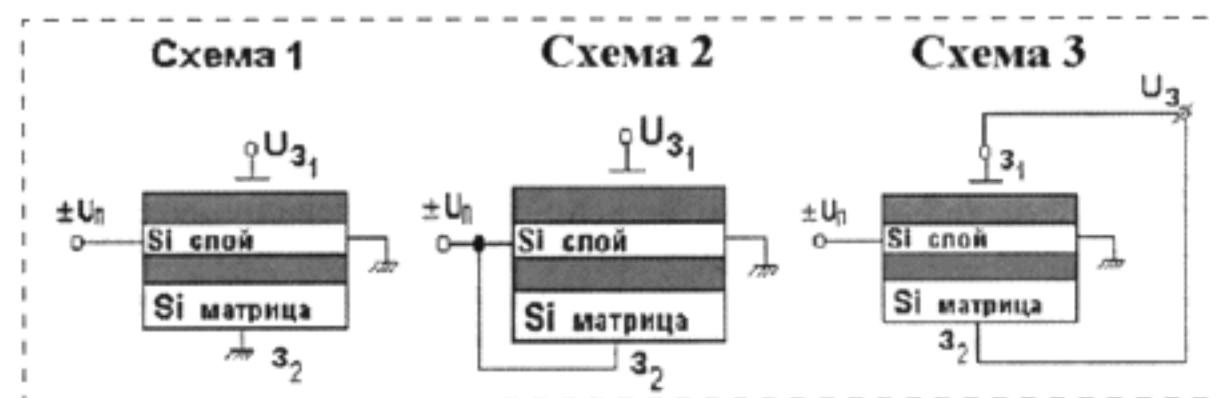


Рис. 2. Схемы измерения электрических характеристик КНИ ПДХ при различном включении электродов

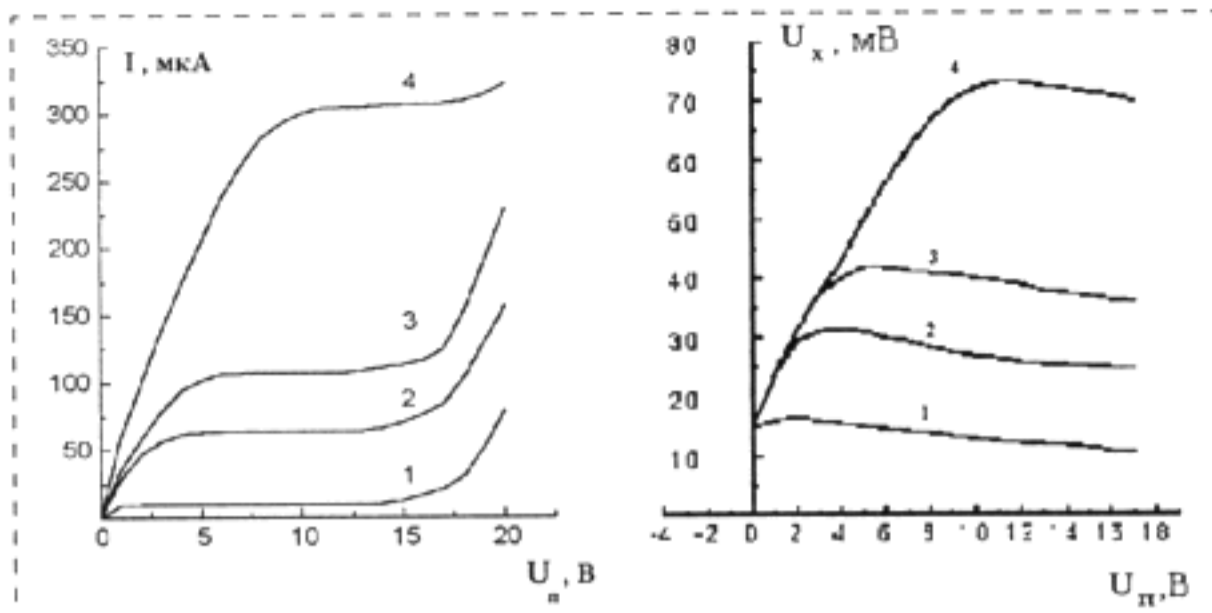


Рис. 3. Типичные вольт-амперные и соответствующие им выходные характеристики КНИ ПДХ при различных напряжениях на затворах: 1 — $U_g = 0$ В; 2 — $U_g = 3,1$ В; 3 — $U_g = 4,6$ В; 4 — 9,4 В

ствующие рис. 1, не показаны. Все напряжения на схемах измерялись относительно общей точки двухполюсного источника питания (обозначена на схеме символом "земля"). Представленные ниже электрические характеристики КНИ ПДХ получены на основе измерений образцов при схеме 3 включения электродов ПДХ (если схема включения электродов ПДХ особым образом не оговаривается).

Типичные ВАХ и выходные характеристики, т. е. ЭДС Холла в зависимости от напряжения питания, при различных значениях напряжения на управляю-

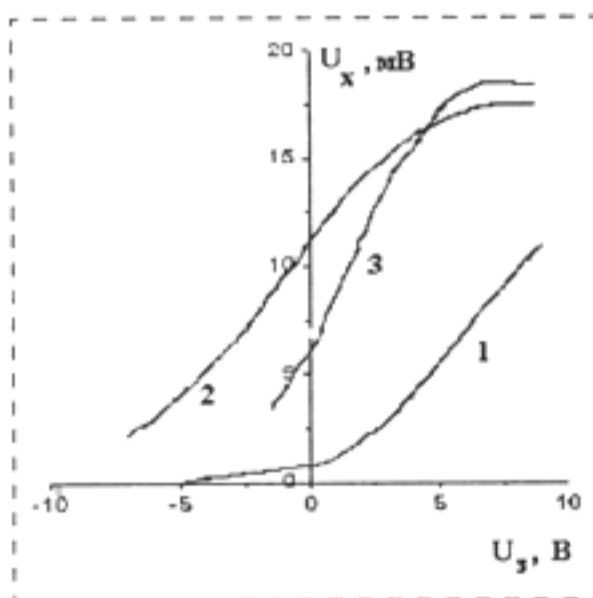


Рис. 4. Зависимость выходных характеристик КНИ ПДХ от напряжения на затворе U_g (напряжение питания 5 В), полученных при первой (кривая 1), второй (кривая 2) и третьей (кривая 3) схемах включения

щих электродах КНИ ПДХ, представлены на рис. 3.

Анализируя представленные зависимости, мы можем сделать вывод о том, что поведение ВАХ КНИ ПДХ является типичным для кремниевых МОП-транзисторов [7]. Также из рис. 3 следует практически важный вывод, что КНИ ПДХ сочетает в себе возможности традиционного МОП-транзистора с функциями датчика Холла.

Типичные зависимости ЭДС Холла от напряжения на затворе КНИ ПДХ (при постоянном напряжении питания) приведены на рис. 4.

Из рис. 3, 4 можно сделать следующий важный вывод, что благодаря наличию вертикальной двухзатворной управляющей системы существует возможность не только пассивной регистрации магнитного поля, но и возможность управления магнитной чувствительностью (подачей различных напряжений на управляющие затворы). Это, как уже было сказано выше, является существенным отличием КНИ ПДХ от традиционных датчиков Холла. Кроме того, очевидно, что выбор схемы включения КНИ ПДХ позволяет использовать рассматриваемый магниточувствительный элемент как нормально открытый или нормально закрытый магнитотранзистор.

Температурные эффекты в КНИ ПДХ

Зависимости ЭДС Холла от температуры приведены на рис. 5. Данная зависимость снята в определенной рабочей точке КНИ ПДХ (напряжение питания 9 В, напряжение на затворах 9 В; см рис. 2), в которой через канал ПДХ протекает рабочий ток, управляемый прилагаемым к затворам напряжением (режим является наиболее значимым с эксплуатационной точки зрения). Из рассмотрения рис. 5 следует вывод, что КНИ ПДХ уверенно функционирует в области таких высоких температур, которые недоступны его кремниевым аналогам.

Динамический диапазон магнитной чувствительности

Рассматриваемый ПДХ обладает более широким диапазоном магнитной чувствительности по сравнению с кремниевыми аналогами. Сказанное иллюстрируется рис. 6 (см. вторую сторону обложки), где представлены характерные области магнитной чувствительности традиционных ДХ и КНИ ПДХ. Видно, что КНИ ПДХ обладает не только большим диапазоном магнитной чувствительности, но и более высокой пороговой магнитной чувствительностью.

При этом выходная характеристика ПДХ линейно зависит от напряженности магнитного поля

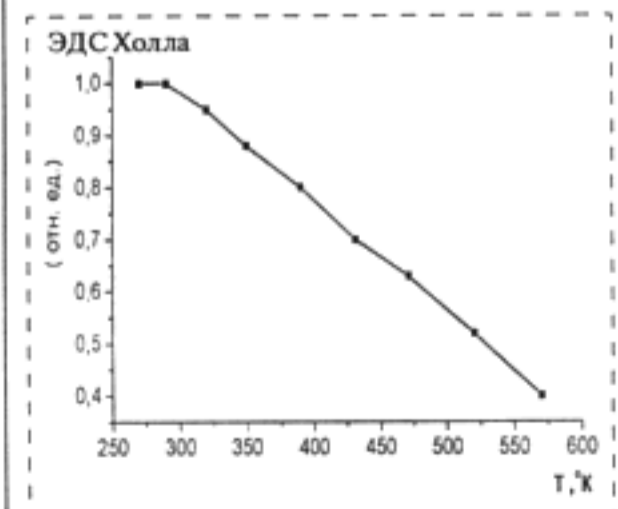


Рис. 5. Зависимость ЭДС Холла от температуры в единицах отношения величины измеряемого параметра к его значению при нормальной температуре

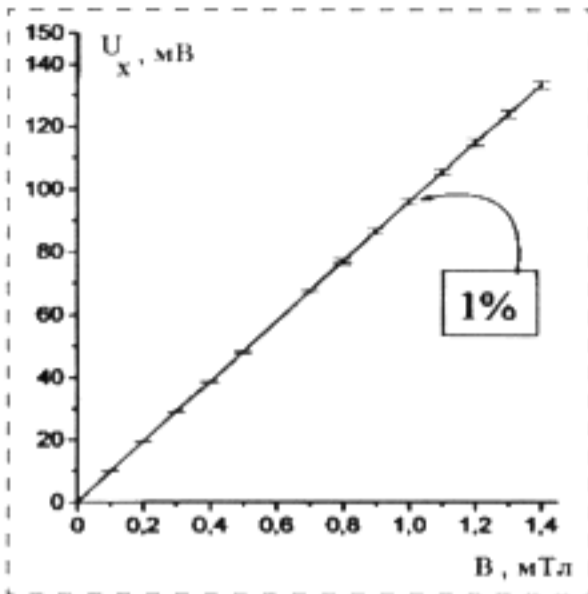


Рис. 7. Зависимость выходной характеристики КНИ ПДХ от напряженности внешнего магнитного поля

во всем его динамическом диапазоне (рис. 7).

Полевое управление параметрами КНИ ПДХ

Выше указывалось, что благодаря наличию вертикальной двухзатворной управляющей системы в КНИ ПДХ существует возможность управления его параметрами. Была также показана возможность управления значением ЭДС Холла с помощью изменения напряжения на затворных электродах при изменении схем включения КНИ ПДХ. Проиллюстрируем возможность управления по затвору на примере других характеристик КНИ ПДХ.

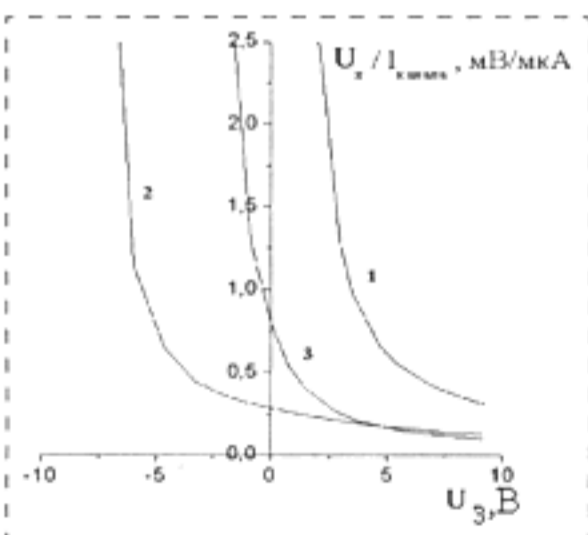


Рис. 8. Зависимости удельной токовой магнитной чувствительности КНИ ПДХ от напряжения на затворе U_3 (напряжение питания 5 В), полученные при первой (кривая 1), второй (кривая 2) и третьей (кривая 3) схемах включения (см. рис. 2)

На рис. 8 приведены зависимости удельной токовой магнитной чувствительности ПДХ от затворного смещения КНИ ПДХ в различных схемах его включения. Мы видим, что на удельную токовую магнитную чувствительность сильное влияние оказывает как величина напряжения, подаваемого на затворы, так и схема включения КНИ ПДХ.

Благодаря наличию вертикальной двухзатворной управляющей системы существует возможность уменьшения коэффициента температурной зависимости тока канала, а следовательно, и выходного сигнала (т. е. ЭДС Холла) в КНИ ПДХ путем подачи различного по значению напряжения на управляющие электроды (рис. 9). Характер температурной зависимости тока канала от прикладываемого напряжения на управляющие затворы принципиально не зависит от схемы включения ПДХ.

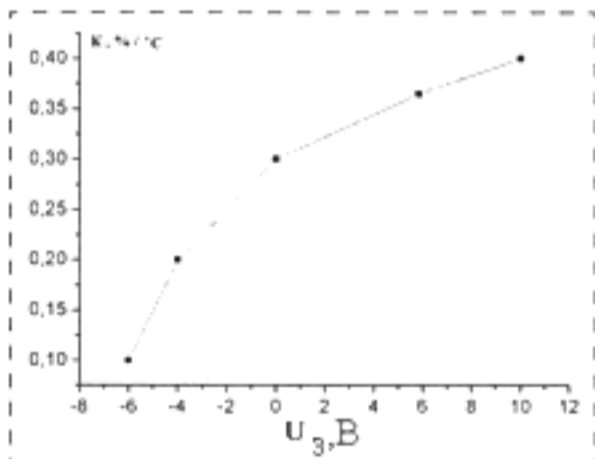


Рис. 9. Коэффициент температурной зависимости тока канала КНИ ПДХ как функция напряжения на управляющих затворах (напряжение питания 5 В)

На рис. 10 представлена типичная зависимость остаточного напряжения U_0 от напряжения на затворах КНИ ПДХ при напряжении на электродах питания 5 В. Поведение остаточного напряжения от приложенного напряжения U_3 на управляющие электроды (затворы) принципиально не зависит от схемы включения ПДХ. На рисунке видно, что в КНИ ПДХ существует возможность управления значением остаточного напряжения в отсутствии магнитного поля.

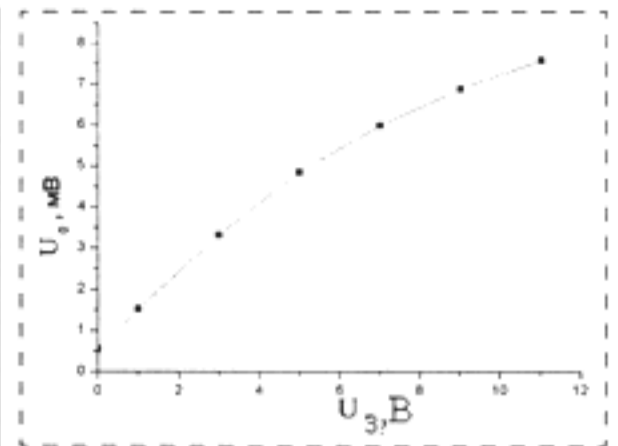


Рис. 10. Зависимость остаточного напряжения на холловских электродах КНИ ПДХ от напряжения на управляющих затворах (см. рис. 2)

Рис. 11 иллюстрирует возможность управления по затвору значением холловской ЭДС при радиационном облучении КНИ ПДХ γ -квантами изотопа Co^{60} , доза облучения составила 500 Гр. Видно, что на радиационные эффекты в КНИ ПДХ существенным образом оказывает влияние, режим в котором поддерживается ПДХ в процессе облучения (затворное смещение и напряжение питания).

Рис. 12 показывает, что выбором определенного напряжения на управляющих затворах КНИ ПДХ в процессе облучения обеспечивается повышенная радиационная устойчивость основной

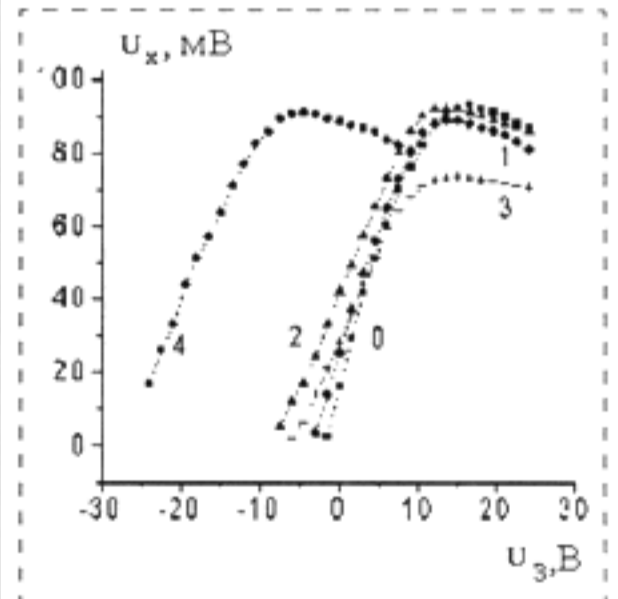


Рис. 11. Выходные характеристики КНИ ПДХ до (кривая 0) и после облучения в различных режимах в процессе облучения: 1 — $U_{пит} = 9$ В; $U_3 = 0$ (тока в канале КНИ ПДХ нет); 2 — $U_{пит} = U_3 = 0$; 3 — $U_{пит} = U_3 = 9$ В (канал КНИ ПДХ открыт, протекает рабочий ток); 4 — $U_{пит} = 0$, $U_3 = 9$ В

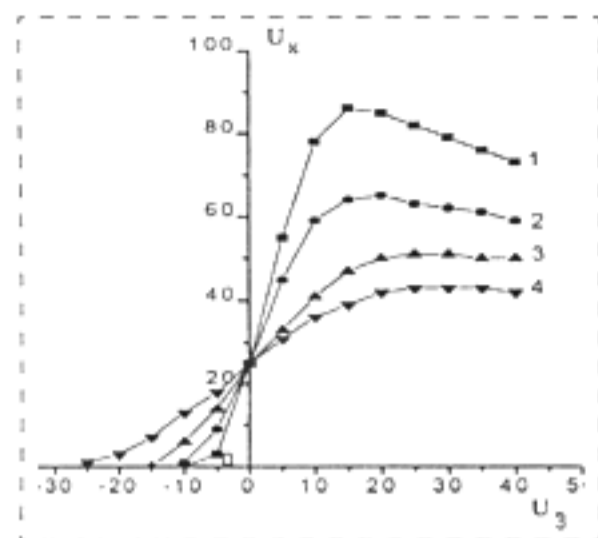


Рис. 12. Выходные характеристики КНИ ПДХ после облучения различными дозами γ -квантов изотопа Co^{60} (в определенной рабочей точке, напряжение питания 9 В, схема 3 на рис. 2):

1 — исходное состояние; 2 — доза облучения 1000 Гр; 3 — 10^5 Гр; 4 — 10^6 Гр ($B = 0,27$ Тл)

функции ДХ (функции преобразования магнитного сигнала в электрический).

Возможности работы ПДХ в модуляционном режиме

Некоторые характеристики ДХ, в частности отношение сигнал/шум, можно улучшить, если использовать модуляционный режим измерений [1]. В традиционных ДХ такой режим можно реализовать, если с помощью электронных ключей промодулировать ток, протекающий через датчик, и включить в измерительную цепь демодулятор. Однако использование электронных ключей вызывает появление трудноустраняемых коммутационных помех. В отличие от этого в КНИ ПДХ режим модуляции можно обеспечить, приложив к затворам переменное напряжение.

Ниже приведена зависимость уровня шумов КНИ ПДХ от частоты модуляции напряжения на верхнем затворе (схема включения 2 на рис. 2), измеренной по способу синхронного детектирования. Именно такая вытекающая из особенностей конструкции ПДХ схемная возможность улучшить отношение сигнал/шум во многом определяет очень высокую пороговую чувствительность

этих приборов. Основными достоинствами работы КНИ ПДХ в режиме модуляции по сравнению с обычными датчиками Холла являются:

- питание датчика постоянным током;
- отсутствие "ключей" и соответственно отсутствие коммутационных помех;
- реализация максимальной пороговой чувствительности за счет повышения отношения сигнал/шум.

Уровень шумов КНИ ПДХ при различных частотах модуляции при ширине полосы пропускания 1 Гц

Частота модуляции, Гц	Уровень шумов, мкВ/Гц ^{1/2}
1	30
10	10
100	3—4
1000	1—1,2
5000	0,25—0,3
10 000	0,13—0,18
100 000	0,01—0,013

Основные параметры КНИ ПДХ

Типичные значения параметров КНИ ПДХ приведены ниже.

Размеры кристалла, мм	От 0,5 × 0,5 до 1,2 × 1,2
Магниточувствительная зона, мм	От 0,03 × 0,03 до 0,5 × 0,5
Режим работы	Постоянный ток, переменный ток, импульсный
Напряжение питания, В	3—12
Рабочий ток, мА	0,1—0,4 (а)
Магнитная чувствительность, В/Тл	0,3—1,2 (а, б)
Удельная магнитная чувствительность, В/А·Тл	1000—10 000 (а, б)
Порог чувствительности, нТл	40—100 (з)
Диапазон частот, кГц	0—200
Диапазон температур, °С	−270—300 (а)
Температурный коэффициент магнитной чувствительности, %/°С	−0,1—−0,4 (а)

а — зависит от потенциала затворов;
б — зависит от размеров чувствительной зоны;
в — зависит от типа корпуса;
з — зависит от электрической схемы формирования выходного сигнала.

Сравнение приведенных данных с известными из литературы параметрами полупроводниковых

ДХ показывает, что КНИ ПДХ не только превосходит кремниевые аналоги по основным параметрам, но и во многих случаях, превосходит ДХ, выполненные на основе других полупроводниковых материалов, например, по рекордно малым значениям рабочего тока (рис. 13, а) и по расширенному диапазону рабочих температур (рис. 13, б, см. вторую сторону обложки).

Заключение

В статье рассмотрен новый тип магниточувствительного элемента — полевой датчик Холла на основе КНИ структуры, который обладает следующими преимуществами:

- КНИ ПДХ удачно сочетает в себе функции как традиционного МОП-транзистора, так и датчика Холла;
- КНИ ПДХ способен функционировать в условиях экстремального воздействия физических полей (температурного и радиационного);
- в КНИ ПДХ благодаря наличию вертикальной, двухзатворной управляющей системы существует возможность модуляции полезного сигнала (ЭДС Холла) по затвору;
- по совокупности параметров КНИ ПДХ превосходит все известные традиционные датчики Холла.

Список литературы

1. Бараночников М. Л. Микромагнетозлектроника. М.: Изд. ДМК. 2001. С. 29—60.
2. Патент РФ № 2130668.
3. Акимов А. Г., Барабаненков М. Ю., Бараночников М. Л. и др. Управляемый резистор с функциями полевого транзистора и датчика Холла // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 5. С. 123—126.
4. Мордкович В. Н., Приходько П. С., Бараночников М. Л. и др. Полевой датчик Холла на основе структур кремний-на-изоляторе // Автоматизация и современные технологии. 1998. № 5. С. 9—11.
5. Хомерики О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем, М.: Мир, 1989.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973.

УДК 621.3.049

В. Д. Вернер, д-р техн. наук, проф.,
И. А. Пурцхванидзе,
 НПК "Технологический центр" МИЭТ

МИКРОСИСТЕМЫ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Обсуждены проблемы, возникающие на восходящей ветви кривой "жизненного цикла" микросистемной техники, как важнейшей стадии процесса микроминиатюризации компонентов и завершенных систем техники XXI века. Наиболее важные из них: нечеткость общепринятой терминологии; отсутствие общепринятых правил стандартизации; трудности организации эффективного взаимодействия между изготовителями и потребителями МСТ; трудности выбора технологии для массового производства и т. д.

Обсуждены методы решения этих проблем, принятые в зарубежных странах. Отмечается отсутствие соответствующих мер поддержки развития МСТ в России.

Широко используемый за рубежом термин "информационное общество" практически означает переход в XXI век к новым принципам организации деятельности человека во всех сферах. Решение конкретной технической задачи обычно достигается созданием систем необходимого уровня, которые должны иметь информационное обеспечение достаточного объема и качества, эффективное управление и результативное исполнение задач системы. При этом главным, конечно, является последнее. Не нарушая целостности системы, ее информационная и управляющая части должны иметь минимально необходимые размеры. В технических системах это достигается использованием микроэлектроники и микросистемной техники. Применение изделий микроэлектроники и микросистемной техники продиктовано не только их малыми размерами, но и новыми качествами, которые привносят интегральные схемы (ИС) и микросистемы (МС) в техническую систему. Внедрение новых ИС в процессоры и запоминающие устройства изделий вычислительной техники помимо уменьшения их объемов (поэтому стало возможным появление персонального компьютера) привело к увеличению их функциональных возможностей. Постоянное снижение цены единичной функции (например, хранения одного бита информации), ИС сделало доступной вычислительную технику (ВТ) для широкого круга потребителей. Аналогично применение головок считывания жестких дисков и головок струйных принтеров, изготовленных по технологии микросистем, позволило увеличить надежность и понизить стоимость периферийных устройств ВТ.

◆ Микросистемная технология (МСТ-MST) относится к числу "критических" технологий, т. е. технологий, направленных на обеспечение военной и экономической независимости страны и конкурентоспособности продукции на мировом рынке. МСТ относится и к числу технологий двойного назначения, включает элементы ряда других базовых технологий двойного назначения (технологий микроэлектроники, опто- и акустоэлектроники, лазерных технологий, прецизионных и механотронных технологий, генодиагностики и т. д.) [1].

МСТ насчитывает около 20 видов технологий изготовления и сборки деталей и элементов с линейным размером от нескольких микрометров до нескольких сантиметров в микросистему на одной плате или одном кристалле.

МСТ пока не имеет канонизированной терминологии, стандартизация МС только начинает формироваться. В связи с этим обстоятельством необходимо обсудить классификацию изделий МСТ.

Существует несколько определений микросистемы (МС). В европейской периодике достаточно долго было принято определять МС [2] так: "Микросистема — это интеллектуальная миниатюризованная система, обладающая сенсорными, процессорными и/или актюаторными функциями. В ней обычно используется комбинация двух или больше устройств, действующих на основе использования электрических, механических, оптических, химических, биологических, магнитных или других свойств и интегрированных на одном чипе или мультичиповой плате".

В США чаще используется термин "микроэлектромеханические системы" (МЭМС): "МЭМС — это интегрированные микроустройства или системы, комбинирующие электрические и механические компоненты, изготовленные по технологиям, совместимым с технологией ИС и имеющие размеры от микрометров до миллиметров. Соединение в таких системах компьютерной обработки с чувствительными и актюаторными компонентами позволяют нам ощущать и контролировать окружающий мир".

В Японии чаще пользуются терминами "мехатроника" и "микромашин": "Микромашины состоят из функциональных элементов размером в несколько миллиметров и способных образовать комплексное микроскопическое устройство".

Каждое из этих определений подчеркивает один из существенных признаков: размер, комплексность, интерфейс с окружающей средой и т. д. Разные наименования одних и тех же объектов вынудили западных экспертов объединить аббревиатуры МЭМС, МСТ, ММ в одну — М [2]. На наш взгляд, это удачное предложение, отражающее к тому же потенциальную трехмерность микросистемных конструкций, вряд ли приживется без принудительных мер стандартизации. Более того, процесс

образования новых терминов продолжается: *микроэлектрохимические системы* (МЭХМС), *наноэлектромеханические системы* (НЭМС), *микронанотехнологии* (МНТ) и т. д.

Благодаря деятельности NEXUS в научный обиход вошли два термина: *"микротехнология"* и *"микроструктурирование"*. Оба обозначают воздействие на материал в целях получения микрокомпонентов размером несколько микрометров. На этой основе дается следующее определение МС: "МС — это комбинация нескольких микрокомпонентов, оптимизированная как целостная система для выполнения одной или нескольких функций и содержащая в большинстве случаев микроэлектронное устройство" [2]. Это определение коррелирует с определением МСТ в работе [1], которое в целом, на наш взгляд, имеет слишком широкие рамки. При попытках сопоставить разноязычную терминологию часто возникают трудности. Если термины МС и МЭМС практически однозначны в русском и английском вариантах, то русский термин "микросистемная техника", имеющий перевод "microsystems engineering — MSE", означает конечный продукт, а не процесс создания, заложенный в термине "engineering".

В зависимости от принятого определения в число МС включают те или иные технические устройства. При этом неизбежно некоторое перекрытие областей "микросистемных" и "немикросистемных" устройств. Поэтому более четкими являются классификации по определенным признакам МС, например, как это сделано в табл. 3 работы [1] по признаку *"конструкция—применение"*.

◆ В NEXUS выделяют *области применения МС* в соответствии с клубами "пользователь-изготовитель", т. е. МС для вычислительной техники, медицинской техники, аэрокосмической техники, автомобильной промышленности, телекоммуникаций, домашней техники и т. д.

Возможно разделение МСТ по *направлениям работ* в этой области техники:

- Информационные технологии, конструирование, проектирование и моделирование МС.
- Материаловедческие и технологические основы МСТ (материалы микроэлектроники и других областей техники, технология микроэлектроники и новые специфические МСТ).
- Элементная база МС (сенсоры и актюаторы, микромеханизмы, микроинструмент и микродвигатели, источники питания и системы обработки, накопления и передачи информации, микрооптика и т. д.).
- Типы МС (МЭМС, МОЭМС, микробиотехнические, микроаналитические, микроробототехнические и т. д.).
- Применение МС (вычислительная техника и информатика, медицина и фармакология,

транспорт и навигация, индивидуальная и бытовая техника).

Можно разделять МС на крупные группы, например, *"автономные"* и *"встроенные"* МС или по функциональному признаку *"МС для приборов"*, *"МС для механизмов"* и т. д. То или иное определение МС и разделение их на группы выбирается из удобства анализа, но остается условным в отсутствии стандартизации. Например, выбор различных определений МС при анализе рынка приводит к различным оценкам его объема (см. рис. 1 в [3]).

По этой причине наибольшую информацию дают сведения о конкретной группе изделий, например, о датчиках давления и т. д. Отсутствие общепринятой стандартизации в области МС и МСТ, включая их определения, — одна из существенных проблем развития этого научно-технического направления. На это обстоятельство указано, в частности, в работе [4].

◆ Как известно, МС содержит целиком или частично три основных компонента:

- приемник воздействия (информации) — чувствительный элемент, преобразующий внешнее воздействие в электрический или оптический сигнал;
- устройство обработки, хранения и передачи сигнала в аналоговой или цифровой форме;
- устройство, преобразующее сигнал в воздействие на внешние объекты микроактюаторы (преобразователи).

Примером МС с использованием всех трех компонентов может быть микроробот и микролаборатория на "чипе" (кристалле, подложке), примером МС с использованием одного-двух компонентов может служить микродатчик, микроаксельрометр, микрореле, микро мотор, микродвигатель и т. д.

Как известно, в микроэлектронике сложность микросхемы характеризуется степенью интеграции. В работе [4] для оценки сложности МЭМС предложен коэффициент качества, который равен произведению числа транзисторов T и числа механических компонентов M , однако в отсутствие стандартизации нельзя надеяться на появление классификации МС по признаку значения произведения $T \cdot M$.

В различных публикациях и презентациях неоднократно подчеркивались преимущества МС. Малые размеры компонентов МС обеспечивают первое преимущество МС — *малые весогабаритные показатели*. Подобно изделиям микроэлектроники, детали и компоненты МС изготавливаются по *групповой технологии*, что обеспечивает *высокую воспроизводимость* параметров и *низкую стоимость* при массовом производстве. Использование бездефектных монокристаллических и других монокристаллических материалов обеспечивает *высокую надежность* МС и возможность использования МС в *экстремальных условиях* эксплуатации. Широкий спектр

конструктивных элементов МС и применяемых при их изготовлении материалов обеспечивают широкую номенклатуру МС. Указанные преимущества позволяют применять МС в объектах гражданского и военного назначения. Однако последовательная реализация всех перечисленных преимуществ в конкретной МС часто вызывает значительные трудности и проблемы.

Более детально остановимся на перспективах развития разных типов МС для решения актуальных проблем XXI века. Одна из тенденций — дальнейшая микроминиатюризация отдельных или всех трех основных компонентов МС. Например, в американской "Национальной НаноИнициативе" (NNI) ставится общая задача уменьшения размеров МЭМС в 10 раз [5]. Это одна из проблем, возникающая на данном этапе развития МСТ. В 1999 г. один из авторов в статье [6] утверждал, что область технологий с критическими размерами 3—1 мкм достаточна для успешного освоения МСТ на базе трансферта технологии микроэлектроники в МСТ. В связи с этим обстоятельством была сформулирована идея такого трансферта российской полупроводниковой технологии на незагруженных основной продукцией производственных линиях в область МСТ. Правомочность такого решения нашла свое подтверждение в практике крупнейших западных полупроводниковых компаний, которые активно включились в МСТ на базе "устаревших" микроэлектронных линий (Intel, Motorola, IBM и т. д.). Однако в настоящее время в условиях России это означает необходимость параллельного освоения области литографических размеров менее 0,5 мкм как для микроэлектроники, так и для МС коммерческого и специального назначения.

◆ За рубежом перспектива широкого применения различных МС способствовала появлению ряда национальных и корпоративных программ по МС, финансируемых, в том числе, и из военных бюджетов. Интенсивный рост числа фирм, выпускающих МС или применяющих их в своих изделиях, привел к энергичному росту объема мирового рынка МС (с темпом 18—20 % в год), который по разным оценкам достигает к 2002 г. 35—40 млрд долл. США при общем числе изделий около 7 млрд шт. О динамичности рынка МС, как части рынка изделий высоких технологий, свидетельствует также снижение цены типовых изделий МСТ в среднем в 2,6 раза за 5 лет при росте числа изделий 4,3 раза [7]. В анонсе нового анализа рынка МС NEXUS предсказывает дальнейший рост рынка во всех его секторах от 30 млрд долл. в 2000 г. до 68 млрд долл. в 2005 г. [8, рис. 2]. Показатели динамики основных сложившихся секторов рынка МС (периферийные устройства вычислительной техники, МС для медицины, транспорта, телекоммуникаций и т. д.) не уступают, а в ряде случаев и превосходят показатели рынка изделий микро-

электроники, вычислительной техники и телекоммуникаций.

◆ Появление МСТ исторически связано с технологией микроэлектроники. Наиболее распространенной формой производственной линии МСТ является соединение типовой технологической линии микроэлектроники (например, КМОП-технологии, т. е. планарной технологии) с дополнительным специфическим модулем МСТ для создания трехмерных структур. Перспективность кремниевой технологии связывают именно с возможностью размещения на одном кристалле функциональной части МС и компонентов электронной обработки сигнала, т. е. с созданием систем на кристалле SiCS. Температурная несовместимость некоторых технологических процессов, возникающая при этом, заставляет разработчиков МС искать новые материалы для подложек (Si—Ge, кремний-на-изоляторе и др.), однако преодолеть все трудности оказалось не простой задачей. Поэтому в большинстве МС используется гибридная технология (многокристалльная или "мультичиповая" сборка). В связи с этим на западе значительное внимание в производстве МС уделяют вопросам конструкций сборок и корпусирования, а также проблемам измерений, испытаний и надежности МС. К сожалению, в России этим вопросам пока уделяют недостаточное внимание.

◆ В отличие от технологии современной микроэлектроники, в области МСТ стоимость оборудования пока ниже. Это позволяет создать технологическую линию МСТ стоимостью на 2—3 порядка ниже стоимости субмикронного производства ИС (1—3 млрд долл.). Она доступна для малых фирм и стран, которые никогда не были в числе лидеров микроэлектроники (Швейцария, Дания, Норвегия и т. д.) *Доступность МСТ* — это еще одно ее преимущество. Конечно, общая тенденция снижения топологических норм касается и МСТ. Здесь также следует ожидать в дальнейшем переход и в нанометровый диапазон топологических норм. Уже известны попытки создавать датчики по нанотехнологии, датчики на основе фуллеренов и отдельных молекул.

◆ Микросистемная техника — очень динамичная отрасль. Несмотря на свою "молодость", она имеет свою историю изменения роли ее различных направлений и секторов рынка. Общие изменения в мире электроники, связанные с "интеллектуализацией" электронных систем (intellectual property), развитием встраиваемых систем (embedded system), существенным ростом удельной доли производства цифровых сигнальных процессоров (по сравнению с процессорами для персонального компьютера) и систем, работающих в режиме реального времени (RTOS), и т. д. открыли новые возможности для МС в системах коммуникации, транспорта и управления производством. С использованием современ-

ных САПР можно без труда спроектировать систему на чипе, включающую интеллектуальное ядро, сенсоры, актюаторы и при необходимости коммуникационный блок. О технологических трудностях, возникающих при этом, говорилось выше.

Примерами областей применения МС могут быть глобальная система позиционирования (GPS — Global Positioning System), Интернет-телефон (VIOP — Voice over Internet Protocol), новые аудиосистемы, автомобильные системы управления и контроля и т. п.

◆ В связи с этим несколько меняется взгляд на перспективы развития сложившихся секторов рынка МСТ [8]. Все большее значение приобретает МСТ для телекоммуникаций. Прогресс здесь, прежде всего, связан с микрооптоэлектромеханическими системами (МОЭМС). Перестраиваемые системы линз, зеркал, источников и приемников света в сочетании с традиционными устройствами оптоволоконной оптики, но изготовленные методами микротехнологий, позволяют сконструировать и изготовить новые конкурентоспособные устройства. Примером может служить проекционный телевизионный экран с тысячами микрозеркал. Весьма активно стала развиваться область микрокомпонентов для радиочастотных блоков: микроключи, микрореле, микроконденсаторы и микроиндуктивности, фильтры и резонаторы. Быстрыми темпами развивается сектор персональных информационных устройств (information appliances). Развитие беспроводных коммуникационных систем в промышленности и быту дает возможность подключиться к информационным и компьютерным сетям в любом месте и в любое время. Появился новый термин "всепроницающий компьютеринг" (ubiquitous computing), который пытается передать появление нового взаимодействия между "цифровым" и реальным миром.

Общая тенденция микроминиатюризации: "дешевле, меньше и с меньшим потреблением энергии" — служит мощным стимулом развития микроэлектроники и микросистем. Только они способны обеспечить главное условие требуемого пути развития — автономность устройств на базе встроенных интеллектуальных систем [9]. В результате человек начинает жить во всепроницающей интеллектуальной среде, находясь на работе, в транспорте или дома. Даже одежда человека становится частью индивидуальной информационной системы (см. рис. 3, в [10]). Конечно, такая одежда первоначально будет использоваться на производстве, медицине или в военном деле, но и "высокая мода" может стать участником этого процесса. Главное, что эти устройства постепенно станут стандартными комплектующими, без которых товар перестанет быть конкурентоспособным.

Правильный выбор производимого МС продукта, технологии и организации его производства — одна из животрепещущих проблем для МСТ. Это заставляет производителей искать наиболее эф-

фективные методы организации и управления производством. Например, фирма Standard MEMS (США) [11] считает, что за счет вертикальной интеграции их производства цикл от разработки до полномасштабного производства сокращается от 3—6 лет по традиционному циклу до 8—14 месяцев. В целях ускорения выхода продукции на рынок активно объединяются традиционные производители МСТ с исследовательскими группами, прежде всего из университетов. Примером может служить объединение норвежской производственной фирмы SensoNor и разрабатывающей фирмы ТМП при университете г. Энсхеде (Нидерланды). Аналогичный пример — объединение фирмы ANSYS — мирового лидера в области computer aided engineering (CAE) и французской фирмы MEMSCAP — лидера в области проектирования МЭМС.

◆ Несколько слов о САПР для МСТ. Существует большое число пакетов САПР. Выбор может быть сделан только на основе анализа соответствия САПР разрабатываемому продукту МСТ. Специфичность конструкции (наименьшие размеры, материалы, необходимость учета трехмерности и т. д.) накладывают свои отпечатки на параметры модели. Например, в микрофлюидных устройствах важное значение приобретают капиллярные и адгезионные явления. Эффективность разработки МС изделия зависит от стадии моделирования и САПР в гораздо большей мере, чем при разработке макроаналога этого изделия.

◆ При освоении новой научно-технической области основные трудности возникают на стадии перехода к производству, поскольку на стадии освоения производственных технологий, как и в любом другом производстве, в МСТ существует набор основных технологий (уже говорилось, что их около 20), которые позволяют изготовить все необходимые компоненты, детали и выполнить их сборку. Как мы уже отмечали, первыми технологиями производства элементов МС были технологии микроэлектроники, а первым материалом — кремний. Кремний по-прежнему широко используется в МСТ, так как позволяет изготовить не только деталь МС, но и разместить схемы обработки сигнала и управления на одном материале. Однако спектр материалов для МС гораздо шире: металлы, сплавы, пластмассы и другие полимеры, стекла и т. д. Из этих материалов нужно изготавливать не только поверхностные конструкции, но и объемные. При этом индивидуальная обработка допустима только для прототипов изделий. Массовое производство дешевых изделий требует применение групповой технологии. Одной из первых технологий подобного типа была разработанная в Германии ЛИГА-технология. В этой технологии с помощью синхронного излучения в толстом фоторезисте формируются полости, на сторонах которых электрохимически осаждается металл. Таким образом, создаются или готовые изделия из металла, или

пресс-формы для их дальнейшего тиражирования. Технология имеет два недостатка: требует применения синхронного излучения и дает возможность получить изделия только с прямолинейной образующей формы (цилиндры, прямые параллелепипеды и т. д.). Несмотря на это ЛИГА-технология занимает второе место по частоте применения. Объемные детали более сложной формы (например, витые поверхности, пружины и т. д.) получают методами стереообработки, (стереолитография, стереосаждение и т. д.), в которых осуществляется программированное осаждение (удаление) слоев — сечений изделия. Эти методы негрупповые и поэтому пригодны только для создания прототипов. Появились сообщения о технологиях (DEM-технология), подобных ЛИГА-технологии, но которые базируются на кремниевой технологии и не требуют применения синхротронного излучения и позволяют получать детали из металла или пластмассы. Это дает возможность рассматривать кремниевую технологию как базовую.

Однако, несмотря на все успехи кремниевой технологии в микроэлектронике, переход к МСТ не очень прост. Даже в случае простых МС часто требуется вводить новые процессы, связанные с формообразованием объемных структур. К их числу относятся процессы травления с большими аспектными отношениями, двухсторонняя фотолитография, корпусирование. Еще более сложные проблемы возникают при изготовлении деталей и элементов конструкции МЭМС и МОЭМС, которые помимо трехмерности часто должны иметь сложную форму.

◆ Поиск оптимальных решений приводит к синергетическому слиянию разных типов технологий МСТ. Например, DEM-технология является сочетанием методов объемного травления кремния с процессами гальванического осаждения, впервые использованными в ЛИГА-процессе. Эти же процессы в волоконной технологии позволяют получить трубчатые детали сложной формы, недоступные самой ЛИГА-технологии. Стереолитография, которая методом послойной полимеризации позволила впервые получить объемные детали сложной формы, дала стимул для развития методов послойного осаждения металлов из газовой фазы или его наплавления из порошка.

В настоящее время практически решены вопросы создания экспериментальных прототипов всех деталей, необходимых для МЭМС любой сложности, однако, как уже отмечалось, эффективным производством МСТ становится только при групповой обработке, способной сделать серийное производство рентабельным. Косвенным доказательством эффективности технологического процесса может служить появление на рынке специализированного для МСТ оборудования. Первоначально МСТ оборудование начали производить для процессов литографии и сухого травления. В настоя-

щее время уже несколько фирм, например австрийская фирма EVG, поставляют комплексное оборудование для кремниевой МСТ.

Одна из возможных форм повышения эффективности производства МСТ вновь подсказала микроэлектроника. Суть состоит в территориальном разделении технологий. Каждый из этапов (или хотя бы их часть) может быть высокоэффективным производством. Известно, что сейчас в мире существует большое число фирм, производящих микроэлектронную продукцию, не имея собственного технологического оборудования (fabrics). Это стало возможным после появления на рынке доступных и универсальных САПР, с помощью которых можно спроектировать оригинальную собственную интегральную схему, блок или аппаратуру, а их производство осуществлять на технологических линиях фирм, специализирующихся на производстве массовой продукции (например, схем памяти или микропроцессора).

В технологии МСТ был сделан следующий шаг разделения технологий. Спроектированная МС частично изготавливается на серийном микроэлектронном предприятии (поверхностная обработка), а частично — на специализированном производстве (объемная обработка). Подобное производство может быть организовано в лаборатории или на малой фирме, так как технологическое оборудование может быть недорогим, а его размещение не требует чистых комнат микроэлектронного уровня. Дальнейшее повышение эффективности производства МС может быть достигнуто за счет увеличения серийности специализированного производства, например, если один технологический процесс используется при обработке большого числа однотипных изделий. Идея такого глубокого разделения производства МС на этапы, каждый из которых может производиться на территориально удаленных друг от друга производственных участках, реализован в США путем создания "виртуального производства" (Virtual fab) фирмой MEMS Exchange. Разработчик с помощью этой фирмы может спроектировать и изготовить по необходимому технологическому маршруту отдельные компоненты или законченную МС. При этом сама фирма является только менеджером-диспетчером, обеспечивая прохождение заказа на технологических линиях различных производственных фирм [12].

Суммируя изложенное выше, можно отметить следующее:

- МСТ уже сформировалась как одно из ведущих направлений техники XXI века;
- объем уже производимой продукции позволяет говорить о глобальном рынке МСТ с высокими темпами роста;
- трудности расширения номенклатуры МСТ только частично связаны с технологическими проблемами производства, так как они могут быть преодолены тем или иным путем;

- более существенной является проблема выбора для производства определенного типа МС и МСТ, поскольку сфера взаимодействия изготовителя и потребителя в этой области техники только складывается.

◆ В целях устранения разрыва между потенциальными потребителями и изготовителями микросистем в западных странах были разработаны и действуют национальные и межгосударственные программы по МС, различного рода союзы, клубы и ассоциации. Ключевым моментом стало создание информационных сетей по МСТ. В Европе роль сетевой структуры, способствующей объединению специалистов по МСТ, играют НЕКСУС (NEXUS) и МИНАНЕТ (MINANET) — неправительственные организации, работающие по контракту с Европейским Союзом.

В России ситуация гораздо хуже. Было создано несколько проектов национальных программ по МСТ, действует (и к тому же в урезанном виде) только одна. Отсутствует национальная информационная структура по МСТ. И хотя российский научный потенциал, как всегда, достаточно велик, его влияние на целенаправленное продвижение МСТ в экономику страны пока мало.

Список литературы

1. Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П. Состояние и перспективы развития микромеханических систем за рубежом / Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 41—46.
2. Климов Д. М., Лучинин В. В., Васильев А. А., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке / Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
3. A NEXUS Task Force Report 1988. P. 23—24.
4. Grace R. H., Salomon P. Microsystems (MEMS), Micromachines on the Move from Technology to Business / MST news. 2001. N 5/01. P. 4—8.
5. Мальцев П. П. Микросистемная техника — расширение возможностей микроэлектроники / Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 1. С. 32—34.
6. National Nanotechnology Initiative. July 2000. Washington D. C.
7. Вернер В. Д., Чаплыгин Ю. А., Сауров А. Н., Шелепин Н. А. Микросистемы и биочипы — трансферт технологии микроэлектроники / Электронные компоненты. 2000. № 1. С. 3—5.
8. A NEXUS Task Report 1998. P. 7—17.
9. Market Analysis for Microsystems 2000—2005: A Report from the NEXUS Task Force // MST news. 2002. N 2/02. P. 43—44.
10. Riemenschneider R., Stresse H. Microsystems Approaching Ubiquitous Computing // MST news. 2000/02. P. 4—8.
11. Hartmann W. D., Ullsperger A. High-tech Fashion for Ambient Intelligence and Ubiquitous Computing // MST news. 2002. N 2. P. 15—16.
12. Song X., Reynaerts D., Meersen W., Van Brussel H. Micro-EDM for silicon microstructure fabrication // Proceedings of SPIE. 1999. Vol. 3680. P. 792—799.
13. MEMS Exchange <http://www.mems-exchange.org>.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.049.77:001.891.57

Е. С. Горнев, д-р техн. наук,
Н. А. Зайцев, д-р техн. наук, М. Ф. Равилов,
И. М. Романов, канд. техн. наук,
НИИМЭ и "Микрон"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОМЕХАНИКИ.

Часть I

Описаны пакеты программ различных фирм для моделирования микромеханических устройств. Приведены примеры моделирования некоторых элементов: торсионного зеркала, деформируемой плоскости, гребенки, чувствительного к нажатию емкостного сенсора.

По сложности описания поведения микромеханические устройства не уступают полупроводниковым приборам, а нередко являются более сложными и менее изученными. Поэтому без использования компьютерного моделирования сложно и

дорого разрабатывать и изготавливать качественные микромеханические устройства.

Проблеме моделирования уделяется достаточно большое внимание как разработчиками и изготовителями микромеханических устройств, так и разработчиками программных продуктов.

Есть несколько способов описания поведения микромеханических устройств: от аналитического описания с помощью формул до трехмерного моделирования конечных элементов. Иногда для решения задачи оптимизации конструкции и технологии изготовления микромеханических устройств используется сочетание нескольких способов описания. Наибольший интерес для разработчиков микромеханических устройств представляют пакеты программ, позволяющие решать широкий круг задач.

1. ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Первый шаг при моделировании микромеханических устройств — определить какие физические эффекты важны и какие из этих эффектов являются взаимосвязанными. Это обычно определяет выбор программы моделирования, которая будет использована. Затем формируется геометрия прибора либо при помощи редактора геометрии, либо по

- более существенной является проблема выбора для производства определенного типа МС и МСТ, поскольку сфера взаимодействия изготовителя и потребителя в этой области техники только складывается.

◆ В целях устранения разрыва между потенциальными потребителями и изготовителями микросистем в западных странах были разработаны и действуют национальные и межгосударственные программы по МС, различного рода союзы, клубы и ассоциации. Ключевым моментом стало создание информационных сетей по МСТ. В Европе роль сетевой структуры, способствующей объединению специалистов по МСТ, играют НЕКСУС (NEXUS) и МИНАНЕТ (MINANET) — неправительственные организации, работающие по контракту с Европейским Союзом.

В России ситуация гораздо хуже. Было создано несколько проектов национальных программ по МСТ, действует (и к тому же в урезанном виде) только одна. Отсутствует национальная информационная структура по МСТ. И хотя российский научный потенциал, как всегда, достаточно велик, его влияние на целенаправленное продвижение МСТ в экономику страны пока мало.

Список литературы

1. Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П. Состояние и перспективы развития микромеханических систем за рубежом / Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 41—46.
2. Климов Д. М., Лучинин В. В., Васильев А. А., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке / Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
3. A NEXUS Task Force Report 1988. P. 23—24.
4. Grace R. H., Salomon P. Microsystems (MEMS), Micromachines on the Move from Technology to Business / MST news. 2001. N 5/01. P. 4—8.
5. Мальцев П. П. Микросистемная техника — расширение возможностей микроэлектроники / Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 1. С. 32—34.
6. National Nanotechnology Initiative. July 2000. Washington D. C.
7. Вернер В. Д., Чаплыгин Ю. А., Сауров А. Н., Шелепин Н. А. Микросистемы и биочипы — трансферт технологии микроэлектроники / Электронные компоненты. 2000. № 1. С. 3—5.
8. A NEXUS Task Report 1998. P. 7—17.
9. Market Analysis for Microsystems 2000—2005: A Report from the NEXUS Task Force // MST news. 2002. N 2/02. P. 43—44.
10. Riemenschneider R., Stresse H. Microsystems Approaching Ubiquitous Computing // MST news. 2000/02. P. 4—8.
11. Hartmann W. D., Ullsperger A. High-tech Fashion for Ambient Intelligence and Ubiquitous Computing // MST news. 2002. N 2. P. 15—16.
12. Song X., Reynaerts D., Meersen W., Van Brussel H. Micro-EDM for silicon microstructure fabrication // Proceedings of SPIE. 1999. Vol. 3680. P. 792—799.
13. MEMS Exchange <http://www.mems-exchange.org>.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.049.77:001.891.57

Е. С. Горнев, д-р техн. наук,
Н. А. Зайцев, д-р техн. наук, М. Ф. Равилов,
И. М. Романов, канд. техн. наук,
НИИМЭ и "Микрон"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОМЕХАНИКИ.

Часть I

Описаны пакеты программ различных фирм для моделирования микромеханических устройств. Приведены примеры моделирования некоторых элементов: торсионного зеркала, деформируемой плоскости, гребенки, чувствительного к нажатию емкостного сенсора.

По сложности описания поведения микромеханические устройства не уступают полупроводниковым приборам, а нередко являются более сложными и менее изученными. Поэтому без использования компьютерного моделирования сложно и

дорого разрабатывать и изготавливать качественные микромеханические устройства.

Проблеме моделирования уделяется достаточно большое внимание как разработчиками и изготовителями микромеханических устройств, так и разработчиками программных продуктов.

Есть несколько способов описания поведения микромеханических устройств: от аналитического описания с помощью формул до трехмерного моделирования конечных элементов. Иногда для решения задачи оптимизации конструкции и технологии изготовления микромеханических устройств используется сочетание нескольких способов описания. Наибольший интерес для разработчиков микромеханических устройств представляют пакеты программ, позволяющие решать широкий круг задач.

1. ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Первый шаг при моделировании микромеханических устройств — определить какие физические эффекты важны и какие из этих эффектов являются взаимосвязанными. Это обычно определяет выбор программы моделирования, которая будет использована. Затем формируется геометрия прибора либо при помощи редактора геометрии, либо по

результатам моделирования технологии изготовления. После этого включаются входные параметры (граничные условия, свойства материала и др.). Свойства материалов должны быть получены экспериментально из тестовых структур. Затем может быть выполнено моделирование с использованием таких программ, как Abaqus [1], MEMCAD [2], IntelliCAD [3], Solidis [4], Ansys [5]. Для решения системы дифференциальных уравнений эти программы используют метод конечных элементов, граничных элементов, конечной разности или конечных объемов. Затем по результатам моделирования формируются упрощенные модели, которые применяются для разработки систем. Моделирование на системном уровне выполняется с помощью программы моделирования электрических схем SPICE [6], или более общих программ Simulink [7] и Saber [8], которые используют стандартный язык описания входного файла для моделирования VHDL-AMS.

1.1. Пакет программ MEMCAD фирмы *Microcosm Technologies*

В [2] приведено описание пакета программ MEMCAD, разработанного фирмой *Microcosm Technologies*. Этот пакет программ предназначен для разработки и моделирования микроэлектромеханических систем (МЭМС) от начала до конца. Он обеспечивает разработчиков МЭМС всем — от первичной концепции через полный сопряженный анализ до разработки параметров корпусирования и экстракции моделей высокого уровня для моделирования системы. Этот пакет содержит ряд программ различного назначения: AutoSpring, BubbleSim, Catapult, Designer, DropSim, MemDemping, MemETherm, MemHenry, MemPackage, MemPZR, MemSys, MemTherm, ReactSim.

2D-редактор топологии Catapult предназначен для создания топологии элементов. Эта программа имеет следующие особенности: возможность рисования настоящих кривых (а не ломаных линий) для точного воспроизведения конструкции, рисование топологии и ячеек под любым углом; преобразование ломаных элементов GDSII в сглаженные кривые для более точного анализа элементов МЭМС; наличие библиотеки специализированных элементов МЭМС для более быстрой прорисовки топологии и повторного использования; прямое преобразование 2D топологических файлов в CIF, GDSII и DXF форматы; импорт и экспорт IGES файлов для 3D моделирования и построения сетки.

Многим конструкторам микроэлектромеханических устройств требуется экстракция констант упругости из модели. Это особенно важно для приборов, которые содержат подвешенные массы на балках или консолях, таких как акселерометр или гироскоп. Программа AutoSpring — это мощный путь генерировать константы упругости автоматически.

Этот программный модуль анализирует поведение констант упругости при колебании b° . Результаты могут быть просмотрены и использованы в модели уменьшенного уровня для моделирования на системном уровне. Все моделирования, которые необходимы для анализа поведения колебаний, генерируются автоматически при помощи простого определения рабочего диапазона колебаний в терминах смещения. Напряжения, градиенты напряжений, нагрузка или другие граничные условия могут также быть включены перед экстракцией параметров.

BubbleSim — это программный модуль для разработки микрожидкостных МЭМС. С помощью BubbleSim можно проводить полное трехмерное численное моделирование движения пузырьков и окружающих жидкостей в микроканалах, а также решать задачи, связанные с многими нерастворимыми жидкими фазами, используя современные приближения объема жидкости для моделирования потока двух фаз.

Программа Designer предназначена для создания жестких моделей готовых к изготовлению изделий МЭМС и для моделей электромеханических, жидкостных, оптических и радиочастотных систем. Эта программа позволяет получать модели, которые совместимы с программами Microcosm и могут быть переведены в стандартные форматы для использования при построения сетки, анализе и моделировании.

DropSim — это программа для моделирования поведения микрожидкостей. Она позволяет проводить 3D численное моделирование формирования капель, их переноса и столкновения. Microcosm комбинирует эту программу с визуализаторами и системой моделирования, что позволяет оптимизировать капельные микрожидкостные системы.

MemDemping — это программный модуль, с помощью которого анализируются характеристики затухания и упругости функционирующего окружения для приборов МЭМС. Анализируется как сжатие пленок, так и плавное затухание колебаний. Полученные эффекты затухания и упругости могут быть применены в программе моделирования поведения приборов MemSys. Примерами применения являются акселерометры, гироскопы, оптические модуляторы, микрозеркала и резонансные сенсоры.

MemETherm — специальная программа для анализа структурной деформации изделий МЭМС вследствие Джоулева нагрева. Используя в качестве граничных условий прикладываемое напряжение или ток, программа вычисляет результирующую деформацию вследствие изменения температуры. MemETherm может быть применена для таких приборов, как электрически управляемые термические актюаторы для получения максимальной чувствительности к нагреву и максимального механического расширения.

MemETherm выполняет последовательно три типа анализа за один вычислительный цикл: электрической проводимости (вычисляет 3D распределение напряжений и токов на основе прикладываемых напряжений); термической проводимости (преобразует полученные значения потенциалов в термические величины, которые отражают эффект Джоулева нагрева); механической деформации (применяет вычисленные значения температуры и определяет деформации вследствие действия температуры).

MemHenry — программа, которая поддерживает полный 3D индукционно-механический анализ МЭМС, и определяет частотную зависимость R, L, и C для СБИС и RF анализа межсоединений. В комбинации с MemMech и MemHenry она вычисляет деформационно-зависимую индуктивность и сопротивление как функцию частоты. С ее помощью можно анализировать магнитную чувствительность. Эта программа может быть включена в комплексный расчет МЭМС.

MemPackage — программа для моделирования корпусирования. Разработка прибора считается завершенной только тогда, когда разработан корпус и технология корпусирования. Разработчики приборов должны рассмотреть требования к соединительным проводам и взаимодействиям, таким как механические напряжения, давление и уровни ускорений. Анализ разварки приборов и возможностей помещения в корпус может занимать много времени.

MemPackage позволяет точно и быстро анализировать воздействие на изделия МЭМС эффектов, возникающих в процессе корпусирования, дает возможность разработчикам использовать весь набор программ MEMCAD для анализа воздействия корпусирования. Напряжения и смещения, возникающие в процессе корпусирования, затем используются в качестве граничных условий для нового моделирования работы прибора, которое учитывает корпусирование и взаимодействие приборов.

MemPZR — точная и гибкая программа моделирования пьезорезистивных эффектов, основанная на полном трехмерном теоретическом моделировании. Она вычисляет точное поле сопротивления, равновесный потенциал и поле плотности токов, которые возникают в резисторах, подверженных механическим напряжениям. Она допускает применение реальных граничных условий, включая модель ограничения диффузии. Гибкость этой программы позволяет разработчику моделировать и тестировать резисторы различных геометрии и конфигурации и размещать их на разных механических структурах.

Многие разработчики сталкиваются с необходимостью моделировать приборы МЭМС совместно со схемой обработки сигнала на системном

уровне. Очень сложно автоматически объединить эти виды моделирования вследствие сложности и отличия между программами электрического и механического моделирования. Microcost предлагает интегрированное решение, поддерживающее обе методологии разработки в одной общей программе. MicroSys позволяет: автоматически встраивать результаты 3D моделирования в физически корректную макромодель со степенью свободы 6°; поддерживать экстракцию параметров, таких как напряжение, емкость, размеры, вращение, масса и др.; обладает мощной схмотехникой, программой моделирования системы, генератором временных импульсов, библиотекой механических/смешанных элементов.

Для упрощения сложности разработки МЭМС и моделирования разработано MemSys для Saber — исчерпывающее программное обеспечение, которое помогает быстро и легко преобразовать результаты подробного моделирования в Saber совместимую модель. Saber — это наиболее популярная программа моделирования электрических схем. Эта программа позволяет моделировать элементы со смешанным сигналом (аналоговый и цифровой), со смешанной энергией (электрической, механической, жидкостной, оптической и т. д.) и смешанными уровнями (от транзисторов и переключателей до системного уровня).

MemTherm анализирует статическое и динамическое поведение МЭМС приборов, подверженных изменениям температуры. Разработчики могут оценивать: максимальную температуру внутри прибора как функцию воздействующего тепла; количество тепла, необходимое для поддержания объема при постоянной температуре; спад температуры как функцию размера материала балки, где структурная часть прибора может масштабироваться для определения этой зависимости.

ReactSim — это программа, предназначенная для 3D численного моделирования многочисленных потенциально равновесных химических реакций, учитывающих поток жидкостей, перенос тепла, диффузию и электрокинетическую. Она моделирует химические реакции в объеме жидкости и на поверхности.

1.2. Пакет программ ANSYS фирмы ANSYS Inc. Family of Enterprise Solutions

Пакет программ ANSYS разработан фирмой ANSYS Inc. Family of Enterprise Solutions [5]. Этот пакет включает в себя такие программы, как MULTIPHYSICS, Mechanical, Structural, EMAG, FLOTRAN, Professional, LS-DYNA.

MULTIPHYSICS является программой для моделирования структурных, жидкостных, электромагнитных эффектов и их комбинаций, учитывая при этом влияние одного эффекта на другие.

Потребности моделирования охватывают структурные эффекты, эффекты контакта, тепловые эффекты, вычисление динамики жидкости, акустики, электростатики, магнитостатики, а также НЧ или ВЧ электромагнитные эффекты.

С помощью программы MULTIPHYSICS можно проводить следующие виды анализа: структурный анализ (термический, электростатический, механический, магнитный и др.); термический анализ (равновесное состояние, теплопроводность, конвекция, излучение); динамический анализ жидкости (ламинарный поток, турбулентный поток, свободная, принудительная или смешанная конвекция и др.); электромагнитный анализ (электростатический, магнитостатический, анализ гармоник, модальный анализ, анализ текущей проводимости и др.).

Mechanical является программой для проведения линейного и нелинейного анализа и моделирования механических структур.

Использование множителей Лагранжа дает лучшую сходимость и устойчивость к ошибкам для гиперэластичных материалов типа каучука и полимеров. В Mechanical заложено множество моделей неэластичных материалов для моделирования реальных состояний. Все нелинейные свойства материалов могут быть проанализированы с помощью нового графического пользовательского интерфейса. Есть большой выбор моделей свойств материалов, чтобы проводить моделирование материалов более точно.

Structural — это программа для нелинейного структурного анализа. Предлагая наиболее устойчивые структурные нелинейные возможности анализа, Structural также содержит полный набор математических программ для обработки больших и сложных объемов данных.

EMAG является программой для электронного, электромагнитного и электростатического анализа, в ней содержатся широкие возможности для анализа, которые включают статические, переходные и гармонические низкочастотные и электромагнитные виды моделирования. С ее помощью можно моделировать электростатическое взаимодействие и текущую проводимость, а также рассматривать частицы в электростатических и магнитостатических полях. Автоматизированные вычисления учитывают силу, индуктивность, полное сопротивление, емкость, потери Джоуля, полевую утечку, насыщенность, и электрические и магнитные полевые силы. EMAG также работает с другими ANSYS программами, типа Mechanical, для проведения всестороннего моделирования реальных явлений.

FLOTRAN — программа для проведения так называемого "компьютерного моделирования жидкости".

Professional — программа для комбинирования (сборки) результатов моделирования из других программ.

LS-DYNA — главное программное обеспечение для моделирования динамических задач, является необходимым добавлением к набору программ, позволяет также решать задачи, связанные с большой деформацией, нелинейным поведением материалов и взаимодействием нескольких объектов, типично характеризуемых переходным воздействием.

Программу можно использовать в разных отраслях промышленности от автомобильных, космических и тяжелого машиностроения до компьютерных, электронных и МСТ, чтобы провести высококачественное моделирование и уменьшить дорогостоящие циклы макетирования.

1.3. Пакет программ ABAQUS компании HKS Inc

Компания "Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc" (HKS) разрабатывает и поддерживает набор программ под названием ABAQUS [1] универсального, нелинейного анализа методом конечных элементов (FEA).

ABAQUS — это набор программ анализа, который используется во всем мире для моделирования физического отклика структур и твердых тел при различных нагрузках, температуре, воздействиях и других состояниях окружающей среды. Этот пакет включает в себя следующие программы: EXPLICIT, Standart, Aqua, Design, Safe, CAE. Моделируемые материалы: металлы, каучук, пластмассы, составные объекты, эластичная пена — пенопласт, бетон, песок, глина. Может быть промоделировано изотропное и анизотропное поведение тел. Также доступно моделирование определяемых пользователем материалов.

EXPLICIT использует явную временную интеграцию для временных шагов и включает в себя следующие типы исследований: явный динамический отклик с или без адиабатического эффекта нагрева; полный переходной анализ динамического изменения температуры (используются явные алгоритмы для механического и теплового отклика); моделирование отжига; акустическое и акустически-структурное исследование для моделирования распространения волн в акустической среде. Автоматическое разбиение сетки позволяет получать устойчивые решения нелинейных задач.

Standart — программа анализа, основанная на методе конечных элементов, разработанная специально для анализа сложных задач. С помощью этой программы можно выполнять следующие виды анализа: статические напряжения в твердом теле и анализ смещения; анализ вязкости жидкости и ее изменения; переходный анализ напряжений — смещения; переходный или статический анализ диффузии; анализ спаренных задач (термомеханических, термоэлектрических, жидкостно-механи-

ческих, напряжений и диффузии, пьезоэлектрических, акустико-механических); линейный анализ возмущений (анализ спектра отклика, динамического отклика, обусловленного случайной нагрузкой и др.).

Aqua — дополнительный модуль для ABAQUS. Он включает программы анализа кожуха устройства, надстрочного элемента, моделирования перемещения в J-трубе, расчета изгиба основания и расчет плавучих структур. Структуры могут быть проанализированы на предмет поведения при перемещении, плавучести и воздействия сил инерции в жидкой среде. Анализ структур под воздействием потока воздуха доступен для тех структур, которые располагаются выше свободной поверхности воды.

Design обеспечивает анализ чувствительности, с помощью этой программы можно вычислять относительную чувствительность и формировать параметры материалов для вычисления частоты и статического анализа. Анализ чувствительности выполняется с использованием "полуаналитического" метода.

Safe используется для анализа напряжения и деформации в различных условиях нагрузки.

CAE — среда для моделирования, управления и контроля пакета ABAQUS.

1.4. Пакет CoSolve-EM

J. R. Gilbert, R. Legtenberg и S. D. Senturia недавно разработали пакет CoSolve-EM [9] — средство для моделирования трехмерных квазистатических электромеханических систем.

Пакет CoSolve-EM расшифровывается как Coupled Solver for ElectroMechanics. Он находит последовательные решения для поставленной задачи, используя внешнее граничное взаимодействие между механической частью и электростатической и метод релаксации и SNGCR [10] для обеспечения сходимости результатов моделирования.

В CoSolve-EM используются две внешних коммерческих программы моделирования микромеханических устройств ABAQUS [1] и FASTCAP [11]. CoSolve-EM также включает в себя трехмерный визуализатор Geomview, разработанный в университете Миннесоты [12]. Ядро CoSolve-EM написано на языке C++ с использованием интерфейса Tk/tcl [13]. CoSolve-EM использует MemBase — библиотеку для выполнения главных манипуляций с трехмерными моделями. MemBase дает возможность CoSolve-EM разбивать модели, соединять их, экстрагировать поверхности, анализировать структуру на проводимость и находить внешние и внутренние области, граничащие с поверхностью.

Возможности этого пакета можно рассмотреть на примере моделирования следующих элементов:

торсионное зеркало, деформируемая плоскость, гребенка, чувствительный к нажатию емкостной сенсор.

Задачи моделирования торсионного зеркала и деформируемой плоскости обычно решаются при помощи метода релаксации. Задача перемещения гребенки обычно требует использования метода SNGCR.

На рис. 1 показано моделируемое торсионное зеркало.

Плоскость зеркала фиксирована на концах обоих подвесов и может вращаться вокруг них. Под зеркалом находятся два электрода. Напряжение подано на один электрод (на передний), а вся остальная конструкция находится под напряжением 0 В.

CoSolve-EM моделирует смещение зеркала путем нахождения последовательных решений для каждого приложенного напряжения. График зависимости отклонения от прикладываемого напряжения показан на рис. 2. Из этого графика видно, что напряжение, при котором край зеркала касается нижележащей подложки (напряжение слипания) находится между 4,25 и 4,5 В.

CoSolve-EM определяет, когда смещение уходит за пределы слипания и устанавливает его в ноль, поэтому последние две точки на графике равны нулю.

В настраиваемой оптике может возникать интерес к контролируемой деформации отражающей поверхности. Для тестирования модели такого устройства была построена следующая модель: квадратная деформируемая поверхность размерами $4000 \times 4000 \times 0,5$ мкм, подвешенная на расстоянии 5,5 мкм над заземленной поверхностью размерами 5000×5000 мкм. Между этими поверхностями поместили три квадратных электрода размерами 500×500 мкм на расстоянии 3 мкм над заземленной плоскостью. Электроды расположили симметрично относительно середины системы, причем координаты их центров $x = -1000$, $y = -1000$; 0 и 1000.

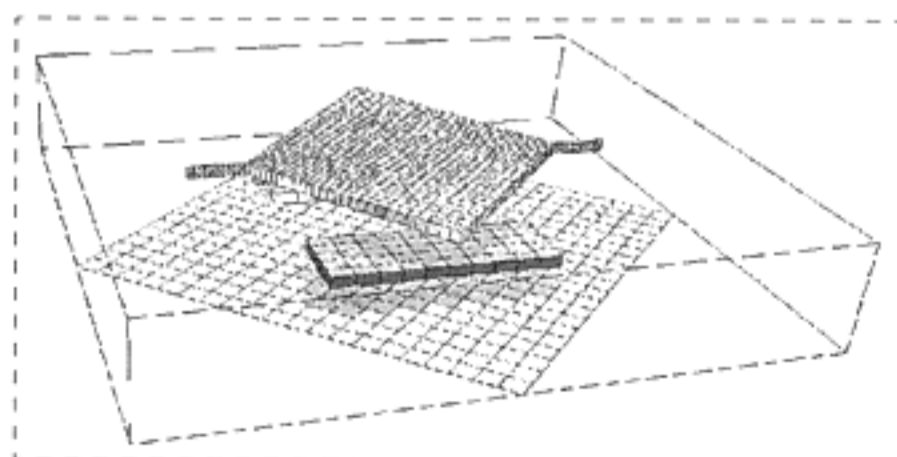


Рис. 1. Торсионное зеркало при напряжении 4,0 В. Смещение уголка зеркала составляет 0,65 мкм, что соответствует углу в $1,3^\circ$ (рисунок увеличен по оси Z в 5 раз для наглядности)

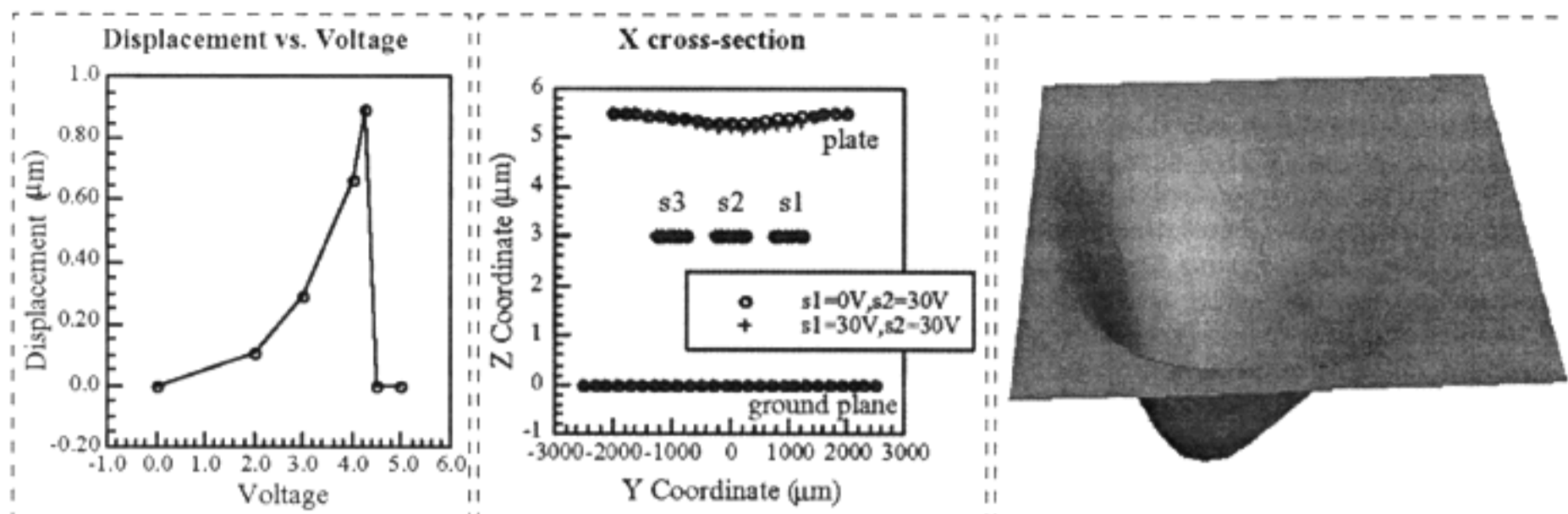


Рис. 2. Зависимость смещения от напряжения для наклоняющегося зеркала

Рис. 3. Прогибание поверхности при двух различных электростатических нагрузках

Рис. 4. Деформация плоскости под действием напряжения на электродах: $s1 = 40$ В и $s2 = 30$ В

Подачей напряжения на электроды можно контролировать деформацию плоскости. Рис. 3 изображает два среза поперек оси X деформируемой поверхности. Показаны два решения для напряжений на электродах: $s1 = 0$ В, $s2 = 30$ В и для второго случая: $s1 = 30$ В, $s2 = 30$ В; в то время как на $s3$ и на заземленные электроды подано 0 В. На рис. 4 показана деформированная поверхность при напряжении на $s1 = 40$ В, $s2 = 30$ В (рисунок увеличен по оси Z в 5 раз).

Этот пример показывает две возможности пакета CoSolve-EM. Во-первых, можно применять ненулевые граничные условия, во-вторых, решения для механической деформации поверхности не имеет существенной симметрии; задача требует полного трехмерного решения в механическом домене.

Поднятие (левитация) пальца гребенки [14] — это эффект, встречающийся при разработке гребенчатых приводов. Он проявляется только в случае, когда присутствуют более двух проводников, и его моделирование обычно не ограничивается аппроксимацией емкостей параллельных плоскостей. На рис. 5 изображена тест-модель, которая используется для изучения "левитации" структур пальцев гребенки. Модель имеет три "пальца", каждый размером $20 \times 1 \times 1$ мкм, подвешенные над подложкой на расстоянии 2 мкм. Центральный палец зафиксирован своим левым концом и поднимается вверх под действием силы левитации. Другие два пальца зафиксированы.

На рис. 6 показана зависимость смещения наконечника от приложенного напряжения для центрального пальца, в то время как два других зафиксированы. Проведено моделирование в CoSolve-EM для двух разных зазоров между пальцами и подложкой. Используя MemBase библиотеку, мож-

но варьировать зазор от 2,0 до 2,5 мкм без изменения модели в CoSolve-EM.

Этот пример показывает следующие возможности CoSolve-EM. Во-первых, можно использовать библиотеки MemBase, чтобы осуществлять перемещение для произвольных частей модели, и, во-вторых, был использован метод SNGCR для решения этой задачи в условиях, когда при больших приложенных напряжениях задача уже не решается просто применением метода релаксации.

Емкостной сенсор нажатия представляет собой интересный пример устройства, в котором используется зависимость емкости от деформации.

В этом примере была построена тест-модель из круглой пластины радиусом 150 мкм и толщиной 10 мкм, подвешенной на расстоянии 1 мкм от подложки (рис. 7). Ободок круглой пластины зафиксирован. Модель работает в таком режиме, что давление на пластину достаточно для того, чтобы она коснулась подложки.

На рис. 8 изображен график зависимости емкости от давления и контактирующей силы от давления в диапазоне 0...20 МПа.

Этот пример показывает три возможности CoSolve-EM. Можно вставлять элементы интерфейса

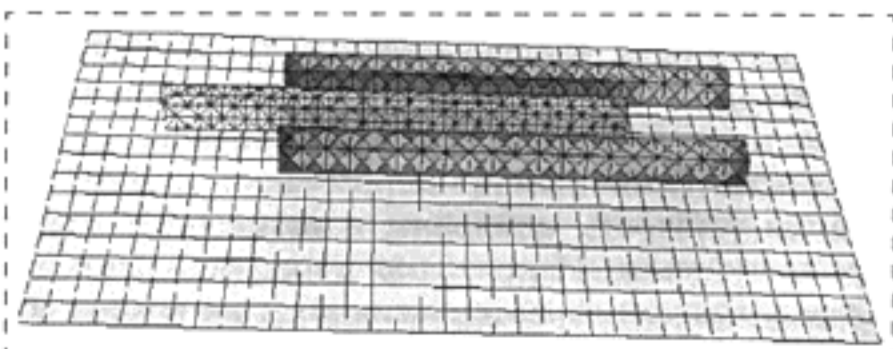


Рис. 5. Пример гребенной структуры

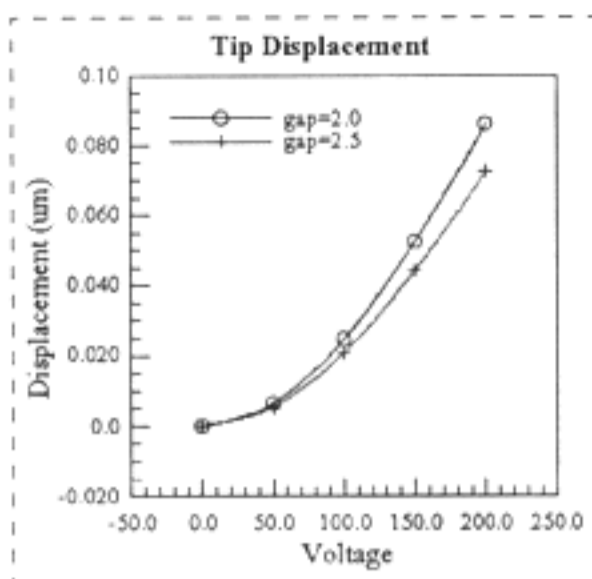


Рис. 6. График из CoSolve-EM, показывающий зависимость смещения наконечника от приложенного напряжения для двух различных зазоров между подложкой и структурой

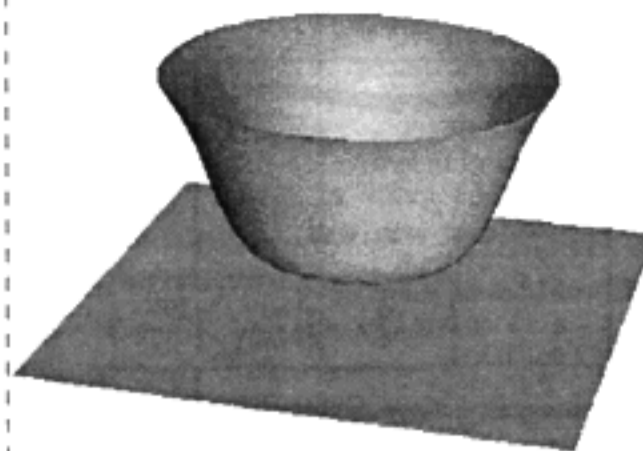


Рис. 7. Изображение CoSolve-EM модели при давлении 20 МПа (изображение по оси Z увеличено в 100 раз для наглядности)

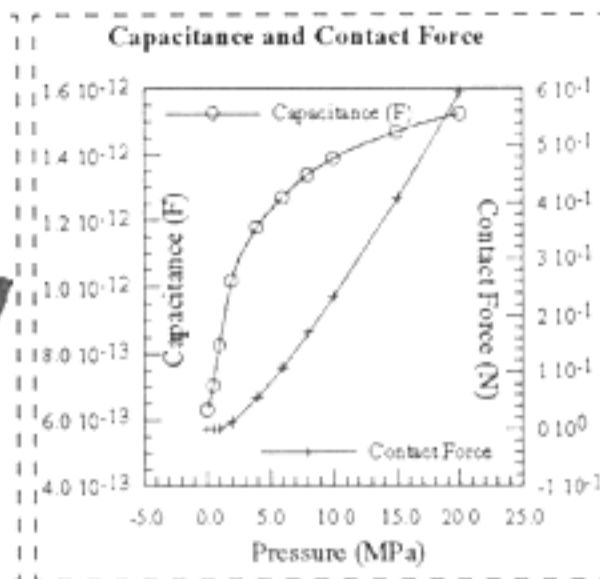


Рис. 8. Графики зависимости емкости от давления и контактирующей силы от давления в диапазоне 0...20 МПа

в CoSolve-EM (даже если они не присутствуют в начальной сеточной модели), чтобы решать задачи контактирования; можно делать экстракцию сил реакции, емкостей деформируемой структуры и варьировать прикладываемое давление.

2. ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ КВАДРАТНОЙ КРЕМНИЕВОЙ МЕМБРАНЫ

Моделирование при помощи программ трехмерного моделирования — это сложная и вычислительно емкая задача. Особенно, когда проводится оптимизация конструкции и технологии изготовления. Поэтому некоторые разработчики предлагают упрощенные модели, которые настраиваются либо по экспериментальным результатам, либо по результатам 3D моделирования.

В работе [15] описаны результаты проведения моделирования напряжений в квадратной кремниевой мембране. Структура, которая здесь исследуется, — это микродатчик давления на основе кремниевой мембраны, полученной по технологии микромеханики. Поликремниевые измерители пьезоэлектрического напряжения осаждаются на мембрану, которая деформируется под действием прикладываемого напряжения. Оптимальная эффективность этих измерителей напряжения зависит от их положения, которое должно определяться с помощью надежного описания механических деформаций и напряжений мембраны и всей структуры. У таких микромеханических приборов также могут возникать проблемы критической надежности. Типичным примером таких проблем являются усталость мембраны и возможный излом при отклонении. Напряжения в микросистемах являются важной характеристикой, и их анализ абсолютно необходим при разработке микросистем. Хотя поле напряжений в любой микромеханиче-

ской структуре может быть определено численными методами (метод конечных элементов — МКЭ), их оценка вблизи особенных точек или краев остается проблематичной. Более того, в зависимости от геометрических характеристик и подбора свойств материала можно иметь возможность увеличить локально поле напряжений и определить слабые зоны в приборе. Трехмерные МКЭ вычисления квадратной кремниевой мембраны, подверженной давлению сверху, показывают, что области наибольших напряжений расположены близко к краю мембраны вдоль срединной линии мембраны. Однако МКЭ не дает возможности точно оценивать области концентрации напряжений, что не позволяет говорить о риске повреждения материала в этих областях. Поэтому в [15] представлена двухмерная эквивалентная МКЭ модель, позволяющая контролировать и делать более подробное разбиение сетки в критических областях мембраны. Для анализа особенностей напряжений в критической зоне был применен специальный итерационный метод конечных элементов. Он основан на ранее проведенных теоретических работах, уже применяемых для анализа повреждений микроэлектронных структур [16].

3D МКЭ моделирование квадратной ($3 \times 3 \text{ мм}^2$) кремниевой микромеханической мембраны было выполнено с использованием программы ANSYS (версия 5.1). Толщина мембраны изменялась от 10 до 30 мкм, а прикладываемое давление от 0 до 100 кПа. Вследствие симметричности мембраны есть необходимость строить сетку только на четверти структуры. 3D модель была построена из двух элементов с разбитой сеткой по толщине мембраны, в боковых элементах, расположенных вокруг края, для учета концентрации напряжений (рис. 9, а).

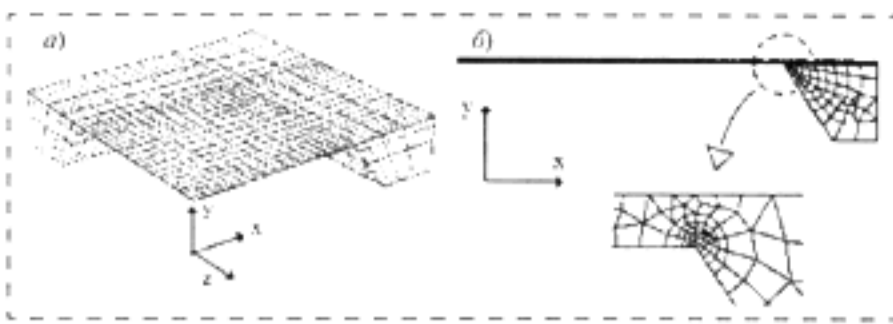


Рис. 9. 3D (а) и 2D (б) модели с соответствующими осями координат

Узлы, расположенные внизу рамки, были присоединены к фиктивной неподвижной рамке корпуса. Наибольшая концентрация напряжений расположена близко к краю рамки мембраны вдоль серединной линии. Тем не менее вследствие ограничения сетки, связанной с фиксированным числом фронтов волны и временем вычисления, есть потеря чувствительности, в частности с краю, где имеет место концентрация напряжений. Этот недостаток может быть преодолен использованием 2D модели (рис. 9, б). В 2D структуре может использоваться более мелкая сетка, чем в 3D структуре, что увеличивает вычислительную чувствительность и точность. Однако разность форм мембраны (квадратная в 3D и круглая в 2D) должна быть учтена. Критерий пригодности между 2D и 3D моделями заключается в том, что они должны иметь одинаковые отклонения и напряжения в некритичных областях датчика (в этом случае в центре мембраны). В 2D модели мембрана разбита на пять участков по толщине мембраны в центре и на восемь участков вблизи края мембраны, а боковая сетка содержит 300 элементов. Протестированы различные случаи размера сетки по толщине мембраны. Найдено, что при числе элементов по толщине мембраны от 3 до 5 результаты расчета отклонения мембраны являются идентичными и стабильными.

Поскольку есть разница в геометрии мембраны (квадратная в 3D модели и круглая в 2D), то корреляция между 2D и 3D моделями осуществляется с использованием прикладываемого давления в качестве подгоночного параметра. Это давление прикладывается равномерно на верхнюю сторону мембраны. Сравнивая результаты 3D и 2D МКЭ было определено давление P_{2D} , которое должно быть приложено к верхней стороне мембраны при 2D моделировании, чтобы получить то же отклонение центра мембраны, что и при 3D моделировании для данного давления P_{3D} . Для толщины мембра-

ны в диапазоне 10–30 мкм соотношение давлений $\lambda = P_{2D}/P_{3D} = 1,36$. Вследствие уменьшения поверхности мембраны 2D круглая структура жестче, чем 3D квадратная структура, и для получения такого же механического состояния прикладываемое напряжение должно быть выше в случае 2D структуры по сравнению с 3D структурой. С использованием этого значения λ достигнуто совпадение результатов моделирования в пределах 3% для толщины мембран от 10 до 30 мкм. В том же диапазоне толщины это значение λ дает совпадение продольных механических деформаций в пределах 10^{-4} , за исключением края мембраны — это та область, где 2D моделирование, похоже, более надежно, так как сетка более подробная.

Список литературы

1. **Abaqus ver. 5.7**, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, <http://www.hks.com>.
2. **MEMCAD ver. 4.5**, Microcosm Technologies, Inc., Research Triangle, NC, <http://www.memcad.com>.
3. **IntelliSuite**, IntelliSense Corp. Wilmington, MA, <http://www.intellisense.com>.
4. **Funk J. M., Korvink J. G., Buhler J., Bachtold M., Baltes H.** SOLIDIS: A tool for microactuator simulation in 3-D // *J. Microelectromechanical Systems*. Mar. 1997, Vol. 6, no 1. P. 70–82.
5. **ANSYS/Multiphysics ver. 5.5**, Ansys, Inc., Canonsburg, PA, <http://www.ansys.com>.
6. **Star-HSPICE**, Avant! Corp., Fremont, CA, <http://www.avantcorp.com>.
7. **Simulink ver. 3.0**, The Mathworks, Inc., Natick, MA, <http://www.mathworks.com>.
8. **SABER. Analog Inc.**, Beaverton, Oregon, <http://www.analogy.com>.
9. **Gilbert J. R., Legtenberg R., Senturia S. D.** 3D Coupled Electro-mechanics for MEMS: Applications of CoSolve-EM, MEMS'95. P. 122–127.
10. **Cai X., Yie H., Osterberg P., Gilbert J., Senturia S., White J.** A Relaxation/Multipole-Accelerated Scheme for Self-Consistent Electromechanical Analysis of Complex 3-D Microelectromechanical Structures // *Proc. Int. Conf. On Computer-Aided Design*, Santa Clara, CA, November 1993. P. 270–274.
11. **Nabors K., White J.** FastCap: A multipole-accelerated 3-D capacitance extraction program // *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*. Nov. 1991, Vol. 10, no 10. P. 1447–1459.
12. **Software Development Group**, Geometry Center, University of Minnesota, 1300 South Second Street, Suite 500, Minneapolis, MN 55454, USA, or see <http://www.geom.umn.edu/welcome.html>.
13. **Ousterhout J. K.** Tcl and Tk Toolkit. Addison-Wesley, 1994.
14. **Tang W. C., Lim M. G., Howe R. T.** Electrostatic comb drive levitation and control method // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 1992, Vol. 1, 4. P. 170–178.
15. **Chouaf A., Malhaire Ch., Berre M. Le., Dupeux M., Pourroy F., Barbier D.** Stress analysis at singular points of micromachined silicon membranes // *Sensors and Actuators* 2000, N 84. P. 109–115.
16. **Brantley W. A.** Calculated elastic constants for stress problems associated with semiconductor devices // *J. Appl. Phys.* 1973, 44 (1). P. 534–535.

Л. Ф. Фомин,
Институт проблем механики РАН

ДВИЖУЩИЙ ЭФФЕКТ КОЛЕБАНИЙ В МИКРОМЕХАНИКЕ*

Исследуется самопродвижение в вязкой несжимаемой жидкости микророботов за счет возбуждения в них волновых колебаний. Вычислено значение движущей силы, с которой колеблющийся с заданной частотой, амплитудой и длиной волны гибкий микроробот может перемещаться в вязкой несжимаемой жидкости только за счет факторов вязкого трения, без учета факторов инерционности.

Большие достижения, достигнутые к настоящему времени в мировой микросистемотехнике по исследованиям, разработке и производству разнообразных моделей микроэлектродвигателей для микроробототехнических систем делают актуальными вопросы о том, на основе каких концепций наиболее целесообразно разрабатывать двигатели микроэлектромеханических устройств для исследования движения соков в растениях, обследования сосудистых систем животных и человека, а также для диагностики состояния различных трубопроводных систем промышленных установок. В настоящей статье предлагается концепция самопродвижения микророботов (микроэлектромеханических устройств) за счет возбуждения в них волновых колебаний и генерации волн смещения.

Рассматривается микроэлектромеханический объект — МЭМС (микроробот), имеющий гибкий цилиндрический корпус диаметром d и длиной L , передний и задний концы которого оканчиваются одинаковыми головками — сферами или полусферами такого же диаметра d . Внутри них находятся системы управления и питания. Симметричность микроробота необходима для возможности осуществления движений вперед-назад без разворотов. Корпус микроробота состоит из большого числа N последовательно соединенных между собой сегментов-дисков или колец диаметром d и толщиной a . Соседние сегменты могут либо поворачиваться один относительно другого в плоскости x, y вокруг некоторых осей, параллельных оси z , либо сближаться или отдаляться один от другого вдоль оси x . В первом случае корпус микроробота будет совершать поперечные колебания в плоскости x, y , а во

втором случае в корпусе микроробота будут генерироваться продольные колебания вдоль оси x .

В общем случае в реальных условиях под действием внешних воздействий и внутренних моментов микроробот может совершать сложные движения, однако, идеализируя задачу, будем рассматривать только случай движения в плоскости x, y . Для математического решения задачи считаем, что $a < d \ll L$. Схематизируя задачу, представим микроробот нитевидным микрообъектом длины L и рассмотрим плоскопараллельную задачу о самопродвижении в вязкой несжимаемой жидкости нитевидного микрообъекта, в котором генерируются волновые поперечные либо продольные колебания с частотой n и распространяется прогрессивная синусоидальная волна с амплитудой b и длиной волны λ , как показано на рисунке.

При таком подходе случай поперечных колебаний в плоскости x, y можно записать уравнениями вида

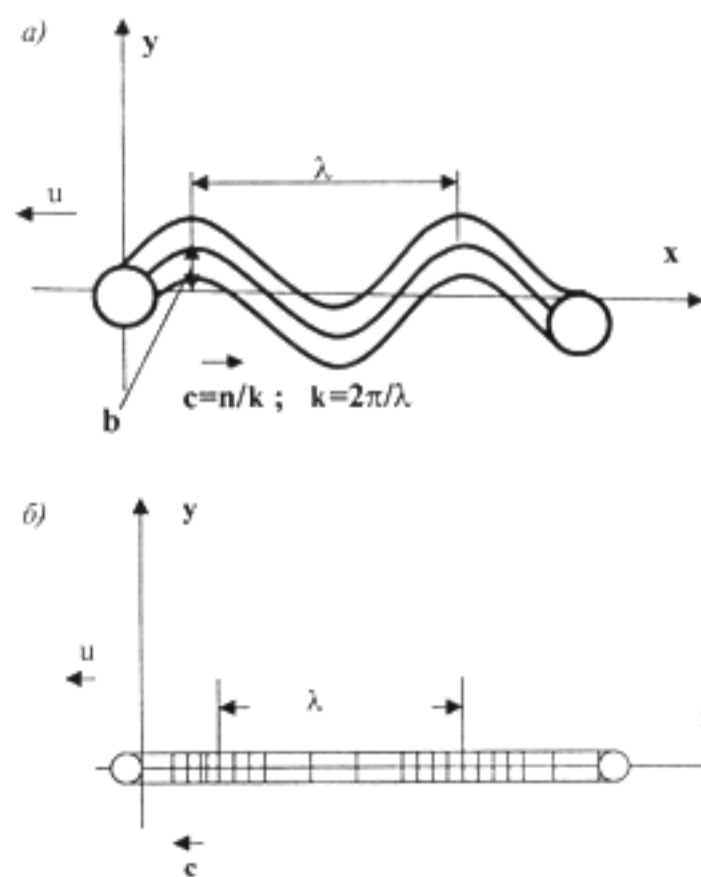
$$\begin{aligned} x &= x_0, \\ y &= b \sin(kx_0 - nt), \end{aligned} \quad (1)$$

где x_0 — лагранжева координата частицы колеблющегося микроробота; t — время; k — волновое число, связанное с длиной волны λ соотношением

$$k = 2\pi/\lambda.$$

Фазовая скорость c движения бегущей волны определяется формулой

$$c = n/k = \lambda n/(2\pi).$$



Схемы волновых движений микроробота:
а — при возбуждении поперечных колебаний; б — при генерации продольных колебаний

*Работа выполнялась в рамках Федеральной целевой научно-технической программы Минпромнауки "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002—2006 гг. блока "Ориентированные фундаментальные исследования", раздела "Фундаментальные исследования в области физических наук" (Механика).

Случай продольных колебаний микрообъекта определяется уравнениями

$$\begin{aligned} y &= 0; \\ x &= x_0 b \sin(kx_0 - nt). \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, вид (1)—(2) показывает, что с математической точки зрения решение задач о поперечных или продольных колебаниях микроробота сходны между собой. Однако при этом особое значение приобретает направление фазовой скорости распространения бегущей волны. Как видно будет из дальнейшего, в ходе решения выявляется важный для управления микророботами факт, заключающийся в том, что при поперечных колебаниях направление фазовой скорости бегущей волны должно быть противоположно желаемому направлению движения микроробота, а при продольных колебаниях направление фазовой скорости должно быть одинаковым с желаемым направлением движения микроробота. Для решения поставленных задач используются подвижные системы координат, связанные с бегущей волной.

Целью предлагаемой статьи являются выбор некоторой базовой формулы для скорости микроробота, перемещающегося в вязкой несжимаемой жидкости за счет возбуждения волновых колебаний и генерации бегущих волн смещения без использования факторов инерционности, а также вычисление выражения для развиваемой микророботом движущей силы как функции амплитуды и частоты колебаний, длины волны (или волнового числа), характерного размера (диаметра головки) и коэффициента динамической вязкости среды, в которой перемещается микроробот.

Предполагается, что движение микроробота происходит в некоторых объемах вязкой однородной жидкости, ограниченных стенками, либо в некоторых проходах или трубках, но без свободных поверхностей. Обозначим u , v — компоненты вектора скорости v .

Если считать среду несжимаемой, уравнение неразрывности имеет вид

$$\operatorname{div} v = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0. \quad (3)$$

Вводя функцию тока $\Psi(x, y)$, такую что

$$u = \partial \Psi / \partial y; \quad v = -\partial \Psi / \partial x, \quad (4)$$

мы тем самым автоматически удовлетворяем уравнению неразрывности (3), что является существенным преимуществом плоскопараллельного движения несжимаемой среды.

Введем еще ротор (или ротацию) скорости $\operatorname{rot} v$, равную удвоенному вектору вихревой напряженности ω : $\operatorname{rot} v = 2\omega$.

Для нашего плоскопараллельного течения остается только составляющая ω вектора вихревой напряженности вдоль оси z по нормали к плоскости x, y :

$$\omega_z = \omega = (1/2)[\partial v / \partial x - \partial u / \partial y]. \quad (5)$$

Величина ω определяет вращение частиц среды в плоскости x, y вокруг мгновенных осей, параллельных оси z .

Учитывая (4), видим, что

$$\begin{aligned} \omega &= -(1/2)[\partial^2 \Psi / \partial x^2 + \partial^2 \Psi / \partial y^2] = -(1/2)\nabla^2 \Psi = \\ &= -(1/2)\Delta \Psi, \end{aligned} \quad (6)$$

где использованы обычные обозначения лапласиана Δ и оператора набла ∇^2 :

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Psi &= \Delta \Psi = \partial^2 \Psi / \partial x^2 + \partial^2 \Psi / \partial y^2; \\ \nabla^4 \Psi &= \Delta \Delta \Psi = \partial^4 \Psi / \partial x^4 + 2\partial^4 \Psi / \partial x^2 \partial y^2 + \partial^4 \Psi / \partial y^4. \end{aligned}$$

Таким образом, для плоскопараллельной задачи достаточно определить функцию тока Ψ , а затем по (4), (6) найти компоненты скорости u , v и вихревую напряженность (или составляющую завихренности) ω .

Общие уравнения движения сплошной среды имеют вид

$$\rho Dv/Dt = K + P, \quad (7)$$

где ρ — плотность среды; K — массовая сила, отнесенная к единице объема; P — поверхностная сила, отнесенная к единице объема, включающая силы давления и касательные силы трения; Dv/Dt — субстанциальное ускорение, равное сумме локальной составляющей, учитывающей нестационарность движения, и конвективной составляющей, учитывающей перемещения частицы.

Массовые силы являются заданными внешними силами, поверхностные же силы зависят от скорости, с которой среда деформируется в исследуемом поле скоростей. Мы рассматриваем задачу о движении микроробота в объеме жидкости, ограниченном стенками, но без свободных поверхностей. Массовые же силы при движении играют существенную роль только либо при наличии у жидкости свободной поверхности, либо при неравномерном распределении плотности для неоднородной среды. В однородных же жидкостях без свободной поверхности вес, действующий на каждый элемент объема, уравновешивается гидростатической подъемной силой, вызываемой гидростатическим давлением, существующим в состоянии покоя. Следовательно, при движении однородной жидкости без свободной поверхности массовые силы в уравнении (7) совершенно выпадают.

В механике жидкости принято, что составляющие дивергенции тензора напряжений связаны исключительно с составляющими тензора скоростей деформации, т. е. с компонентами u , v вектора скорости (или тензора растяжений). Если связь между этими составляющими одинакова во всех направлениях, то жидкость называется изотропной. Жидкость называется ньютоновской, если указанная связь линейна и действует закон трения Стокса. Уравнения движения для такой жидкости называются уравнениями Навье—Стокса.

Для нашей плоскопараллельной задачи при отсутствии массовых сил в случае несжимаемой среды уравнения Навье—Стокса принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} &= \\ &= -(1/\rho)\frac{\partial p}{\partial x} + \nu[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}]; \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} &= \\ &= -(1/\rho)\frac{\partial p}{\partial y} + \nu[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}], \end{aligned} \quad (8)$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости; p — давление.

Предполагая, что функции p, u, v дифференцируемы достаточное число раз (гладкие до некоторого порядка), можно из системы (8) исключить давление p . Для этого продифференцируем первое уравнение системы (8) по y , а второе по x и вычтем первое из второго.

В итоге получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}] + u\frac{\partial}{\partial x}[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}] + \\ + v\frac{\partial}{\partial y}[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}] + [\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}] \times \\ \times [\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}] = \nu[\frac{\partial^2}{\partial x^2}(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}) + \\ + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y})]. \end{aligned} \quad (9)$$

Учитывая уравнение неразрывности (3) и значение вихревой напряженности (5), сократив на 2, из выражения (9) получим:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u\frac{\partial \omega}{\partial x} + v\frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu[\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}] \quad (10)$$

или в сокращенном виде

$$D\omega/Dt = \nu\Delta\omega. \quad (11)$$

Итак, для плоскопараллельной задачи уравнения Навье—Стокса движения несжимаемой среды имеют вид уравнения переноса вихрей (10)—(11), которое показывает, что субстанциальное изменение вихревой напряженности ω , складывающееся из локальной и конвективной составляющих, равно диссипации вихревой напряженности вследствие трения.

Если теперь учесть соотношение (6), согласно которому вихревая напряженность ω выражается через функцию тока Ψ , то уравнение переноса вихрей (10)—(11), т. е. уравнение Навье—Стокса плоскопараллельного движения несжимаемой вязкой жидкости, примет вид

$$\frac{\partial \nabla^2 \Psi}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \nabla^2 \Psi}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \nabla^2 \Psi}{\partial y} = \nu \nabla^4 \Psi. \quad (12)$$

Уравнение (12) является нелинейным дифференциальным уравнением четвертого порядка относительно одной неизвестной — функции тока Ψ . К нему надо добавить еще граничные условия для функции тока Ψ , конкретизирующие каждую отдельную задачу.

Общее решение уравнения (12) связано с очень большими трудностями. Однако существует несколько типов течений, для которых эти уравнения упрощаются или даже линеаризуются и допускают точные решения. В основном это так называемые ползущие течения, для которых факторы вязкого трения значительно превышают факторы инерционности.

Для поступательного равномерного движения тела в вязкой жидкости основным безразмерным числом, характеризующим отношение факторов инерционности к факторам вязкости, является число Рейнольдса

$$Re = \rho Vd/\mu = \nu d/\nu,$$

где d — характерный размер.

В том случае, когда тело колеблется, как в рассматриваемом нами случае, факторы инерционности возникают также от реакции между колеблющейся поверхностью и окружающей жидкостью. При этом число, соответствующее числу Рейнольдса при поступательном движении, представляется в виде

$$nd^2\rho/\mu = nd^2/\nu.$$

К настоящему времени в многочисленных экспериментах установлено, что в ползущих течениях уже для чисел Рейнольдса $Re < 0,25$ изменения (флуктуации) скорости по амплитуде будут весьма малы, т. е. будут малы производные скорости, а их произведения будут второго порядка малости, и конвективными членами ускорения в левой части (12) можно пренебречь с достаточной степенью точности [1—3].

Для таких случаев уравнения Навье—Стокса при неустановившемся движении примут вид линейных уравнений

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \Psi = \nu \nabla^4 \Psi \quad (13)$$

— в терминах функции тока или

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nu \nabla^2 \omega$$

— в терминах завихренности.

Для установившихся течений уравнение (13) превращается в бигармоническое уравнение для функции тока

$$\nabla^4 \Psi = 0 \quad (14)$$

или уравнение Лапласа для завихренности

$$\Delta \omega = 0.$$

Эти уравнения называются уравнениями ползущего течения.

Полученные уравнения могут быть решены методом последовательных приближений с помощью разложения искомой функции тока Ψ или завих-

ренности ω в ряды по малому параметру, в качестве которого можно принять амплитуду b колебаний или произведение bk амплитуды b на волновое число k или величину $(bk)^2$. При этом профиль волн (1)–(2) и граничные условия в виде значений скоростей частиц колеблющегося микроробота также разлагаются в ряды по малому параметру $(bk)^2$.

Разлагая функцию тока Ψ , профиль волн и граничные условия в ряды по малому параметру $(bk)^2$, подставляя разложение Ψ в бигармоническое уравнение (14), приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях малого параметра и решая уравнения для каждого последовательного приближения с удовлетворением соответствующих граничных условий, можно получить выражение для скорости колеблющегося микрообъекта.

В литературе по движению микрообъектов в вязкой жидкости [4–8] к настоящему времени получено несколько формул для скорости перемещения микрообъекта за счет генерации поперечных и продольных волн или их комбинации. В данной статье в качестве основной базовой формулы для значения скорости предлагается выражение в виде следующего ряда:

$$u = 0,5n(bk)^2[1 - 1,187(bk)^2 + 1,281(bk)^4 - 1,384(bk)^6 + \dots].$$

Этот ряд сходится для $bk < 1$.

Для интервала $0 < bk < 1$ значения сумм этого ряда могут быть хорошо представлены формулами

$$u = (n/k)[0,518b^2k^2/(1 + 1,406b^2k^2)]$$

или

$$u = (n/k)[0,508b^2k^2 - 0,03b^4k^4/(1 - 1,224b^2k^2)]. \quad (15)$$

Обе формулы согласуются в пределах нескольких процентов для $(bk)^2 < 2$. Формула (15) применима и для поперечных, и для продольных колебаний микроробота. Однако следует учитывать, что при генерации поперечных колебаний фазовая скорость бегущей в направлении x волны противоположна скорости продвижения микроробота, а при генерации продольных колебаний фазовая скорость бегущей волны совпадает с направлением движения микроробота.

Из гидромеханики [1–3] на основании теоретических решений Стокса или на основе применения теории размерности и подобия известно, что для малых чисел Рейнольдса при медленных "ползущих" движениях в вязкой несжимаемой жидкости сферического микрообъекта, имеющего диаметр d , значения силы сопротивления W и равной ей по модулю, но противоположно направленной движущей силы F определяются по формуле

$$W = F = 3\pi\mu du. \quad (16)$$

Полное сопротивление W является суммой действия нормальных и тангенциальных напряжений

на поверхности микрообъекта. Сопротивление от нормальных напряжений называется сопротивлением формы или профиля W_n , а сопротивление от тангенциальных или поверхностных (вязких) напряжений называется поверхностным сопротивлением W_t . Интегрируя отдельно нормальные и отдельно тангенциальные напряжения по поверхности сферы, можно получить следующие значения для нормального и поверхностного сопротивления микрообъекта:

$$\begin{aligned} W_n &= \pi\mu du; \\ W_t &= 2\pi\mu du. \end{aligned}$$

Таким образом, поверхностное (или вязкое) сопротивление в два раза превышает сопротивление профиля (или формы). Если для корпуса микроробота будут применяться силиконовые материалы или силиконовые покрытия, то сопротивление микроробота можно будет свести к сопротивлению головки. Кроме того, в настоящее время имеются экспериментальные данные, говорящие о том, что если тонкий лист или пластинка, находящиеся в вязкой жидкости, колеблются всей своей поверхностью или частью поверхности, то движение жидкости около них получается ламинарным и потенциальным и не оказывает никакого дополнительного гидродинамического сопротивления их движению [9–11].

Значение скорости самопродвижения u микроробота может быть выражено из (16) через движущую силу F и параметры d, μ следующей формулой:

$$u = F/(3\pi\mu d).$$

Но вместе с тем, согласно вышеприведенному анализу, скорость самопродвижения микроробота выражается по формуле (15) через параметры волновых колебаний n, b, k , т. е. имеем:

$$F/(3\pi\mu d) = u = (n/k)[0,508(bk)^2 - 0,03(bk)^4]/[1 - 1,224(bk)^2].$$

Отсюда можно выразить движущую силу F , развиваемую микророботом, в котором генерируются поперечные или продольные колебания с частотой n , волновым числом k и амплитудой b , продвигающимся в однородной несжимаемой жидкости с коэффициентом динамической вязкости μ :

$$F = (3\pi\mu nd/k)[0,508(bk)^2 - 0,03(bk)^4]/[1 - 1,224(bk)^2].$$

При этом скорость продвижения микрообъекта выражается формулой (15).

Приведенный анализ позволил определить движущую силу, развиваемую колеблющимся с заданной амплитудой b , волновым числом k и частотой колебаний n МЭМС (микророботом) и перемещающую его в вязкой жидкости без использования факторов инерционности, но только за счет факторов вязкого трения. При этом важным является

факт, заключающийся в том, что при возбуждении поперечных волновых колебаний фазовая скорость бегущей волны должна быть противоположна желаемому направлению движения микроробота, а при генерации продольных колебаний направление фазовой скорости бегущей волны должно совпадать с направлением желаемого движения микроробота.

Список литературы

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 904 с.
2. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 432 с.
3. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976. 630 с.

4. Taylor G. I. Analysis of the swimming of microscopic organisms // Proc. Royal Soc. Ser. A. 1951. Vol. 209. N 1099. P. 447—461.
5. Taylor G. I. The action of waving cylindrical tails in propelling microscopic organisms // Proc. Royal Soc. Ser. A. 1952. Vol. 211. P. 225—239.
6. Reynolds A. J. The swimming of minute organisms // J. Fluid Mech. 1965. Vol. 23. Part 2. P. 241—260.
7. Drummond J. E. Propulsion by oscillating sheets and tubes in a viscous fluid // J. Fluid Mech. 1966. Vol. 25. Part 4. P. 787—793.
8. Dresdner R. D., Katz D. F., Berger S. A. The propulsion by large amplitude waves of uniflagellar micro-organisms of finite length // J. Fluid Mech. 1980. Vol. 97. N 3. P. 591—621.
9. Taneda S., Tomonari Y. An experiment on the flow around a waving plate // J. Phys. Soc. of Japan. 1974. Vol. 36. N 6. P. 1683—1689.
10. Черный Г. Г. Пограничный слой на пластине с подвижной поверхностью // Докл. АН СССР. 1973. Т. 213. № 4. С. 802—803.
11. Антоноук Р. А. Экспериментальное исследование профиля скорости в пограничном слое на частично подвижной поверхности // Гидромеханика. 1975. Вып. 32. С. 87—89.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.3.049.77+681.586

О. Н. Пьявченко, д-р техн. наук, проф.,
Таганрогский государственный радиотехнический университет,
А. Е. Панич, д-р техн. наук, проф.,
НКТБ "Пьезоприбор" Ростовского государственного университета,
Е. А. Мокров, д-р техн. наук,
ФГУП НИИ физических измерений (г. Пенза)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АРХИТЕКТУРА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Рассмотрены принципы построения интеллектуальных датчиков, на основе которых реализуются современные информационно-измерительные системы. Описана архитектура этих систем.

Создание современных систем мониторинга, диагностики и управления идет по пути построения различных иерархических распределенных микрокомпьютерных систем. При этом на их нижнем уровне вместо сравнительно простых устройств сопряжения с объектом все чаще использу-

ются микропроцессорные системы преобразования и измерения снимаемых с датчиков сигналов. Такие системы могут не только считывать и представлять сигналы цифровыми кодами, но и градуировать их с учетом температурных и временных искажений, вносимых в характеристики датчиков, составлять предварительные заключения о состоянии объекта, постоянно отслеживать собственную работоспособность и поддерживать ее при аппаратных отказах, осуществлять обмен информацией через сетевые каналы.

В основе построения таких систем лежат "интеллектуальные датчики", в которых в моноблоке вместе с аналоговой частью, подключаемой к чувствительному элементу, используется цифровая часть на базе сигнальных микропроцессоров и микроконтроллеров. Эта цифровая часть обеспечивает не только более качественную обработку значений сигналов, но и организацию обмена данными через сетевые каналы.

Одним из перспективных классов систем преобразования и измерения, сигналов датчиков являются распределенные информационно-измерительные системы, строящиеся на основе интеллектуальных датчиков.

В интеллектуальном датчике к аналоговой части, которая усиливает, нормирует и фильтрует сигнал чувствительного элемента, подключается цифровая часть, созданная на базе микропроцессоров со встраиваемой архитектурой (рис. 1) [1]. При этом цифровая часть не только обеспечивает более качественную обработку сигналов и выявление отказов аппаратных средств датчика, но и организует обмен информации через сетевые каналы.

факт, заключающийся в том, что при возбуждении поперечных волновых колебаний фазовая скорость бегущей волны должна быть противоположна желаемому направлению движения микроробота, а при генерации продольных колебаний направление фазовой скорости бегущей волны должно совпадать с направлением желаемого движения микроробота.

Список литературы

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 904 с.
2. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 432 с.
3. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976. 630 с.

4. Taylor G. I. Analysis of the swimming of microscopic organisms // Proc. Royal Soc. Ser. A. 1951. Vol. 209. N 1099. P. 447—461.
5. Taylor G. I. The action of waving cylindrical tails in propelling microscopic organisms // Proc. Royal Soc. Ser. A. 1952. Vol. 211. P. 225—239.
6. Reynolds A. J. The swimming of minute organisms // J. Fluid Mech. 1965. Vol. 23. Part 2. P. 241—260.
7. Drummond J. E. Propulsion by oscillating sheets and tubes in a viscous fluid // J. Fluid Mech. 1966. Vol. 25. Part 4. P. 787—793.
8. Dresdner R. D., Katz D. F., Berger S. A. The propulsion by large amplitude waves of uniflagellar micro-organisms of finite length // J. Fluid Mech. 1980. Vol. 97. N 3. P. 591—621.
9. Taneda S., Tomonari Y. An experiment on the flow around a waving plate // J. Phys. Soc. of Japan. 1974. Vol. 36. N 6. P. 1683—1689.
10. Черный Г. Г. Пограничный слой на пластине с подвижной поверхностью // Докл. АН СССР. 1973. Т. 213. № 4. С. 802—803.
11. Антоноук Р. А. Экспериментальное исследование профиля скорости в пограничном слое на частично подвижной поверхности // Гидромеханика. 1975. Вып. 32. С. 87—89.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.3.049.77+681.586

О. Н. Пьявченко, д-р техн. наук, проф.,
Таганрогский государственный радиотехнический университет,
А. Е. Панич, д-р техн. наук, проф.,
НКТБ "Пьезоприбор" Ростовского государственного университета,
Е. А. Мокров, д-р техн. наук,
ФГУП НИИ физических измерений (г. Пенза)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АРХИТЕКТУРА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Рассмотрены принципы построения интеллектуальных датчиков, на основе которых реализуются современные информационно-измерительные системы. Описана архитектура этих систем.

Создание современных систем мониторинга, диагностики и управления идет по пути построения различных иерархических распределенных микрокомпьютерных систем. При этом на их нижнем уровне вместо сравнительно простых устройств сопряжения с объектом все чаще использу-

ются микропроцессорные системы преобразования и измерения снимаемых с датчиков сигналов. Такие системы могут не только считывать и представлять сигналы цифровыми кодами, но и градуировать их с учетом температурных и временных искажений, вносимых в характеристики датчиков, составлять предварительные заключения о состоянии объекта, постоянно отслеживать собственную работоспособность и поддерживать ее при аппаратных отказах, осуществлять обмен информацией через сетевые каналы.

В основе построения таких систем лежат "интеллектуальные датчики", в которых в моноблоке вместе с аналоговой частью, подключаемой к чувствительному элементу, используется цифровая часть на базе сигнальных микропроцессоров и микроконтроллеров. Эта цифровая часть обеспечивает не только более качественную обработку значений сигналов, но и организацию обмена данными через сетевые каналы.

Одним из перспективных классов систем преобразования и измерения, сигналов датчиков являются распределенные информационно-измерительные системы, строящиеся на основе интеллектуальных датчиков.

В интеллектуальном датчике к аналоговой части, которая усиливает, нормирует и фильтрует сигнал чувствительного элемента, подключается цифровая часть, созданная на базе микропроцессоров со встраиваемой архитектурой (рис. 1) [1]. При этом цифровая часть не только обеспечивает более качественную обработку сигналов и выявление отказов аппаратных средств датчика, но и организует обмен информации через сетевые каналы.

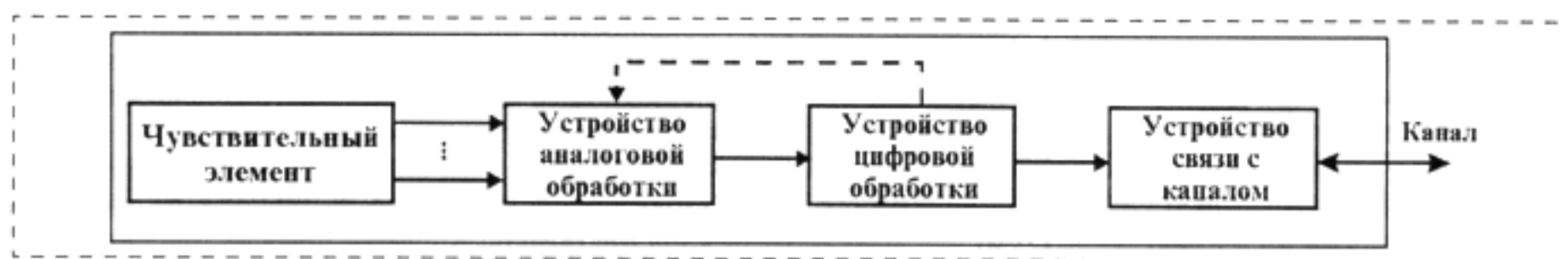


Рис. 1. Структура интеллектуального датчика

Такой подход к построению датчиков уже сегодня позволяет во многом реализовать проявившиеся в последние годы **тенденции их совершенствования**:

- увеличение числа функций предварительной обработки сигнала, считываемого с чувствительного элемента, и системных функций, связанных с организацией распределенных вычислений в системе;
- преобладание функций, реализуемых численными методами на встраиваемых микропроцессорах и микроконтроллерах;
- уменьшение чувствительности к помехам и понижение уровня собственных шумов на этапе предварительной обработки сигнала;
- повышение точности измерений датчика за счет компьютерной реализации в нем алгоритмов компенсации температурных и временных погрешностей чувствительного элемента;
- регистрация и хранение информации о выходах измеряемой переменной за установленные пределы;
- дистанционно программируемая калибровка выходной величины;
- программные конфигурирование и форматирование датчика по командам канала управления;
- организация протокольного обмена выходными данными через сетевой канал с компонентами системы;
- введение самоконтроля отказов аппаратных средств датчика;
- рост степени защиты результатов измерений от несанкционированного доступа.

В то же время в результате развития функциональных возможностей интеллектуальные датчики наряду с персональными компьютерами, одноплатными микроЭВМ и др. становятся базовыми модулями для построения распределенных информационно-измерительных систем (РИИС).

РИИС представляют собой предназначенные для измерения и преобразования сигналов датчиков в реальном масштабе времени распределенные разнородные многоканальные многофункциональные комплексы специализированных микропроцессорных модулей, объединенных операционной системой и информационной сетью.

Для иллюстрации возможностей, открывающихся при создании аппаратно-программных средств микропроцессорных распределенных информацион-

но-измерительных систем, сформулируем принципы и определим тенденции развития их архитектуры.

На современном этапе построения РИИС основной акцент делается на *расширение разновидностей реализуемых функций* в целях:

- обеспечения более точных и надежных измерений;
- организации самодиагностики и увеличения живучести;
- развития сетевых интерфейсов и адаптации к индивидуальным требованиям потребителей.

При этом список функций, реализуемых РИИС, включает не только традиционно выполняемые в устройствах сопряжения с объектом (УСО) [2] съем, усиление — нормирование, фильтрацию и аналого-цифровое преобразование сигналов, но и функции, реализуемые, как правило, на микроЭВМ более высокого уровня: градуировку, оценку результатов измерений, самодиагностику, программирование архитектуры, формирование, упаковку и передачу информации по сетевым каналам и др.

Для реализации этих функций РИИС предлагается строить на основе принципов, характерных для современных архитектур модульных устройств сопряжения с объектом, промышленных сетей микроконтроллеров, мультимикропроцессорных вычислительных систем, одноплатных микроЭВМ и др. К этим принципам относятся:

- Многоканальная обработка.
- Микропроцессорная и микроконтроллерная организация.
- Организация сетевого протокола обмена информацией по внешним каналам.
- Обеспечение независимости метрологических характеристик каналов измерения от внешних каналов обмена информацией.
- Структуризация вычислительного процесса, основанная на выделении проблемных, управляющих и коммуникационных процедур.
- Аппаратно-программная поддержка основных процедур.
- Конвейеризация и распараллеливание обработки информации в реальном масштабе времени.
- Модульная структура программных и аппаратных средств.
- Специализация модулей на реализацию процессов.
- Увеличение объема и глубины самоконтроля.

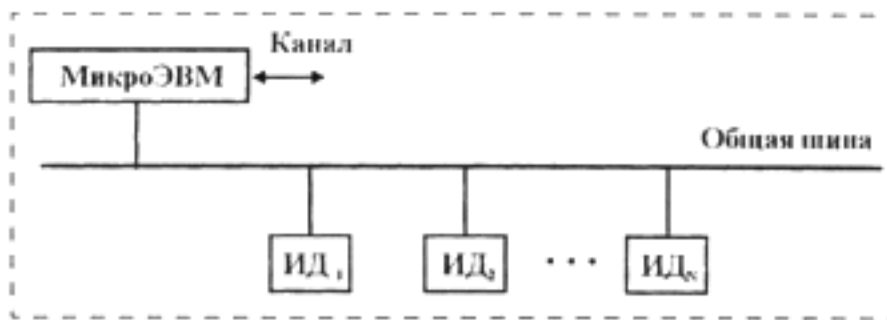


Рис. 2. Сетевая архитектура сетевой информационно-измерительной системы

- Программируемость архитектуры ИДИС.
- Многоуровневая адаптируемость к изменяемым требованиям благодаря возможности модернизации и развития прикладного и системного программного обеспечения, гибкого наращивания аппаратных средств, а также возможности модернизации аппаратных модулей и их замены более совершенными.

При этом архитектура РИИС представляется как проблемно-ориентированная многоканальная многофункциональная многомодульная многоконвейерная параллельная самоконтролируемая перепрограммируемая адаптируемая открытая система.

В качестве примера приведем простую распределенную информационно-измерительную систему, в которой измерение j переменных осуществляется интеллектуальными датчиками $ИД_j$ ($j = 1, 2, \dots, J$) (рис. 2). Информация о результатах измерений и их обработки пересылается в микроЭВМ по протоколам через сеть, построенную на основе общей шины. МикроЭВМ управляет процессом сбора данных, осуществляет дополнительную обработку и концентрирует результаты. При необходимости эти результаты считываются через сетевой канал в системы более высокого уровня, например, в систему диагностики объекта или в систему автоматизированного управления объектом.

Тенденции развития архитектуры информационно-измерительных систем:

- формирование архитектур систем в виде сетевых иерархических микрокомпьютерных объединений с распределенными базами данных и обработкой данных, считываемых с датчиков в реальном масштабе времени;
- расширение числа функций, реализуемых в системах;
- углубление и усложнение обработки считываемых с датчиков данных, направленные на увеличение информативности формируемых результатов при сокращении объемов хранения малоинформативных данных;
- развитие объемов числовой обработки данных на иерархических уровнях системы, в том числе на первом уровне, на котором реализуется предварительная обработка сигналов датчиков;
- организация сетевого протокола обмена данными по каналам обмена информацией;

- сокращение числа каналов передачи аналоговой информации в пользу цифровых каналов, обеспечивающее снижение чувствительности систем к внешним помехам;
- обеспечение независимости метрологических характеристик каналов измерения от внешних каналов обмена информацией;
- увеличение объема и глубины самоконтроля систем;
- рост степени защиты данных от несанкционированного доступа.

Приведенной архитектуре присущи все достоинства и недостатки сетевой организации. Из последних наиболее существенными являются значительные затраты времени и оборудования на организацию обмена информацией по каналам связи, что отрицательно сказывается на производительности и массогабаритных характеристиках РИИС.

Ослабить эти недостатки можно при построении РИИС в виде объединенных сетью многоканальных многофункциональных модульных информационно-измерительных систем (МИИС). На рис. 3 приведена ориентированная на измерения давления и температуры 12-канальная МИИС.

Основу обрабатывающей части МИИС составляют модифицированные интеллектуальные датчики, представленные в виде функционирующих параллельно модулей измерительных каналов $МИК_j$ ($j = 1, 2, \dots, 12$). В $МИК_j$ интерфейс сопряжения с внешним сетевым каналом заменен более простым интерфейсом сопряжения со скоростной шиной обмена.

Сигналы с чувствительных элементов поступают на модули измерительных каналов $МИК_j$ ($j = 1, 2, \dots, 12$), в которых усиливаются, нормируются, фильтруются, оцифровываются и обрабатываются. С выходов модулей $МИК_j$ обработанные значения сигналов через скоростную шину обмена считываются в модуль связи с сетевым каналом $МСК$, где концентрируются, оцениваются, компо-

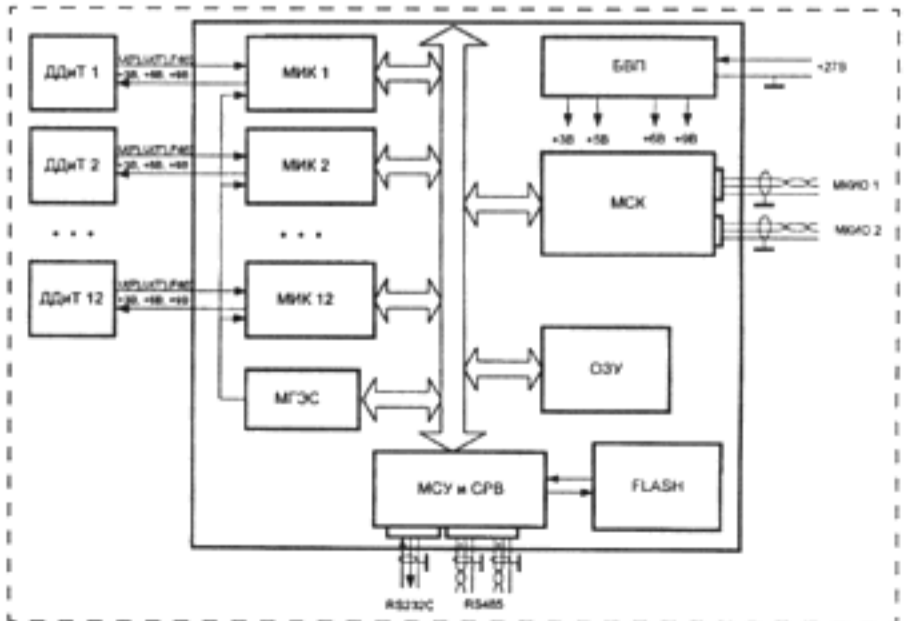


Рис. 3. Модульная информационно-измерительная система

ноются в сообщения. По мере необходимости сообщения через мультиплексные каналы информационного обмена *МКИО 1* и *МКИО 2* выдаются соответственно в систему управления и в диагностическую систему. Модуль системного управления и службы реального времени *МСУ* и *СРВ* обеспечивает управление измерителем в заданных режимах, в том числе вводом во *FLASH* и модульные программные запоминающие устройства программ обработки и данных для настройки модулей и конфигурирования системы. Оперативное запоминающее устройство используется в качестве буферного для поддержания высокого темпа обмена информацией в *МИИС*. Генерирование эталонных сигналов, необходимых для контроля состояния измерительных каналов и диагностики, осуществляется модулем *МГЭС*. Требуемые номиналы напряжений формируются в блоке внутреннего питания *БВП*.

Проблемная ориентация *МИИС* достигается на этапах системного и структурного проектирования в результате применения процессного и параметрического проектирования.

Особенности процессного проектирования заключаются в синтезе структуры *МИИС* и временных диаграмм ее работы в результате разработки схем инициирования и управления функционированием *МИИС* в основных режимах работы, в раз-

работке схем базовых процессов и объединений их в группы, реализуемые в модулях.

Особенности системного проектирования состоят в построении оптимизированной структуры многомодульной микропроцессорной *МИИС* в результате выбора численных методов и разработки машинных алгоритмов, оценки их параметров и уточнении типов и числа модулей исходя из сформированных требований.

В основу конструкции *МИИС* предлагается положить принципы комплексирования систем из модулей различных типов со стандартизированными межмодульными информационными и управляющими связями, развиваемости и адаптируемости модулей, возможности применения модулей без системных плат и с открытым рядом системных плат.

В заключение заметим, что если на современном этапе создания *РИИС* основной акцент делается на расширении их функциональных возможностей, то в недалеком будущем в их состав войдут средства искусственного интеллекта для поддержки решений в процессе оценок измеряемых переменных, контроля, формирования диагноза и т. д.

Список литературы

1. Шлетт М. Тенденции индустрии встроженных микропроцессоров // Открытые системы. 1998. № 6.
2. Локотков А. Устройства связи с объектом. Модули фирмы ADVANTECH // СТА. 1997. № 2.

РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—12, 2001 г., № 1—9, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Исследование нелинейных магнитоупругих эффектов в антиферромагнетиках

Номер проекта: 97-02-17586-а

Год предоставления отчета: 1997

При исследовании параметрического возбуждения фононов и магнонов СВЧ полем обнаружена исключительно важная роль резонатора в формировании основного состояния параметрического бозе конденсата. Взаимодействие электромагнитного поля в резонаторе с образцом приводит к появлению нового типа связанных фотон-фононных (или фотон-магнонных) колебаний. Исследован спектр связанных колебаний и их отклик на РЧ модуляцию спектра фононов. Для описания наблюдаемых явлений развит новый подход к теории параметриче-

ского резонанса, основанный на одномодовом представлении, в котором пара волн заменяется одним осциллятором, а классические комплексные амплитуды индивидуальных параметрических волн заменены на амплитуду этого осциллятора, имеющего частоту, равную накачке. Показано, что в системе (образец + резонатор + поле накачки) возникают новые нормальные моды, вместо прежних магнитоупругих (или спиновых) + резонаторных. Построенная теория удовлетворительно описала спектры связанных фотон-фононных колебаний, несимметрию Фурье спектра модуляционного отклика, нелинейное радиационное затухание фононов и магнонов, немонотонный характер излучения электромагнитных волн неравновесными фононными и магнонными парами. Обнаружен эффект фокусировки синхротронного излучения при дифракции на кристаллах слабых ферромагнетиков, в которых возбуждены магнитоакусти-

ноются в сообщения. По мере необходимости сообщения через мультиплексные каналы информационного обмена *МКИО 1* и *МКИО 2* выдаются соответственно в систему управления и в диагностическую систему. Модуль системного управления и службы реального времени *МСУ* и *СРВ* обеспечивает управление измерителем в заданных режимах, в том числе вводом во *FLASH* и модульные программные запоминающие устройства программ обработки и данных для настройки модулей и конфигурирования системы. Оперативное запоминающее устройство используется в качестве буферного для поддержания высокого темпа обмена информацией в *МИИС*. Генерирование эталонных сигналов, необходимых для контроля состояния измерительных каналов и диагностики, осуществляется модулем *МГЭС*. Требуемые номиналы напряжений формируются в блоке внутреннего питания *БВП*.

Проблемная ориентация *МИИС* достигается на этапах системного и структурного проектирования в результате применения процессного и параметрического проектирования.

Особенности процессного проектирования заключаются в синтезе структуры *МИИС* и временных диаграмм ее работы в результате разработки схем инициирования и управления функционированием *МИИС* в основных режимах работы, в раз-

работке схем базовых процессов и объединений их в группы, реализуемые в модулях.

Особенности системного проектирования состоят в построении оптимизированной структуры многомодульной микропроцессорной *МИИС* в результате выбора численных методов и разработки машинных алгоритмов, оценки их параметров и уточнении типов и числа модулей исходя из сформированных требований.

В основу конструкции *МИИС* предлагается положить принципы комплексирования систем из модулей различных типов со стандартизированными межмодульными информационными и управляющими связями, развиваемости и адаптируемости модулей, возможности применения модулей без системных плат и с открытым рядом системных плат.

В заключение заметим, что если на современном этапе создания *РИИС* основной акцент делается на расширении их функциональных возможностей, то в недалеком будущем в их состав войдут средства искусственного интеллекта для поддержки решений в процессе оценок измеряемых переменных, контроля, формирования диагноза и т. д.

Список литературы

1. Шлетт М. Тенденции индустрии встроженных микропроцессоров // Открытые системы. 1998. № 6.
2. Локотков А. Устройства связи с объектом. Модули фирмы ADVANTECH // СТА. 1997. № 2.

РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—12, 2001 г., № 1—9, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Исследование нелинейных магнитоупругих эффектов в антиферромагнетиках

Номер проекта: 97-02-17586-а

Год предоставления отчета: 1997

При исследовании параметрического возбуждения фононов и магнонов СВЧ полем обнаружена исключительно важная роль резонатора в формировании основного состояния параметрического бозе конденсата. Взаимодействие электромагнитного поля в резонаторе с образцом приводит к появлению нового типа связанных фотон-фононных (или фотон-магнонных) колебаний. Исследован спектр связанных колебаний и их отклик на РЧ модуляцию спектра фононов. Для описания наблюдаемых явлений развит новый подход к теории параметриче-

ского резонанса, основанный на одномодовом представлении, в котором пара волн заменяется одним осциллятором, а классические комплексные амплитуды индивидуальных параметрических волн заменены на амплитуду этого осциллятора, имеющего частоту, равную накачке. Показано, что в системе (образец + резонатор + поле накачки) возникают новые нормальные моды, вместо прежних магнитоупругих (или спиновых) + резонаторных. Построенная теория удовлетворительно описала спектры связанных фотон-фононных колебаний, несимметрию Фурье спектра модуляционного отклика, нелинейное радиационное затухание фононов и магнонов, немонотонный характер излучения электромагнитных волн неравновесными фононными и магнонными парами. Обнаружен эффект фокусировки синхротронного излучения при дифракции на кристаллах слабых ферромагнетиков, в которых возбуждены магнитоакусти-

ческие колебания. Эффект проявляется в том, что квазипараллельный пучок белого излучения после дифракции на колеблющемся кристалле фокусируется в систему линий, являющуюся изображением линий узлов стоячей волны. Предварительные эксперименты показывают, что обнаруженный эффект представляет интерес как с точки зрения рентгенооптических приложений, так и в качестве метода визуализации магнитоакустических колебаний и прецизионного измерения их амплитуды.

Влияние внутренних деформационных и электрических полей на электронную и фононную подсистемы в напряженных низкоразмерных полупроводниковых гетероструктурах

Номер проекта: 97-02-16721-а

Год предоставления отчета: 1997

Методами низкотемпературной оптической спектроскопии (фотолюминесценции, отражения, фотоотражения) проведено исследование напряженных структур, представляющих собой сверхрешетки и множественные квантовые ямы $\text{CdTe}/\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ с $x = 0,1+0,2$. Проведено сравнение экспериментальных энергий оптических переходов с теоретическими, вычисленными в рамках приближения огибающих волновых функций с учетом экситонных эффектов.

Показано, что ямы для легких и тяжелых дырок расположены в различных слоях — $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ и CdTe соответственно, что обусловлено малым скачком потенциала в валентной зоне ΔE_v этих материалов. Определено, что значение ΔE_v без учета напряжений составляет от 1 до 3 % в зависимости от разницы ширины запрещенных зон $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ и CdTe .

Исследованы температурные зависимости экситонной фотолюминесценции квантовых точек CdTe в матрице ZnTe . Показано, что возрастание ширины линии фотолюминесценции с ростом температуры обусловлено взаимодействием экситонов с LO фононами ZnTe .

Определена константа экситон-фононного взаимодействия и проведен качественный анализ ее величины. Показано, что температурный сдвиг линии соответствует $\Delta E_g(T)$ в ZnTe . Предложен возможный механизм гашения люминесценции при увеличении температуры.

Гигантское магнитосопротивление антиферромагнитно упорядоченных соединений и сплавов на основе редкоземельных и d-переходных металлов

Номер проекта: 97-02-16504-а

Год предоставления отчета: 1997

Для установления природы гигантского магниторезистивного эффекта в соединениях на основе FeRh и Mn_2Sb , обладающих слоистой магнитной структурой, проведено исследование влияния малых замещений железа и марганца другими d-элементами (Ni , Co) на величину коэффициента электронной теплоемкости и поведение электросопротивления. Получены данные, свидетельствующие о существенной перестройке электронной структуры соединений при изменении магнитного порядка, что обуславливает гигантские изменения электросопротивления. Построена магнитная фазовая диаграмма системы $(\text{Fe}, \text{Co})\text{Rh}$. Выявлено увеличение вклада в электросопротивление от рассеяния на спиновых флуктуациях при приближении к границе существования антиферромагнетизма. Проведено исследование аномалий различных физических свойств в области индуцируемых полем фазовых переходов в монокристаллах соединений RGe_2 ($\text{R} = \text{Er}$, Ho , Dy), R_3Co ($\text{R} = \text{Tb}$, Dy) и $(\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x)_3\text{Co}$. Построены магнитные фазовые диаграммы соединений Tb_3Co и $(\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x)_3\text{Co}$. С помощью измерений магнитосопротивления антиферромагнетика Gd_3Co выявлена анизотропия энергетической щели и зависимость ширины щели от температуры и концентрации иттрия.

Полевая эмиссия и свойства поверхности широкозонных полупроводников, алмазоподобных углеродных пленок и фуллеренов

Номер проекта: 97-02-18340-а

Год предоставления отчета: 1997

Была усовершенствована технология получения алмазоподобных пленок, позволяющая получать структуры с резко увеличенной однородностью микровыступов на поверхности. Пленки $\alpha\text{-C:H}$ осаждались на вольфрамовые подложки методом реактивного магнетронного распыления на постоянном токе графитовой мишени в аргоноводородной атмосфере (80 % $\text{Ar} + 20\% \text{H}_2$). Основными методами исследования топографии поверхности эмиссионных пленок являлись сканирующая электронная микроскопия (разрешение 4 нм), просвечивающая электронная микроскопия (0,3 нм) и атомно-силовая микроскопия сверхвысокого разрешения. Для случая алмазоподобных пленок определены геометрические и статистические параметры микровыступов на поверхности. Обнаружена полная корреляция между положением эмитирующих центров и микровыступов с наибольшим коэффициентом усиления поля. Было обнаружено, что фуллереновые структуры и нанотрубки, изготовленные с применением технологии дугового разряда, являются достаточно однородными с большим числом микроострий одинакового размера. При исследовании полевой эмиссии было обнаружено, что существуют вольтамперные характеристики двух типов. Первые имеют вид прямых в координатах Фаулера—Нордгейма, а вторые нелинейны и подобны ранее наблюдавшимся на высокоомных полупроводниках p- и n-типов. Проведены расчеты вида ВАХ с учетом того, что для эмиттеров малых размеров на толщине барьера поле не является постоянным. Показано, что для эмиттеров малого (1–10 нм) радиуса при той же напряженности поля плотность тока может измениться на 5–10 порядков. Предложена модель, объясняющая увеличение эмиссионной способности таких структур зарядкой глубоких ловушечных состояний и вызванной этим увеличением локальной напряженности поля у поверхности микровыступов. Проведены расчеты малосигнального импеданса Z при полевой эмиссии широкозонных полупроводников n-типа. Показано, что по зависимости Z от частоты можно исследовать в сильных полях такие важные временные характеристики, как среднее время нахождения электрона в приповерхностной области до акта эмиссии и время захвата электрона на поверхностные состояния.

Физика фазовых переходов и процессов поляризации в квазидвумерных и слоистых сегнетоэлектрических структурах

Номер проекта: 97-02-17822-а

Год предоставления отчета: 1997

Проведены работы по изучению физических процессов в квазидвумерных и слоистых сегнетоэлектрических структурах. Разработаны математические модели и программы компьютерного моделирования и численных расчетов физических процессов в квазидвумерных и слоистых сегнетоэлектрических структурах. Экспериментально исследованы электрофизические свойства структур на основе тонких сегнетоэлектрических пленок, получены новые данные по пьезоэлектрическому гистерезису и релаксационным процессам при переключении поляризации. Изучен процесс формирования золь-гель методом сегнетоэлектрических тонких пленок титаната бария—стронция. Впервые установлена взаимосвязь природы исходных полимерных продуктов в жидкой фазе с особенностями структуры формируемой пленки ксерогеля и ее дальнейшей трансформации в процессе кристаллизации. Установлены механизмы, определяющие кристаллическую структуру и электрофизические свойства пленок. Разработана методика формирования пленок слоистых перовскитов (танталат висмута—стронция) с пониженной температурой синтеза кристаллической фазы (температура снижена на 50–100 °C по сравнению с опубликованными в литературе данными), изучены электрофизические параметры структур металл—сегнетоэлектрик—металл.

УДК 621.3.049.77:006.03

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
А. Ю. Кузин, д-р техн. наук,
В. А. Телец, д-р техн. наук
Московский институт радиотехники,
электроники и автоматики
(технический университет)

О ТЕРМИНАХ В МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Приводятся термины для электронных датчиков и преобразователей физических величин — основных компонентов микросистемной техники.

Проектирование трехмерных микроэлектромеханических (МЭМС/МОЭМС) и микроробототехнических систем, разработка физических, химических и биологических чувствительных элементов и изделий микросистемной техники (микромашин, биочипы и др.) на основе микро- и нанотехнологий и молекулярной электроники привело к созданию разнообразных устройств, для описания которых нет единых терминов и определений. Было бы целесообразным использовать уже принятые и утвержденные термины в качестве базовых и в дальнейшем развивать работу в направлении создания терминов и тезауруса для микроэлектромеханических систем.

Ниже приводится перечень терминов и определений, которые рекомендуется применять при разработке чувствительных элементов с использованием микроэлектромеханики, составленный на основе действующих стандартов:

- ГОСТ 16263—70 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения.
- ГОСТ Р 51086—97 Датчики и преобразователи физических величин. Электронные. Термины и определения.

1. **Датчик:** Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем (по ГОСТ 16263).

2. **Преобразователь физической величины (ПФВ):** Устройство, предназначенное для восприятия и преобразования контролируемой физической величины в выходной сигнал.

Примечание. Преобразователь физической величины имеет точностные характеристики и не относится к средствам измерения.

3. **Электронный датчик [преобразователь физической величины]:** Датчик [преобразователь физической величины], выполненный на основе компонентов — изделий электронной техники.

4. **Вид электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Электронный датчик [преобразователь физической величины], предназначенный для из-

мерения [контроля] и преобразования конкретной физической величины.

5. **Совмещенный электронный датчик [преобразователь физической величины]:** Электронный датчик [преобразователь физической величины], предназначенный для измерения [контроля] и преобразования двух и более физических величин.

6. **Компонент электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Функциональная часть электронного датчика [преобразователя физической величины], предназначенная для реализации предписанной функции.

Примечание. Компонент электронного датчика [преобразователя физической величины] может быть выполнен как самостоятельное изделие, не являющееся средством измерения.

7. **Чувствительный элемент электронного датчика [преобразователя физической величины]; ЧЭ:** Функциональная часть электронного датчика [преобразователя физической величины], находящаяся под непосредственным воздействием физической величины.

8. **Преобразовательный элемент электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Функциональная часть электронного датчика [преобразователя физической величины], в которой происходит одно из ряда последовательных преобразований контролируемой физической величины.

9. **Измерительная электрическая цепь электронного датчика:** Электрическая цепь электронного датчика, осуществляющая измерительное преобразование и формирование выходного сигнала, а также коррекцию отдельных составляющих систематической погрешности электронного датчика.

10. **Информативный параметр входного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Параметр входного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины], функционально связанный с измеряемой [контролируемой] физической величиной.

11. **Информативный параметр выходного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Параметр выходного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины], функционально связанный с информативным параметром входного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины].

12. **Значение выходного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Оценка информативного параметра выходного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины], соответствующая значению измеряемой [контролируемой] физической величины.

13. **Время преобразования электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Интервал времени от момента начала изменения входного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины] до момента появления соответствующего выходного сигнала.

14. **Коэффициент преобразования электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Величина, характеризующая отношение параметров входного и выходного сигналов электронного датчика [преобразователя физической величины].

15. **Чувствительность электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Характеристика электронного датчика [преобразователя физической величины], определяемая отношением изменения выходного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины] к вызывающему его изменению измеряемой [контролируемой] физической величины.

16. **Абсолютная аддитивная чувствительность электронного датчика [преобразователя физической величины] к влияющей физической величине:** Чувствительность электронного датчика [преобразователя физической величины], определяемая отношением максимального изменения входного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины] при нулевом значении измеряемой [контролируемой] физической величины к изменению влияющей физической величины в пределах рабочей области значений.

17. **Относительная аддитивная чувствительность электронного датчика [преобразователя физической величины] к влияющей физической величине:** Чувствительность электронного датчика [преобразователя физической величины], определяемая отношением абсолютной аддитивной чувствительности датчика [преобразователя физической величины] к значению влияющей физической величины.

18. **Абсолютная мультипликативная чувствительность электронного датчика [преобразователя физической величины] к влияющей физической величине:** Чувствительность электронного датчика [преобразователя физической величины], определяемая отношением приращения коэффициента преобразования электронного датчика [преобразователя физической величины] к вызвавшему его приращению значению влияющей физической величины.

19. **Относительная мультипликативная чувствительность электронного датчика [преобразователя физической величины] к влияющей физической величине:** Чувствительность электронного датчика [преобразователя физической величины], определяемая отношением абсолютной мультипликативной чувствительности электронного датчика [преобразователя физической величины] к значению влияющей физической величины.

20. **Погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Характеристика электронного датчика [преобразователя физической величины], количественно выражающая отклонение номинального значения измеряемой [контролируемой] физической величины данным электронным датчиком [преобразователем физической величины] от ее истинного значения.

21. **Основная погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины], определяемая в нормальных условиях его применения.

22. **Статическая погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины] при измерении [контроле] постоянной физической величины в статическом режиме.

23. **Систематическая погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Составляющая погрешности электронного датчика [преобразователя физической величины], значение которой остается постоянным или закономерно изменяющимся при

повторных измерениях [контроле] и преобразовании физической величины.

24. **Случайная погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Составляющая погрешности электронного датчика [преобразователя физической величины], изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях [контроле] и преобразовании физической величины.

25. **Дополнительная погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Составляющая погрешности электронного датчика [преобразователя физической величины], возникающая вследствие отклонения какой-либо из влияющих физических величин от нормального значения или из-за выхода ее за пределы нормальной области значений.

26. **Погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины] в динамическом режиме:** Погрешность электронного датчика [преобразователя физической величины], используемого для контроля переменном во времени физической величины.

27. **Погрешность аппроксимации электронного датчика:** Погрешность, определяемая различием градуировочной характеристики электронного датчика и его номинальной функции преобразования.

28. **Погрешность линейности электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Погрешность аппроксимации при линейной функции преобразования электронного датчика [преобразователя физической величины].

29. **Погрешность воспроизводимости электронного датчика:** Погрешность электронного датчика, обусловленная рассеиванием реализации градуировочной характеристики.

30. **Погрешность средств градуировки электронного датчика:** Результирующее значение погрешности всех средств, используемых при воспроизведении измеряемого параметра и измерении выходного сигнала электронного датчика в процессе его градуировки.

31. **Частотный диапазон электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Диапазон частот, в котором обеспечивается заданная неравномерность амплитудно-частотной характеристики электронного датчика [преобразователя физической величины].

32. **Амплитудно-частотная характеристика электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Динамическая характеристика электронного датчика [преобразователя физической величины], представляющая собой зависимость амплитуды установившихся колебаний выходного сигнала от частоты входного сигнала.

33. **Переходная характеристика электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Динамическая характеристика электронного датчика [преобразователя физической величины], отражающая изменение во времени выходного сигнала при ступенчатом изменении входного сигнала.

34. **Импульсная переходная характеристика электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Переходная характеристика электронного датчика [преобразователя физической величины] при входном сигнале в виде единичного импульса.

35. **Функция преобразования электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Зависимость информативного параметра выходного сигнала элек-

тронного датчика [преобразователя физической величины] от информативного параметра его входного сигнала.

36. **Реальная функция преобразования электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Функция преобразования, отражающая зависимость выходного сигнала электронного датчика [преобразователя физической величины] от входного сигнала и влияющих физических величин.

37. **Математическая модель систематической погрешности электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Аналитическое выражение, определяющее зависимость разности реальной и номинальной функции преобразования электронного датчика [преобразователя физической величины] от значений измеряемой [контролируемой] физической величины и влияющих физических величин в рабочей области их значений.

38. **Математическая модель случайной погрешности электронного датчика [преобразователя физической величины]:** Аналитическое выражение, определяющее абсолютное или относительное значение случайной составляющей погрешности электронного датчика [преобразователя физической величины] или функции среднего квадратического отклонения реальной функции преобразования.

39. **Динамическая модель электронного датчика [преобразователя физической величины] по измеряемой [кон-**

тролируемой] физической величине: Математическая модель, описывающая электронный датчик [преобразователь физической величины] как динамическую систему в виде дифференциального уравнения, передаточной функции или характеристики, связывающей значения входного и выходного сигналов как функции времени.

40. **Динамическая модель электронного датчика [преобразователя физической величины] по влияющей физической величине:** Математическая модель, описывающая электронный датчик [преобразователь физической величины] как динамическую систему в виде дифференциального уравнения, передаточной функции или характеристики, связывающей значения влияющей физической величины и выходного сигнала как функции времени.

Примечание. Характеристики, приведенные в терминологических статьях 10—40, являются метрологическими характеристиками для электронных датчиков и точностными — для электронных преобразователей физических величин.

Наличие квадратных скобок в терминологической статье означает, что в нее включены два (три и т. д.) термина, имеющие общие термозадающие элементы.

Полужирным шрифтом набраны стандартизованные термины, светлым — их краткие формы, представленные аббревиатурой.

Уважаемые читатели, присылайте предложения для обсуждения терминов и определений в области микроэлектромеханических систем и микросистемной техники. Ждем ваши статьи и готовы их опубликовать в нашем журнале.

ВСЕ ТИПЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, УТВЕРЖДАЕМЫЕ ГОССТАНДАРТОМ РОССИИ



ОБЗОР И АНАЛИЗ РЫНКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРИБОРОВ

журнал
для специалистов,
работающих с измерительной техникой



РИА «СТАНДАРТЫ И КАЧЕСТВО»

Адрес: Ленинский просп., д. 9, Москва, В-49, ГСП-1, 119991 Тел.: (095) 236 4036, 236 8461

Факс: (095) 236 3238 E-mail: podpiska@stq.gost.ru Интернет-магазин: www.stq.ru

Перечень критических технологий РФ до 2010 года

Высокопроизводительные вычислительные системы; компьютерное моделирование; искусственный интеллект; информационно-телекоммуникационные системы; элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров; распознавание образцов и анализ изображений; опто-, радио- и акустоэлектроника, оптическая и сверхвысокочастотная связь; металлы и сплавы со специальными свойствами; синтетические сверхтвердые материалы; каталитические системы и технологии; материалы для микро- и наноэлектроники; мембранные технологии; обезвреживание техногенных сред; керамические и стекломатериалы; полимеры и композиты; технологии биоинженерии; генодиагностика и генотерапия; технологии иммунокоррекции; безопасность и контроль качества сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов; системы жизнеобеспечения и защиты человека; синтез лекарственных средств и пищевых добавок; биологические средства защиты растений и животных; производство и переработка сельскохозяйственного сырья; транспортные и судостроительные технологии освоения пространств и ресурсов Мирового океана; авиационная и ракетно-космическая техника; использование новых технических решений; безопасность движения, управление транспортом, интермодальные перевозки и логистические системы; технологии высокоточной навигации и управления движением; космические технологии; энергосберегающие технологии; поиск, добыча, переработка и трубопровод-

ный транспорт нефти и газа; безопасность атомной энергетики; обращение с радиоактивными отходами и облученным ядерным топливом; нетрадиционные возобновляемые источники энергии и новые методы ее преобразования и аккумулирования; добыча и переработка угля; производство электроэнергии и тепла на органическом топливе; снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф; мониторинг окружающей среды; прогнозирование биологических и минеральных ресурсов; природоохранные технологии, переработка и утилизация техногенных образований и отходов; переработка и воспроизводство лесных ресурсов; сохранение и восстановление нарушенных земель, ландшафтов и биоразнообразия; быстрое возведение и трансформация жилья; механотронные технологии; лазерные и электронно-ионно-плазменные технологии; оценка, комплексное освоение месторождений и глубокая переработка стратегически важного сырья; технологические совмещаемые модули для металлургических мини-производств; **микросистемная техника**; информационная интеграция и системная поддержка жизненного цикла продукции (CALS-технологии, CAD-CAM, CAE); прецизионные и нанометрические технологии обработки, сборки, контроля; технологии глубокой переработки отечественного сырья и материалов в легкой промышленности, технологии на основе сверхпроводимости; базовые и критические военные и специальные технологии.

По материалам "Основы политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу" // Понск. 2002. 19 апреля (№ 16).

CONTENTS

Alexandrov S. E., Akulshin Yu. D., Vasiliev V. K., Korotynsky A. V., Korshunov A. V., Pyatushev E. N., Timofeev S. S. MST and micropropulsion engines evolution . . . 3

A few of various types micropropulsion engines fabricated by microsystems technology are considered. Microengines projects cover wide front developments: from a cold gas engine to cooled bipropellant rocket engine, from superhigh-speed rotation gas turbine to solid propellant array "digital engine". Some MEMS power specific features and path of evolution are extracted.

Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Maltsev P. P., Mokrushin A. D., Mordkovich V. N., Omelianovskaya N. M., Pazhin D. M. Field Effect Hall Sensor based on "Silicon on Insulator" Structures 8

Discusses the main characteristics of new magnetosensitive element — field effect Hall sensor (FEHS), based on "Silicon on Insulator" structures. FEHS combines the properties of traditional MOS transistor and traditional Hall sensor. FEHS characterized by extremely wide dynamic range of magnetosensitivity (from 10^{-7} T to same T), high operating temperature (up to 300 °C), low power consumption (operating current not high then 0,4 mA), high irradiation stability, low noise level.

Verner V. D., Purchvanidze I. A. Microsystems: Problems and Solutions 13

Problems arising on the "life cycle on the ascending line" of micro system techniques (MST) development (what is most important stage of the process of microminiaturization of components and complete done devices in XXI century) are discussed.

Some of these problems are ambiguity of generality terminology; absence of generally accepted rules of standardization; difficulties related to organization of effective cooperation between producers of MST and consumers; necessity of technology assortment for mass production,

etc. Methods of solving such problems using abroad are discussed. Absence of purposeful propagation of MST in Russia is stressed.

Gornev E. S., Zajtsev N. A., Raviolov M. F., Romanov I. M. Modeling of Micromechanical Elements. Part I 18

Programs of different firms for modeling of micromechanical elements are described.

Examples of some elements modeling (torsional micromirror, deformed plate, comb finger, touch-down pressure sensor) are presented.

Fomin L. F. Propulsive Effect of Oscillations in Micromechanics 26

The self-propulsion of MEMS — Microelectromechanical Systems (microrobots) in the viscous incompressible fluid by the excitation of undulatory oscillations is investigated. Value of the propulsive force with which the elastic MEMS — microrobot oscillating at known frequency, amplitude and wave-length can be propelled in the viscous incompressible fluid using only the effect of viscous friction without taking into account effects of inertia is calculated.

Pjavchenko O. N., Panich A. E., Mokrov E. A. Principles of the Construction and Design of the Perspective Informational-Measuring Systems of Monitoring, Diagnosis and Control on the Base of the Intellectual Transmitters 30

The principles of the construction of the intellectual transmitters are considered. On their base the modern informational-measuring systems had been realized. The design of these systems is described.

Maltsev P. P., Kuzin A. Ju., Telets V. A. About Terms of Microsystems Engineering 35

The terms for electronics sensors are head of microsystems engineering.

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

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