

ОТЧЕТ О МЕЖДУНАРОДНОМ СИМПОЗИУМЕ "МИКРОРОБОТЫ, МИКРОМАШИНЫ И СИСТЕМЫ"

(Москва, 24-25 ноября 1999 г.)"

Симпозиум был организован Институтом проблем механики при поддержке Российской Академии наук, Министерства науки и технологий в рамках Международной Программы по перспективной робототехнике (IARP) и был включен в число международных мероприятий в честь 275-летнего юбилея Российской Академии Наук. Цель Симпозиума - объединение ученых и инженеров разных стран, выполняющих фундаментальные научные исследования и прикладные разработки в области микроэлектромеханических систем, микророботов и микромашин. Симпозиум в Москве был третьим в рамках IARP по данной тематике. Симпозиумы IARP имеют хорошую международную репутацию, в них участвовали ведущие специалисты из всех стран, в которых интенсивно разрабатываются и используются основные направления развития микросистемотехники.

Научная программа Симпозиума включала рассмотрение состояния и законченные результаты научных исследований, проводимых в крупнейших научных центрах мира, по следующим основным направлениям:

- достижения микромеханики для создания микросистем, микромашин и микророботов;
- микросенсоры, микродвигатели, микроуправление;
- интеграция электронных, электрических и механических компонентов – микроэлектромеханические системы;
- микросистемотехника и информационное взаимодействие микророботов с внешней средой;
- моделирование и управление движением;
- управление микроэлектромеханическими системами искусственного интеллекта;
- распределенное управление коллективами микророботов;
- микроакселерометры, микроги-

роскопы для транспортных средств, навигация мобильными микророботами и микромашинами;

- технология изготовления микроэлектромеханических систем;
- проблемы взаимодействия микророботов и машин с человеком;
- микрофабрики и микропроизводства;
- применение микроэлектромеханических систем в различных областях (медицине, биоинженерии, космосе, машиностроении, энергетике, мобильных системах и др.).

Научная программа Симпозиума охватывает практически все направления в области микромеханики, проектирования и динамики современных микророботов, микромашин и систем управления ими. Программа была составлена на основе строгого отбора присланных заявок, к которым прилагались полные тексты докладов. Такой отбор в известной мере гарантирует высокий научный уровень Симпозиума. Для выступления с обзорными докладами Программный комитет пригласил ведущих ученых по направлениям, охватываемым Программой.

Подобный Симпозиум по микросистемотехнике в России проводился впервые, что способствовало повышению статуса России как страны с мировым уровнем научных достижений в данной области и предоставлению дополнительных возможностей для участия в нем российских ученых. В России исследования в области микросистемотехники выполняются в лабораториях институтов РАН (Институт проблем механики, Институт ядерной физики, Институт молекулярной биологии, Физико-технический институт, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова), в лабораториях и научных центрах университетов (МГТУ им. Баумана, С.-Петербургский госу-

дарственный электротехнический университет, Таганрогский университет радиоинженеров, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, С.-Петербургский государственный университет, С.-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Московский авиационно-технологический институт), а также в Центральном научно-исследовательском институте "Электроприбор" (г. С.-Петербург), в Исследовательском центре суперкомпьютеров и нейрокомпьютеров (г. Таганрог), в НПК "Технологический центр" (г. Зеленоград), в МНТК "Робот", в Раменском конструкторском приборостроительном бюро (г. Раменское), в ГНЦ "Государственный оптический институт" (г. С.-Петербург), в ЦИАМ (г. Москва) и в других организациях.

В России исследования проводятся по наиболее актуальным направлениям мировой науки: по микромеханике движения микросистем; взаимодействию твердых тел с различными телами и веществами; упругой податливости; процессам перемещения в микромире: управлению движением микророботов и микромашин в различных средах (на земле, в воздухе, в космосе и под водой).

На торжественном открытии Симпозиума выступили: Вице-президент РАН академик В. Фортов. Председатель Научного Совета РАН по робототехнике и автоматизации академик И. Макаров, иностранный член РАН академик Г. Риззотто (Италия), профессора В. Люмельский (США), К. Тание (Япония), Ф. Бидо (Франция). В выступлениях отмечалась необходимость совместных работ и важность фундаментальных и прикладных исследований для мировой науки в области микросистемотехники, успехи которой будут в известной степени определять научно-технический прогресс и развитие человеческого общества в XXI веке.

Доклад академика Д. Климова о российской программе исследований и разработок до 2005 года по микророботам, микромашинам и системам вызвал значительный интерес, поскольку основные положения этой

программы были широко объявлены впервые. Основные принципы управления микроэлектромеханическими системами получили дальнейшее развитие в связи с разработкой теоретических аспектов интеллектуального управления сложными динамическими системами при их движении в автономных режимах в заранее неопределенных условиях окружающей среды, включая экстремальные ситуации, наличие препятствий, отсутствие априорной информации об изменении внешней обстановки. В связи с этим большое значение придается разработке новых алгоритмов и методов управления, обеспечивающих самостоятельное принятие простых решений о направлении и выборе параметров движения, обходе препятствий, идентификации других микрообъектов, находящихся в движении.

Новые алгоритмы управления многозвенными роботами, действующими в микромире, а также микроприводами и микромашинами (включая нечеткое управление, оптимальное, распределенное управление, управление коллективами роботов), проходя этапы компьютерного моделирования, начинают находить применение в микроэлектромеханических системах. Прежде всего это относится к применению микросистем в медицинской диагностике, навигации, сборке, точной механической обработке в машиностроении (докладчики: академик РАН Ф. Черноусько, академик РАН И. Макаров, профессора С. Манко, В. Градецкий, Г. Ризотто (Италия), Ж. Морель (Франция), С. Фахлбуш (Германия), С. Фатиков).

Развитие новых методов инерциального управления движением объектов с использованием миниатюрных акселерометров, гироскопов и микроэлектромеханических автоматических систем позволяет значительно повысить точность измерения параметров движения не только в космосе, воздухе и воде, но и наземных объектов, например автомобилей, в экспериментальных образцах которых предполагается применять до 40 микродатчиков. Миниатюризация инерциальных устройств, основанная на идеях микромеханики и микроуправления, имеет особое

значение, поскольку позволяет получить дешевые миниатюрные инерциальные системы массового использования, однако с несколькими худшими характеристиками, но достаточными для управления наземными объектами. В то же время приведенные параметры миниатюрных гироскопов, акселерометров и других инерциальных систем доказывают эффективность решения задач стабилизации, навигации, управления движением широкого класса объектов на основе перспективных миниатюрных электромеханических технических средств, в том числе микрокомпьютеров и микросистем, что обеспечивает достаточную точность позиционирования, выполнение сложных маневров, формирование траектории движения в реальном времени, а также распространение предлагаемых методов на такие объекты массового применения, как автомобили (доклады профессоров А. Шкеля, В. Люмельского (США), В. Будкина, С. Прозорова, В. Вернера (Россия), С. Хенейна (Швейцария)).

Разработка и применение миниатюрных оптических датчиков и исследование взаимодействия человека и миниатюрных роботов в процессе их совместного выполнения поставленных задач можно считать одним из приоритетных направлений развития микросистемотехники в мире. Развитие концепции программного интерфейса между человеком, роботом и технологическим инструментом - машиной, на основе интеллектуальной информационной системы и решение задач взаимодействия между естественным интеллектом человека-оператора и элементами искусственного интеллекта робота, направленными на автоматическое принятие решений, позволяет создавать новые мобильные управляемые системы в медицине, транспортном машиностроении, аэрокосмической технике, ядерной технике, энергетике и в других сферах человеческой деятельности (доклады профессора Ф. Бидо (Франция), С. Петухова, Л. Кравчука, В. Вешникова, Т. Тулайковой (Россия)).

Дальнейшее развитие идей интеллектуального интерфейса нашло отражение в докладе профес-

сора С. Крери (США), предложившего новое направление исследований в области интеграции техники микросистем и биологии, названное автором "биоботикой". Представленные решения доказываются экспериментальными исследованиями по управлению поведению насекомых с помощью вшитых электронных микрочипов с микродатчиками в определенные места тела насекомого. Посредством подобного интерфейса поведение насекомых подчинено воле человека-оператора, управляющего их движением не только по плоскости, но и в пространстве.

Заслуживают внимания обобщающие доклады, в которых представлены достижения некоторых ведущих лабораторий мира. Так, в докладе профессора В. Люмельского (США) нашли отражение исследования и разработки микророботов и микромашин в США

Полученные результаты исследований в области микроманипуляторов в Японии в лаборатории инженерной механики г. Цукуба были представлены профессором К. Тани, а технология микросборки в микропроизводствах анализировалась в докладе К. Оники (Центр микромашин, г. Токио). Достижения по разработкам микропроизводств и микроманипуляционных систем, полученные в Институте робототехнических систем и в Швейцарии в Федеральном институте технологий в Лозанне, содержались в совместных докладах коллектива авторов (профессор Ж.-М. Бреге, Х. Блеилер, Х. Ланген, Р. Клавель).

В докладе Р. Фантони (Италия) была изложена программа исследований в области микроробототехники и микротехнологий, которая выполняется итальянской фирмой ENEA.

В докладах французских ученых нашел отражение спектр исследований и разработок в области моделирования, разработки систем управления на основе миниатюрных телекамер и сплавов с памятью формы, а также применений микросистем в основном в медицине для создания миниатюрных эндоскопов, в том числе с использованием миниатюрного оптоволоконного кабеля (Ф. Бидо, Ж. Морель).

Большое внимание и интерес вызвали проблемы, связанные с использованием различных технологий производства изделий и компонентов микросистемотехники (доклады профессора В. Лучинина, А. Васильева, А. Корлякова, В. Вернер, Н. Шелепина (Россия)). Если традиционная LIGA-технология является основной в США и в Европе, то в Японии находят применение электроискровая и лазерная технологии изготовления микрокомпонентов, по точности не уступающие другим технологическим методам. Получила широкое развитие кремниевая технология изготовления микродатчиков и других компонентов.

Разработанная в России новая технология изготовления микросистем, в основе которой лежит технология производства оптических волокон, доказала свои широкие возможности для формообразования деталей в объеме или в трехмерном 3D-пространстве. По этой технологии были изготовлены электромагнитные микродвигатели, разработанные и предложенные МНТК "Робот" (доклад канд. техн. наук В. Степанова, С. Суховеева).

Определенный интерес и одобрение участников симпозиума вызвали все отобранные и представленные российскими учеными доклады, о чем свидетельствуют проведенные дискуссии на заседаниях секций и дискуссия круглого стола. В свободной дискуссии за круглым столом приняли участие профессора В. Люмельский (США), К. Тание (Япония), С. Крери (США), Х. Блеуер (Швейцария), В. Градецкий (Россия), В. Раковский (Россия) и другие участники симпозиума. Основная тема дискуссии - международное сотрудничество и кооперация ученых, занимающихся исследованиями и разработкой в области микросистемотехники.

В дискуссии отмечалась необходимость выполнения совместных международных проектов по таким направлениям микросистемотехники, как мобильные микророботы, биоботаника, микропроизводства, микродатчики и микроактюаторы,

интеллектуальные микросистемы, микроуправление, усовершенствование технологических приемов изготовления и организация совместных производств. Отмечалась важность совместных проектов по таким направлениям микромеханики, как взаимодействие твердых тел с различными средами в микромире (вода, газы, упругие вещества), исследование действия сил и моментов, а также изучение методов движения в микромеханике, в особенности действие упругих систем. Отмечалось, что динамика микромира изучена недостаточно и крайне необходимы исследования динамических процессов в микросистемах. Подчеркивалась важность исследования проблем надежности, точности, устойчивости в микросистемах. При обсуждении организационных аспектов сотрудничества отмечались бюрократические трудности, связанные с окончательным принятием решений администрациями. В то же время определялась возможность совместных проектов в рамках National Science Foundation, INTAS, EUREKA, выполнение проектов на двусторонней основе, взаимные стажировки специалистов в научные и учебные центры разных стран.

Наиболее актуальными проблемами с позиций мировой науки можно считать исследования по интеллектуальной микроробототехнике и автоматизации, мобильным микросистемам и микромашинам, в том числе для использования в медицине, биотехнологии, космосе, машиностроении, энергетике. Среди новых инерциальных технологий и методов управления движением наиболее актуальны распределенное управление коллективами микророботов, управление на основе нечеткой логики и нейросетей в микромире, управление упругоподатливыми микросистемами, декомпозиционное управление на основе интеграции датчиков, траекторное и оптимальное управление мобильными машинами, управление с элементами искусственного интеллекта, автоматическое принятие решений на основе нечеткой логики, способы взаимодействия человека с микросистемами и интерфейсы.

Степень влияния российских ученых на решение наиболее актуальных с позиций мировой науки проблем в области микросистемотехники достаточно велика, особенно по результатам фундаментальных исследований в области микромеханики и систем микроуправления роботами, интеллектуальной автоматизации, инерциальной технологии, распределенного и декомпозиционного управления, технологии микросистем. По этим направлениям достижения российских ученых в ряде случаев опережают зарубежные. Реализация идей фундаментальной науки российских ученых все более отстает от использования в прикладных исследованиях от зарубежных. Об этом достаточно ярко свидетельствовали доклады японских ученых на конференции, представивших результаты их национальных программ. Ряд задач, решенных российскими учеными, мог бы найти применение в совместных с зарубежными учеными проектах, о чем велись консультации на конференции. Было принято решение продолжить проведение симпозиумов в 2000-2001 годах.

Доклады вызвали значительный интерес у участников семинара. На заседаниях было задано много вопросов, а детали выступлений обсуждались в перерывах. Небольшой фотоотчет о работе семинара представлен на 2-й странице обложки.

Всем докладчикам были вручены сборник докладов, подготовленный Институтом проблем механики РАН, и первый номер нового журнала "Микросистемная техника" (№ 1, 1999 г.). Учитывая, что тексты докладов были представлены на английском языке, редакция журнала обратилась к некоторым российским участникам Симпозиума с просьбой предоставить материалы на русском языке и в настоящем номере опубликовать статьи по тематике, относящейся к микросистемной технике.

*Член редакционной коллегии журнала "Микросистемная техника",
зав. лабораторией Института
проблем механики РАН, г. Москва,
д-р техн. наук проф.
В.Г. Градецкий*

УДК 621.3.049.77.002.5

В.И. Белоглазов, директор филиала ИРОС, Саратов,
С.П. Суховеев, канд. техн. наук, МНТК - РОБОТ,
 Москва,
Н.В. Суетин, д-р физ.-мат. наук, НИИЯФ МГУ

СОЗДАНИЕ МИКРОННЫХ И СУБМИКРОННЫХ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕКЛОВОЛОКОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Предложен и реализован новый метод создания трехмерных микроэлектромеханических систем. Основой этого метода являются технологии получения и обработки стекловолокна и стекловолоконных систем. Продемонстрирована возможность получения недорогих микронных и субмикронных стеклянных структур с практически не ограниченным аспектным отношением. Получены как чисто стеклянные, так и стеклянно-металлические субмикронные системы.

Рассмотрены наиболее перспективные направления в использовании предложенной технологии, в частности для микророботов и микроприводов.

1. Введение

Подавляющее большинство современных методов промышленного производства изделий микроэлектроники и микромеханики основаны на планарных технологиях. В этих технологиях тот или иной рисунок первоначально формируется в специальном резисте, нанесенном на плоскую поверхность обрабатываемого материала, с помощью различных литографических методов, а затем эта поверхность вытравливается на заданную глубину с использованием определенных технологий за счет разности скоростей травления двух материалов (например, модифицированной и немодифицированной части резиста или резиста и обрабатываемой поверхности).

Одной из основных проблем планарной технологии является создание высокоанизотропных трехмерных структур, т.е. структур, у которых высота существенно превышает другие размеры. Для решения этой проблемы развиваются методы высокоанизотропного травления с использованием новейших достижений плазменной микротехнологии на базе плазмы индукционно-связанного разряда, разряда в условиях электронно-циклотронного резонанса или геликонного разряда.

Еще одно из направлений в технологии создания высокоанизотропных структур - это так называемая LIGA - технология, в которой используется высококонтрастная рентгеновская литография в пучках синхрон-

ного излучения и электрохимическое осаждение металла [1]. Однако достижение коэффициента анизотропии (т.е. отношения глубины травления к ширине) большего 100 представляет серьезную проблему. Кроме того, все эти технологии весьма дороги, а при дальнейшем развитии их стоимость может стать основным препятствием для широкого внедрения новых изделий.

Вместе с тем, уже сейчас существует достаточно острая практическая потребность в определенном виде микроструктурах, имеющих микронную и субмикронную топологию и высоту рельефа от сотен микрометров до миллиметров и даже метра. В качестве примера можно привести элементы для транспортировки и фокусирования вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучений. Эти элементы, как правило, состоят из микрокапиллярных волокон с диаметром капилляра от 200 нм до 300 мкм и шероховатостью внутренней стенки капилляра не более 10 нм. Другим примером могут служить различные микромеханизмы, микродозаторы жидкостей и газов, микроприводы. Часть этих изделий может быть изготовлена и с помощью LIGA-технологии, однако при этом их стоимость пока неприемлема для массового потребителя.

В качестве альтернативы планарной технологии может рассматриваться метод непосредственного создания трехмерных структур с использованием стекловолоконных технологий (СВТ) [2, 4]. Подобные методы уже применялись ранее для создания микроканальных и наноканальных пластин, стекловолокон и рентгеношаблонов [3, 5].

В данной работе представлены результаты дальнейшего развития стекловолоконной технологии с целью ее использования для создания микроэлектронных и микромеханических элементов. Для лучшего понимания предлагаемого метода во второй части статьи изложены основные методы стекловолоконной технологии, используемые нами для создания микроструктур, а в третьей - представлены некоторые результаты, полученные с помощью описанной технологии. В заключение обсуждены возможные применения полученных результатов, оценена перспектива дальнейшего развития этого метода, приведено его сравнение с другими.

2. Основные принципы стекловолоконной технологии

Основной, ключевой операцией стекловолоконного производства является перетягивание при определенной температуре стеклянной заготовки с пропорциональным уменьшением поперечных размеров. Если заготовка сформирована в определенную структуру из нескольких сортов стекла или каких-либо других материалов с близкой температурой размягчения, то поперечные линейные размеры этой структуры уменьшаются с сохранением геометрического подобия, а их соотношение не изменится. Эта процедура может быть повторена многократно до достижения необходимых линейных размеров. После перетяжки заготовка режется на элементы требуемой длины, которые при необходимости полируются. Длина таких элементов может варьироваться от десятков микрометров до нескольких метров.

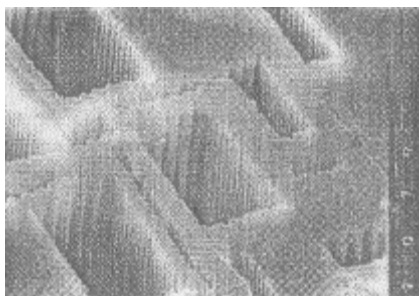


Рис. 1

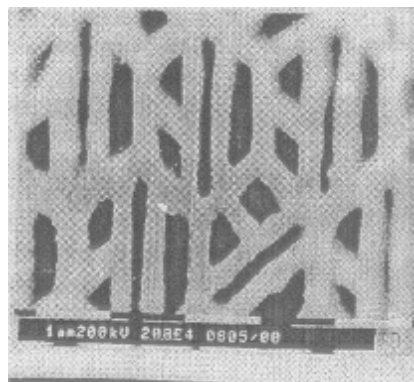


Рис. 2

В случае, если различные участки этой структуры имеют существенно различную скорость химического, электрохимического или любого другого воздействия, то возможно селективное удаление тех или иных элементов структуры. При этом могут быть сформированы как полости и отверстия внутри структуры, так и ее внешняя геометрия. Полученные отверстия могут быть заполнены материалами с различными свойствами, например металлами.

Наиболее просто этот принцип может быть продемонстрирован на примере двух видов стекла, имеющих различную растворимость, например, в соляной кислоте. Для создания тест-структур мы использовали в качестве растворимого стекло X230 с высоким содержанием B_2O_3 (57,8 %), а в качестве нерастворимого электровакуумное стекло С87-2. Элемент структуры, полученный после выполнения всех операций и растворения, представлен на рис. 1. Характерный размер отверстий на этом образце порядка 0,5 мкм (ширина наиболее узкой щели). На фотографии видна тонкая структура волокон нерастворимого стекла, из которых в данном случае сформирована вся структура. Очевидно, что данное разрешение далеко от предельного. На рис. 2 представлена другая тест-структура, изготовленная аналогичным методом, с характерным масштабом отверстий порядка 0,2 мкм, что тоже не является пределом. Подобную технологию [5] использовали для получения многоканальной матрицы идентичных круглых отверстий с диаметром порядка 30 нм. Отметим, что наша методика позволяет получать структуры с отверстиями произвольной формы, в том числе с существенно различными поперечными размерами.

Такого рода структуры уже сами по себе могут использоваться в качестве элементов рентгеновской и вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) оптики, таких элементов микромеханики, как рентгеновские маски, фильтры тонкой очистки и т.п. Одно из перспективных направлений — использование таких элементов как матриц для создания различного рода квантово-размерных полупроводниковых и проводящих структур. При столь высоком аспектном соотношении возникает проблема заполнения отверстий. В случае использова-

ния легкоплавких металлов и сплавов эта проблема решается включением металлической структуры непосредственно в заготавливаемые полые стеклянные волокна, из которых формируют требуемую структуру. В качестве проводника могут быть также использованы проводящие стекла, полимеры и электролиты. Основное требование эти материалы должны иметь температуру размягчения или плавления близкую или меньшую, чем температура размягчения стекла. В экспериментах мы, в основном, использовали PbSn-сплавы.

Реально, нами получены структуры с размером порядка 100 нм. В результате многократного перетягивания удалось добиться практически "растворения" металла, что привело к уменьшению объемного сопротивления стекла на два порядка.

3. Экспериментальные результаты

Разработанная методика была использована для создания реальных микроэлектронных и микромеханических элементов. В отличие от микроканальных пластин изделия микромеханики имеют весьма сложную структуру, состоящую из отверстий и поверхностей различной конфигурации и размеров, а также упругих элементов в виде балок, мембран, пружин. Поэтому выбор материала и геометрии волокон, а также сам процесс перетягивания заготовки для каждого изделия является новым. В результате проведенных работ были созданы рентгеновский шаблон, наборы микроконсоль с плотностью миллион штук на квадратном сантиметре и характерным поперечным размером 7 мкм, заготовки статоров электромагнитных микродвигателей с внешним диаметром 160 мкм, микрокатушек индуктивности с шириной витка 7 мкм. Особо следует отметить возможность изготовления деталей с винтообразными поверхностями, для чего используется скручивание вытянутой стеклозаготовки вокруг оси. Такие поверхности характерны для микровинтов, шнеков, червячных и косозубчатых колес и не могут быть изготовлены с помощью ни одной из известных технологий.

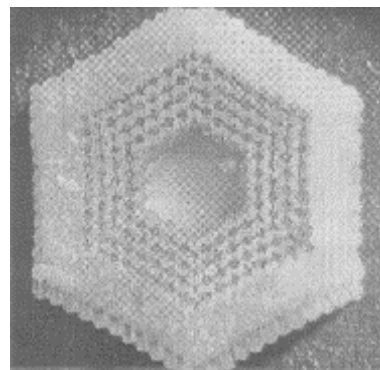


Рис.3

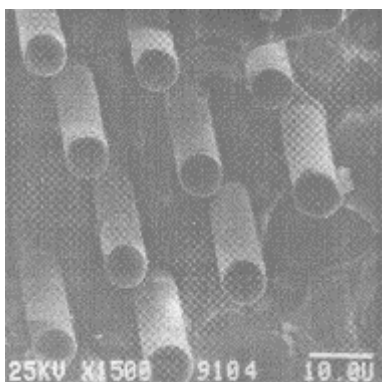


Рис.4

Опишем более детально процедуры изготовления некоторых компонентов, например, микроструктур катушек индуктивности. Было произведено шесть вытяжек. Из расплавов стекла С87-2 и стекла Х230 сначала были изготовлены волокна диаметром 2 мм (не менее 500 штук волокон из каждого сорта стекла). Полученные заготовки были забракованы и уложены в пакеты шестигранной формы (по 397 штук в каждом). Затем пакеты были спечены и перетянуты в шестигранные стержни с максимальным поперечным размером 0,6 мм. Стержни были уложены в новый пакет таким образом, что растворимые стержни образовывали требуемую топологию обмотки катушки. После спекания и перетягивания полученного пакета до поперечного размера 2,7 мм он был разрезан на заготовки длиной в несколько сантиметров, в которых затем химически было вытравлено растворимое стекло. Полученные полости были вакуумированы и заполнены припоем ПОС-30. После этого была проведена окончательная групповая перетяжка (в количестве 37 шт.) этих пакетов, плотно упакованных в пучок. Полученные заготовки катушек имели поперечный размер до 50 мкм. Они были разрезаны и отполированы до продольного размера (высота катушек) 300-500 мкм. Типичная фотография такой катушки представлена на рис. 3. В настоящее время удалось изготовить катушки с шагом витков порядка 20 мкм при толщине витка 7-8 мкм и его высоте

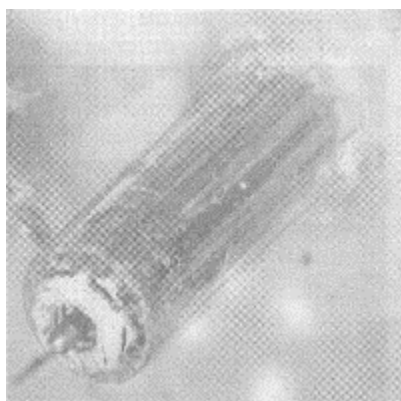


Рис. 5

300 мкм. Размер центрального отверстия катушки составляет до половины внешнего поперечного размера. Это отверстие может быть использовано для размещения в нем ферромагнитного сердечника при создании микроэлектромагнитных систем.

Подобная технология с использованием тех же сортов стекла была применена для создания наборов микроконсоль. Фотография такого набора представлена на рис. 4. В качестве механического упругого элемента стеклянные микроконсоли такого профиля не вполне пригодны. Однако СВТ позволяет изготавливать микроконсоли любого профиля, в том числе и с металлической арматурой внутри.

Другим примером изделия, полученного с использованием СВТ, является созданный нами синхронный микродвигатель с двухполюсным ротором из NdFeB. Цилиндрический статор изготовлен по СВТ и содержит 12 отверстий, заполненных PbSn, которые являются активными частями обмоток статора. Статор двигателя имеет внешний диаметр 1 мм и длину 2 мм. Диаметр отверстия под ротор составляет примерно половину внешнего диаметра статора. Сопротивление обмоток по постоянному току составляет при этом не более 0,1 Ом. Разрушение обмоток имеет место при токе в 5,5 А (250 А/мм²). В номинальном режиме (без заметного нагрева) амплитуда питающего переменного тока в обмотках не превышала 1,5 А. Минимальный рабочий зазор между статором и ротором составляет 10 мкм. При этом расчетный момент на валу ротора составлял 10⁻⁴ Н·мм (0,01 гс·мм). Общий вид микродвигателя представлен на рис. 5.

Втулки подшипников скольжения вала ротора также были изготовлены по СВТ. Созданные нами микродвигатели уверенно работали с частотой вращения до 3000 об/мин при наличии подшипников и до 30 000 об/мин без них.

Характерная скорость процессов вытягивания стекла составляет до 0,5 м/мин, что позволяет использовать предложенный метод для массового производства микрокомпонентов

Рассмотренная в работе технология, как и традиционная планарная, может быть отнесена к групповой технологии. Действительно, если в современной микроэлектронной технологии однотипные изделия изготавливаются одновременно в рамках одной пластины, то в СВТ - в составе одного пучка. При этом

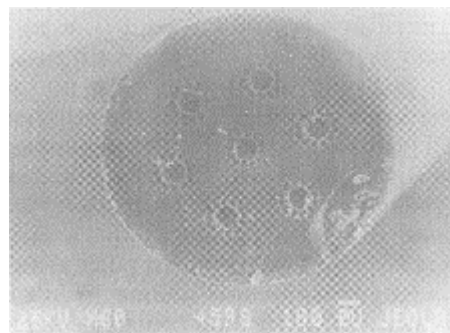


Рис. 6

число изделий в сечении пучка, при необходимости разнотипных, может быть достаточно большим. Рис. 6 демонстрирует вариант одновременного изготовления семи заготовок статора микродвигателя с диаметром каждого около 160 мкм. Таким образом, СВТ является дважды групповой.

4. Заключение

Таким образом, разработан и реализован новый метод создания сложных высокоанизотропных микро- и наноструктур из стекла и других аморфных материалов.

Исходя из продемонстрированных в настоящей работе результатов, можно в общих чертах описать наиболее очевидные области применения разработанной нами технологии:

■ микромеханические и электрические компоненты и устройства:

- микродвигатели, микроконсоли, микромаховики, микротурбины, шнеки;
- микроэлектронные компоненты (емкости, индуктивности);
- компоненты вакуумной электроники (автоэлектронные эмиттеры, триоды, матрицы и т.д.);
- микродетали, в том числе с винтообразной поверхностью.

■ оптические микрокомпоненты:

- цилиндрические и конические трубки прецизионной точности для устройств микрооптики, в том числе и рентгеновской;
- дифракционные решетки с субмикронным шагом на внешней или внутренней поверхности детали;
- мультиканальные эластичные кабели для транспортировки вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучений.

Близкие по анизотропии структуры получают при создании пористых наноструктур, например пористого кремния [6] или анодированного алюминия [7]. Однако эти структуры являются спонтанными, т.е. не вполне регулярными, кроме того, они имеют одну и ту же форму (как правило, в виде круглых отверстий) и не вполне однородны по глубине. Поэтому дальнейшее развитие СВТ может иметь большое значение как для развития фундаментальных исследований, так и для практических целей.

Список литературы

1. Ehrfeld W., Lehr H. Radiat. Phys. Chem., 1995, v. 45, n. 4. P. 349-365.
2. Белоглазый В.И., Суховеев С.П. Патент РФ. № 2085523, 1995.
3. Jansen K. US Patent'. N 5173097. 1992.
4. Soukhovееv S.P., Stepanov V.V., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Stcherbakov A.V., Suetin N.V. Int. Workshop on Micro Robots, Micro Machines, and Systems. Moscow, Russia. 24-25 November 1999. p. 185.
5. Tonucci R.J., Justus B.L., Campillo A.J., Ford C.E. Nanochannel Array Glass // Science, 1992, v. 258. P. 783-785.
6. Lehman V., Griming U. The limits of macropore array fabrication // Thin Solid Films, 1997, v. 297. P. 13-17.
7. Thompson G.E. Porous anodic alumina: fabrication, characterization and applications // Thin Solid Films, 1997, v. 297. P. 192-201.

УДК 621.3049.77 002.56

В.А. Колясников, канд. техн. наук, **Т.Я. Рахимбабаев**, РНЦ "Курчатовский институт", Курчатовский источник синхротронного излучения

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Кратко описывается одно из направлений микро-технологии – LIGA-технология, физико-технологические вопросы, требующие понимания и разрешения, примеры изделий и области применения процесса.

В последние десятилетия вслед за интегральными схемами в сферу микротехнологии были вовлечены также устройства, задача которых – воспринимать свойства окружения, выполнять перемещения в микро-масштабе, манипулировать жидкостями, газами, световыми потоками. Новые компоненты – микроэлектромеханические системы (МЭМС) – недорогие, надежные, миниатюрные – позволили значительно увеличить быстродействие, точность и производительность таких устройств, как имплантируемые медицинские приборы, микрожидкостные аналитические системы, микрореакторы для биохимических исследований, оптоволоконные линии связи, целый ряд приборов – от струйных принтеров до топливных инжекторов.

Первыми эту сферу начали осваивать производители кремниевых интегральных схем, расширяя спектр приборов от традиционно двумерных до объемных микроструктур. Задача увеличить объем устройств с сохранением в плане деталей микронных размеров привела в 70-х годах специалистов из Исследовательского Центра в Карлсруэ к разработке технологического подхода, обозначенного немецкой аббревиатурой LIGA, т.е. литография (глубокая рентгеновская), гальваника и формовка (Abformung). Преимущества его в многообразии геометрии, материалов (металлы, пластики, керамика), низкой стоимости изготовления, возможности формирования микроструктур с размерами порядка микрометров в плане и отношением вертикальных и горизонтальных размеров в несколько сотен (аспектное отношение).

Диаграмма (рис. 1) представляет основные этапы LIGA-технологии. Специфика LIGA-процесса заключается в применении микроформ, с помощью которых микрорельеф последовательно повторяется в разных материалах. Первая из них образуется областями полиметилметакрилата (ПММА), защищенными при экспонировании через маску. Гальваническое наращивание никеля до толщины, большей, чем высота микрорельефа, образует прочную металлическую форму, с помощью которой конфигурация многократно воспроизводится литьем или штамповкой пластика, или формовкой сырой керамической массы с последующим отжигом.

Синхротронное излучение (СИ) испускается в виде непрерывного спектра от инфракрасного до жесткого

число изделий в сечении пучка, при необходимости разнотипных, может быть достаточно большим. Рис. 6 демонстрирует вариант одновременного изготовления семи заготовок статора микродвигателя с диаметром каждого около 160 мкм. Таким образом, СВТ является дважды групповой.

4. Заключение

Таким образом, разработан и реализован новый метод создания сложных высокоанизотропных микро- и наноструктур из стекла и других аморфных материалов.

Исходя из продемонстрированных в настоящей работе результатов, можно в общих чертах описать наиболее очевидные области применения разработанной нами технологии:

■ микромеханические и электрические компоненты и устройства:

- микродвигатели, микроконсоли, микромаховики, микротурбины, шнеки;
- микроэлектронные компоненты (емкости, индуктивности);
- компоненты вакуумной электроники (автоэлектронные эмиттеры, триоды, матрицы и т.д.);
- микродетали, в том числе с винтообразной поверхностью.

■ оптические микрокомпоненты:

- цилиндрические и конические трубки прецизионной точности для устройств микрооптики, в том числе и рентгеновской;
- дифракционные решетки с субмикронным шагом на внешней или внутренней поверхности детали;
- мультиканальные эластичные кабели для транспортировки вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучений.

Близкие по анизотропии структуры получают при создании пористых наноструктур, например пористого кремния [6] или анодированного алюминия [7]. Однако эти структуры являются спонтанными, т.е. не вполне регулярными, кроме того, они имеют одну и ту же форму (как правило, в виде круглых отверстий) и не вполне однородны по глубине. Поэтому дальнейшее развитие СВТ может иметь большое значение как для развития фундаментальных исследований, так и для практических целей.

Список литературы

1. Ehrfeld W., Lehr H. Radiat. Phys. Chem., 1995, v. 45, n. 4. P. 349-365.
2. Белоглазый В.И., Суховеев С.П. Патент РФ. № 2085523, 1995.
3. Jansen K. US Patent'. N 5173097. 1992.
4. Soukhovееv S.P., Stepanov V.V., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Stcherbakov A.V., Suetin N.V. Int. Workshop on Micro Robots, Micro Machines, and Systems. Moscow, Russia. 24-25 November 1999. p. 185.
5. Tonucci R.J., Justus B.L., Campillo A.J., Ford C.E. Nanochannel Array Glass // Science, 1992, v. 258. P. 783-785.
6. Lehman V., Griming U. The limits of macropore array fabrication // Thin Solid Films, 1997, v. 297. P. 13-17.
7. Thompson G.E. Porous anodic alumina: fabrication, characterization and applications // Thin Solid Films, 1997, v. 297. P. 192-201.

УДК 621.3049.77 002.56

В.А. Колясников, канд. техн. наук, **Т.Я. Рахимбабаев**, РНЦ "Курчатовский институт", Курчатовский источник синхротронного излучения

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Кратко описывается одно из направлений микро-технологии – LIGA-технология, физико-технологические вопросы, требующие понимания и разрешения, примеры изделий и области применения процесса.

В последние десятилетия вслед за интегральными схемами в сферу микротехнологии были вовлечены также устройства, задача которых – воспринимать свойства окружения, выполнять перемещения в микро-масштабе, манипулировать жидкостями, газами, световыми потоками. Новые компоненты – микроэлектромеханические системы (МЭМС) – недорогие, надежные, миниатюрные – позволили значительно увеличить быстродействие, точность и производительность таких устройств, как имплантируемые медицинские приборы, микрожидкостные аналитические системы, микрореакторы для биохимических исследований, оптоволоконные линии связи, целый ряд приборов – от струйных принтеров до топливных инжекторов.

Первыми эту сферу начали осваивать производители кремниевых интегральных схем, расширяя спектр приборов от традиционно двумерных до объемных микроструктур. Задача увеличить объем устройств с сохранением в плане деталей микронных размеров привела в 70-х годах специалистов из Исследовательского Центра в Карлсруэ к разработке технологического подхода, обозначенного немецкой аббревиатурой LIGA, т.е. литография (глубокая рентгеновская), гальваника и формовка (Abformung). Преимущества его в многообразии геометрии, материалов (металлы, пластики, керамика), низкой стоимости изготовления, возможности формирования микроструктур с размерами порядка микрометров в плане и отношением вертикальных и горизонтальных размеров в несколько сотен (аспектное отношение).

Диаграмма (рис. 1) представляет основные этапы LIGA-технологии. Специфика LIGA-процесса заключается в применении микроформ, с помощью которых микрорельеф последовательно повторяется в разных материалах. Первая из них образуется областями полиметилметакрилата (ПММА), защищенными при экспонировании через маску. Гальваническое наращивание никеля до толщины, большей, чем высота микрорельефа, образует прочную металлическую форму, с помощью которой конфигурация многократно воспроизводится литьем или штамповкой пластика, или формовкой сырой керамической массы с последующим отжигом.

Синхротронное излучение (СИ) испускается в виде непрерывного спектра от инфракрасного до жесткого

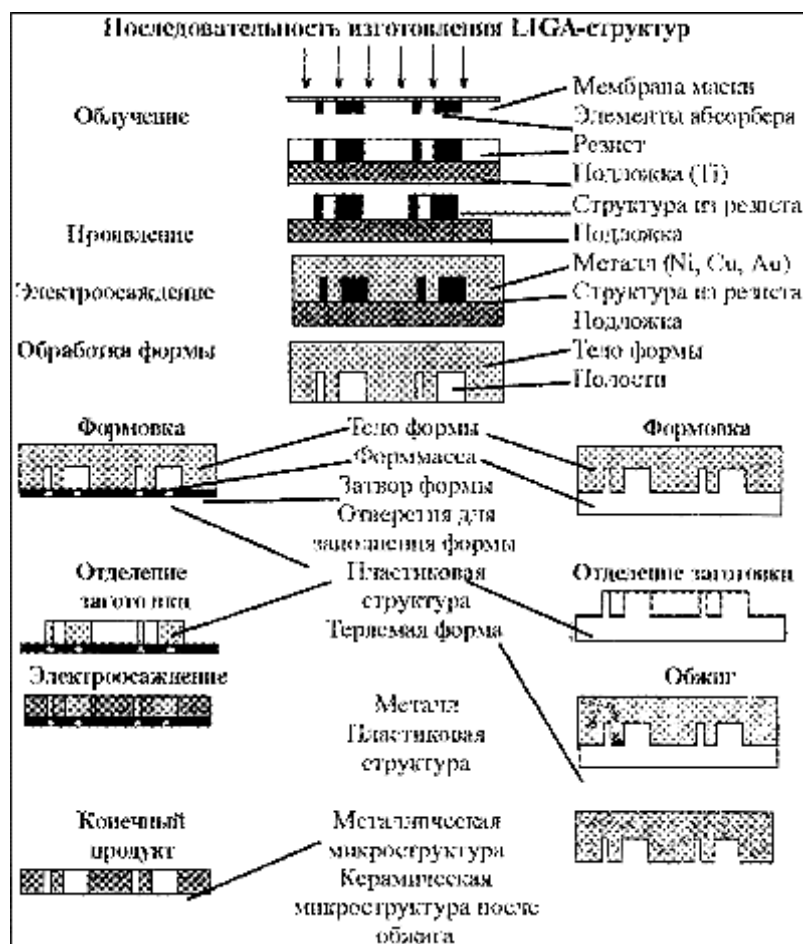


Рис. 1. Основные этапы LIGA-технологии и

рентгеновского при пролете электронов в магнитном поле, изгибающем их траекторию. Форма спектра зависит от энергии электронов E (ГэВ), тока электронного пучка, магнитного поля B (Т) и имеет характеристическую длину волны $\lambda_c (A^\circ) = 18,6 / \sqrt{E^2}$, которая делит пополам полную интегральную энергию фотонов спектра (рис. 2).

Литография с применением СИ - теневой перенос изображения с маски на слой резиста (например, полиметилметакрилата ПММА), в котором излучение вызывает разрыв связей с постепенным снижением его молекулярного веса по мере набора дозы.

На рис. 3 показана схема процесса облучения. Станция экспонирования удалена от точки излучения на электронном кольце на расстояние 10-30 м. На маску падает плоский луч шириной 10-15 см и высотой 3-7 мм, неоднородный по интенсивности и спектральному составу в поперечном сечении (рис. 4). Параметры луча могут корректироваться фильтрами, а для усреднения дозы по поверхности

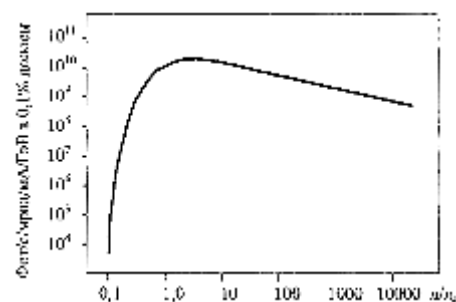


Рис. 2. Универсальный спектр синхронного излучения

чувствительного слоя и для устранения локального перегрева и деформации маски, держатель подложки и маски непрерывно перемещается в вертикальном направлении (от единиц до десятков сантиметров в секунду). Для дополнительного охлаждения камера заполняется газообразным гелием. Современные сканеры обеспечивают как прецизионное, равномерное в пределах подложки движение в плоскости, перпендикулярной лучу, так и возможность наклона, вращения и совмещения образца. По мере прохождения луча через станцию экспонирования его

интенсивность снижается, как показано на рис. 5. Излучение, прошедшее через мембрану, постепенно поглощается в резисте. За абсорбером, образующим рисунок маски, мощность падает практически до нуля, не вызывая заметных изменений в резисте. Подложка поглощает остаток излучения. На рис. 6 показано распределение молекулярного веса ПММА до экспонирования после поглощения дозы в 4 кДж/см² и 20 кДж/см². Заштрихована область молекулярных масс, от которой 50% и более может быть растворено в проявителе при 38° С. Если поглощенная доза достигает минимального уровня 4 кДж/см², облученные зоны резиста ПММА удаляются с незначительными остатками в глубине микроструктуры. Последние являются следствием постепенного снижения плотности потока излучения и могут быть

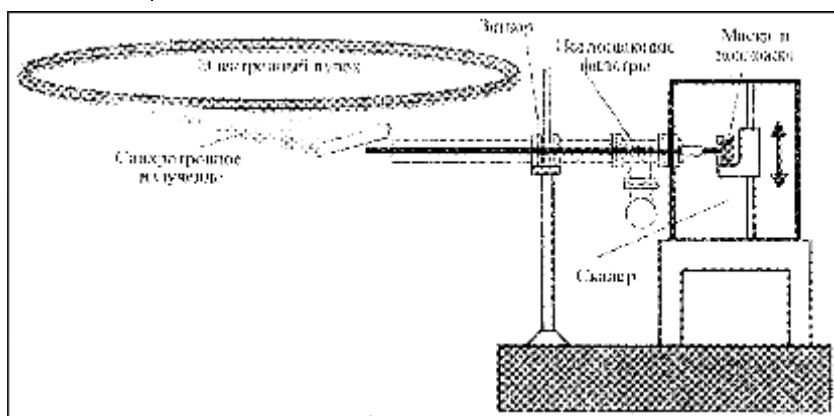


Рис. 3. Станция экспонирования

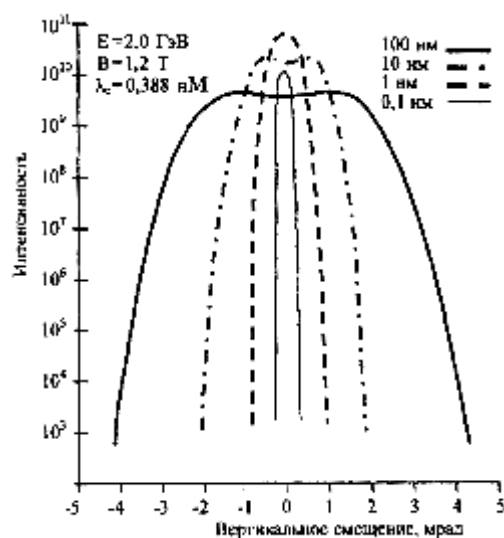


Рис. 4. Угловое распределение интенсивности луча СП после фильтров с указанным верхним порогом длины волны

устранены направленным ультразвуковым возбуждением ванны с проявителем. На поверхности резиста типичное значение поглощенной дозы составляет 20 кДж/см^3 . Превышение ее вызывает вспучивание переоблученной зоны и растрескивание прилегающих областей вследствие теплового эффекта и выделения легких газообразных фрагментов. Однако при работе с большей толщиной резиста ($\sim 1 \text{ мм}$) указанный верхний предел снижается до 14 кДж/см^3 из-за низкой теплопроводности ПММА. На поверхности резиста под абсорбером уровень мощности не должен превышать 100 Дж/см^2 , чтобы затененная область полностью сохраняла форму во время проявления. Эти дозовые нормы определяют, какими должны быть спектр излучения при данной толщине определенного резиста и толщина абсорбера.

Резист наносится на подложку в виде вязкого раствора ПММА, MMA с другими добавками и после выравнивания поверхности полимеризуется, или приклеивается в виде готовых листов нужной толщины. Точность геометрии микроструктуры в резисте помимо очевидных факторов таких, как отклонение в движении

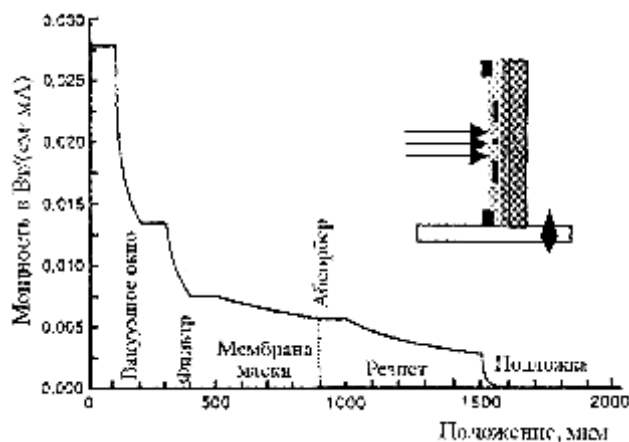


Рис. 5. Интенсивность проходящего пучка

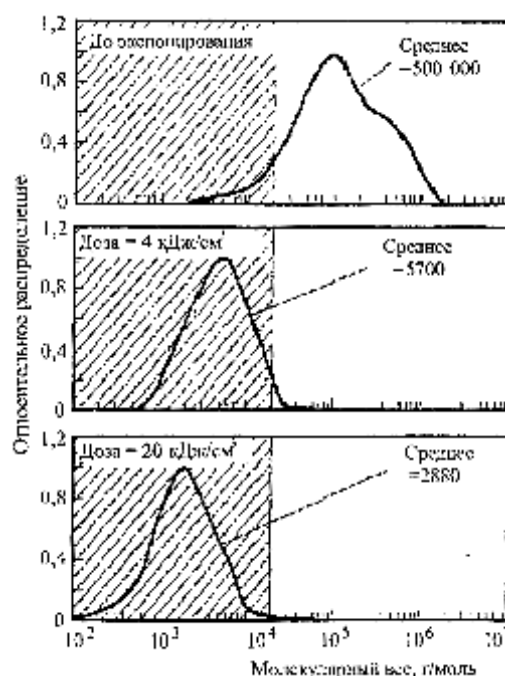


Рис. 6. Селективность проявителя к облученному ПММА в зависимости от молекулярного веса после облучения

сканера, наклон боковой стенки элемента абсорбера или недостаточная селективность проявителя, имеет и фундаментальные пределы: вторичные эффекты флуоресценции из мембраны и подложки, френелевская дифракция на краю абсорбера ($\sim \lambda^{1/2}$), рассеяние возникающих в объеме резиста фотоэлектронов ($\sim \lambda^{-2}$) в область тени под абсорбером. Два последних фактора имеют противоположные зависимости от длины волны и, согласно проведенным расчетам, при толщине резиста 500 мкм оптимальные значения характеристической длины волны синхротронного излучения приходятся на область $0,2\text{--}0,3 \text{ нм}$ (рис. 7).

Маска для глубокой рентгеновской литографии состоит из тонкой мембраны (Be, алмаз, Ti), закрепленной на жестком кольце и несущей на себе элементы абсорбера (Au, W, Ta, Pt). Контраст переноса рисунка обусловлен высокой прозрачностью мембраны вблизи характеристической длины ($\sim 10^{-2} \text{--} 10^{-3} \text{ мкм}^{-1}$) и сильным поглощением рентгеновского излучения в слое абсорбера толщиной ($15\text{--}25 \text{ мкм}$). Кроме того,



Рис. 7. Связь точности с длиной волны λ_c

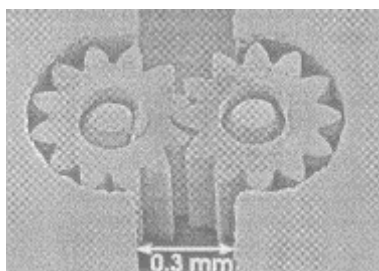


Рис. 8. Шестеренчатый микронасос для вязких жидкостей

ка хромового фотошаблона на электронно-лучевом или оптическом формирователе изображений; изготовление промежуточной маски с помощью УФ литографии со стандартным резистом толщиной 3 мкм на кремниевой мембране (4 мкм толщиной) с последующим гальваническим нанесением слоя золота (1,5 - 3 мкм); копирование ее мягким рентгеновским излучением в слое ПММА (15 - 20 мкм) на мембране из бериллия и гальваническое золочение на эту же толщину в полученной форме из ПММА.

Для прецизионного бездефектного электроосаждения используются очень чистые реактивы, решены проблемы тщательной фильтрации электролитов от посторонних частиц (около 0,2 мкм) и продуктов разложения электролита, непрерывного поддержания состава с применением фотометрического, хроматографического контроля, абсолютной смачиваемости полимерной структуры и подложки в начале осаждения.

С момента своего появления LIGA-технология утвердилась как обязательная часть всех синхротронных центров в мире. Вновь создаваемые комплексы в Германии, Великобритании, Китае, Корее на первых позициях ставят каналы для целей микротехнологии. Изделия на основе LIGA-микроструктур не только успешно дополняют функциональные возможности кремниевых МЭМС, но и занимают полностью самостоятельные сферы рынка микросистем во многих направлениях современной техники. Микромеханика, микрооптика и микрофлюидика - три главные области, где требуются микрокомпоненты самого разного назначения. Изготовлены и исследованы не только отдельные

мембрана должна быть совместима с гальваническим процессом нанесения абсорбера и сохранять механическую прочность при облучении. Типичный пример изготовления маски можно проследить на одном из вариантов маршрута: подготов-

компоненты: насосы для газов и жидкостей различной вязкости (рис. 8), клапаны, микрофльтрационные мембраны, смесители и т.д. - разрабатывается новая концепция химической технологии - микрореакторная. Набор миниатюрных функциональных модулей с системой мониторинга может выполнять целый технологический цикл на месте потребления какого-либо продукта, исключая необходимость хранения и транспортировки. Имея большое отношение поверхности к объему в смесителях, микрореакторы позволяют повысить чистоту продукта, становятся менее опасным объектом для персонала и окружающей среды. Роста выпуска продукта можно достичь не увеличением объемов микрореакторов, а наращиванием количества миниатюрных модулей. Другое применение - миниатюрная система полного анализа, например, для биомедицинской диагностики. Микрооптические компоненты быстро внедряются в системы связи вследствие перехода с проводных линий на оптоволоконные и необходимости передачи больших объемов видеoinформации. Поскольку оптическое волокно производится с субмикронным допуском в размерах, совмещение и стыковка оптоволоконного канала с другими оптическими и механическими компонентами с аналогичной точностью возможна лишь средствами микротехнологии. Два примера LIGA-микрооптических устройств показаны на рис. 9.

Микромеханические датчики, механизмы и конструктивные элементы начали разрабатывать вследствие необходимости оснастить сложные микроэлектронные системы способностью соразмерно осуществлять контакт с окружением, воспринимать собственные пространственные эволюции, преобразовывать свои выходные сигналы в перемещение окружающих объектов и сред и исполнять их в микромасштабе. Это могут быть пассивно движущиеся детали (рис. 10), или активно работающие (актюаторы, микродвигатели, шестеренчатые передачи). LIGA-технология предлагает также новые решения проблемы сборки и проводящих соединений в микроэлектронике. Например, миниатюрные многоконтактные разъемы, содержащие более сотни пружинных контактов на сантиметр или разъемные системы до 10^4 контактных элементов на квадратный сантиметр (рис. 11).

Для изготовления более изощренных микромеханических устройств разработана модификация LIGA-процесса, в которой используется так называемый "жертвенный", или временно несущий селективно удаляемый слой (например, титан под никелем). Он позволяет иметь в микроструктуре детали, подвижные относительно подложки, вместе с закрепленными на ней. Турбина на рис. 9,а и "маятник" датчика ускорений (см. рис. 10) могут двигаться относительно подложки и окружающих их деталей, изготовленных в одном гальваническом процессе.

Разработаны способы изготовления более сложных LIGA-микроструктур: многоуровневых ступенчатых, с наклонными стенками - при облучении пучком СИ, не нормальным к поверхности резиста; сферических - при отжиге ПММА микроструктуры после проявления.

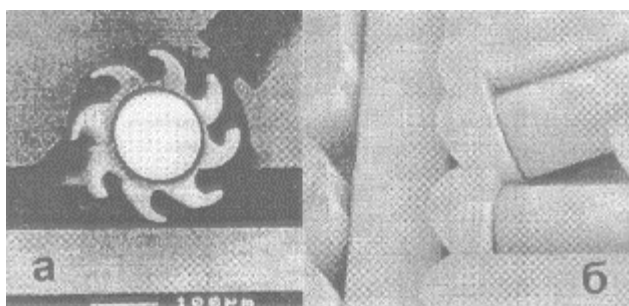


Рис. 9. Микрооптические компоненты

а - микротурбина с оптическим считыванием скорости потока газа или жидкости;

б - узел связи оптических волокон с цилиндрическими линзами для горизонтальной фокусировки

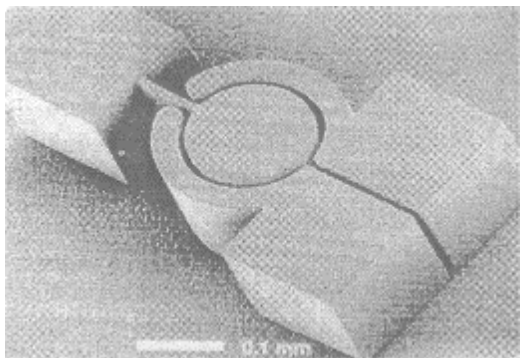


Рис. 10. Инерциальный датчик ускорения

Ключевые моменты совершенствования LIGA-процесса: разрешение деталей микроструктур с субмикронным допуском, достижение субмикронного допуска на длине более 10 мм, сокращение продолжительности облучения за счет применения более чувствительных резистов и, следовательно, снижение временных затрат



Рис. 11. Многоконтактный электроразъем

на рентгеновскую литографию с часов до минут, выработка промышленных стандартов на материалы, размеры, оборудование и надежность.

В Курчатовском источнике синхротронного излучения при поддержке Института микротехнологии (Майнц, Германия) проведены эксперименты по глубокой рентгеновской литографии, которые показали, что предварительный расчет необходимой дозы и продолжительности облучения подтвердился полной проработкой слоя резиста на всю толщину, а спектр излучения источника отлично обеспечивает точность воспроизведения рисунка маски и гладкие вертикальные стенки микроструктуры.

Список литературы

- 1 Tolfree D.V.L. Microfabrication using synchrotron radiation // Rep Prog Phys, 1998, 61 P 313-351
- 2 Ehrfeld W., Lehr H. Deep X-ray lithography for the production of three-dimensional microstructures from metals, polymers and ceramics // Radiat Phys Chem 1995, vol 45 No 3 P 349-365
- 3 Handbook of Microlithography // Micromachining and Microfabrication Ed P Rai-Choudhury, 1996
- 4 Artemiev A.N., Koliashnikov V.A., Peredkov S.S., Rakhimhaev T.Y., Stankevitch V.G. et al. Deep X-ray Lithography beamline at the KSRS first results // Nucl Instrum & Meth In Phys Res, A405 (1998). P. 496-499.

УДК 621.3

Ю.Ф. Адамов, д-р техн. наук проф. *, **Н.В. Корнеев**, **В.Г. Мокеров**, д-р техн наук проф., чл.-кор. РАН *, **В.К. Неволлин**, д-р физ.-мат. наук проф.,
Московский государственный институт электронной техники (Технический университет) Тел (095) 532-89-57, факс (095) 530-22-33, e-mail vkn@miee.ru
*Институт радиотехники и электроники РАН

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАНАРНЫХ 2D-НАНО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

Сочетанием методов традиционной планарной технологии с зондовыми методами окисления металлических проводящих дорожек на диэлектрических подложках в сканирующем атомно-силовом микроскопе созданы двухэлектродные планарные элементы с 2D-наноразмерными сужениями. Такие структуры должны проявлять размерные эффекты в проводимости, в том числе квантовые эффекты в нелинейности вольт-амперных характеристик (ВАХ) Методы зондового формирования позволяют создать двухэлектродные планарные элементы с множеством нелинейных ВАХ, имеющих различные функциональные назначения.

Методами сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии возможно формирование проводящих структур, у которых один или два характерных размера имеют нанометровые значения. В частности, методами сканирующей туннельной микроскопии были созданы вертикальные квазиодномерные микроконтакты, на основе которых были изготовлены макеты датчиков рабочего интервала температур и ограничения силы проходящего тока, макеты перестраиваемых нанодиодов-нанодинисторов, обладающие уникальными свойствами [1]. В основе физики электронных явлений в таких структурах лежат размерные эффекты, которые существенны особенно тогда, когда поперечные размеры микроконтактов из металлов меньше 10 нм. В этом случае возможно квантование поперечной энергии носителей тока и проявление квантовых свойств микроконтактов при комнатных температурах. Двухэлектродные элементы на основе таких квазиодномерных микроконтактов (квантовых проводов) могут проявлять электрические свойства, характерные для планарных многослойных структур [2]. Для этого необходимо изменять диаметр провода и радиус кривизны подводящих электродов. Кроме того, квантовый микроkontakt может управляться инфракрасным светом с длинами волн до 20 мкм, может являться и источником этого света, а также управляться электрическим полем (транзисторный эффект).

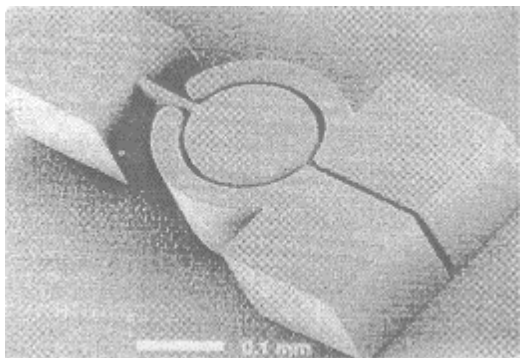


Рис. 10. Инерциальный датчик ускорения

Ключевые моменты совершенствования LIGA-процесса: разрешение деталей микроструктур с субмикронным допуском, достижение субмикронного допуска на длине более 10 мм, сокращение продолжительности облучения за счет применения более чувствительных резистов и, следовательно, снижение временных затрат



Рис. 11. Многоконтактный электроразъем

на рентгеновскую литографию с часов до минут, выработка промышленных стандартов на материалы, размеры, оборудование и надежность.

В Курчатовском источнике синхротронного излучения при поддержке Института микротехнологии (Майнц, Германия) проведены эксперименты по глубокой рентгеновской литографии, которые показали, что предварительный расчет необходимой дозы и продолжительности облучения подтвердился полной проработкой слоя резиста на всю толщину, а спектр излучения источника отлично обеспечивает точность воспроизведения рисунка маски и гладкие вертикальные стенки микроструктуры.

Список литературы

- 1 Tolfree D.V.L. Microfabncation using synchrotron radiation // Rep Prog Phys, 1998, 61 P 313-351
- 2 Ehrfeld W., Lehr H. Deep X-ray lithography for the production of three-dimensional microstructures from metals, polymers and ceramics// Radiat Phys Chem 1995, vol 45 No 3 P 349-365
- 3 Handbook of Microlithography// Micromachining and Microfabri - cation Ed P Rai-Choudhury, 1996
- 4 Artemiev A.N., koliasnikov V.A., Peredkov S.S., Rakhimhaev T.Y., Stankevitch V.G. et al. Deep X-ray Lithography beamline at the KSRS first re - sults//Nucl Instrum & Meth In Phys Res, A405 (1998). P. 496-499.

УДК 621.3

Ю.Ф. Адамов, д-р техн. наук проф. *, **Н.В. Корнеев**, **В.Г. Мокеров**, д-р техн наук проф., чл.-кор. РАН *, **В.К. Неволин**, д-р физ.-мат. наук проф.,
Московский государственный институт электронной техники (Технический университет) Тел (095) 532-89-57, факс (095) 530-22-33, e-mail vkn@miee.ru
*Институт радиотехники и электроники РАН

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАНАРНЫХ 2D-НАНО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

Сочетанием методов традиционной планарной технологии с зондовыми методами окисления металлических проводящих дорожек на диэлектрических подложках в сканирующем атомно-силовом микроскопе созданы двухэлектродные планарные элементы с 2D-наноразмерными сужениями. Такие структуры должны проявлять размерные эффекты в проводимости, в том числе квантовые эффекты в нелинейности вольт-амперных характеристик (ВАХ) Методы зондового формирования позволяют создать двухэлектродные планарные элементы с множеством нелинейных ВАХ, имеющих различные функциональные назначения.

Методами сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии возможно формирование проводящих структур, у которых один или два характерных размера имеют нанометровые значения. В частности, методами сканирующей туннельной микроскопии были созданы вертикальные квазиодномерные микроконтакты, на основе которых были изготовлены макеты датчиков рабочего интервала температур и ограничения силы проходящего тока, макеты перестраиваемых нанодиодов-нанодинисторов, обладающие уникальными свойствами [1]. В основе физики электронных явлений в таких структурах лежат размерные эффекты, которые существенны особенно тогда, когда поперечные размеры микроконтактов из металлов меньше 10 нм. В этом случае возможно квантование поперечной энергии носителей тока и проявление квантовых свойств микроконтактов при комнатных температурах. Двухэлектродные элементы на основе таких квазиодномерных микроконтактов (квантовых проводов) могут проявлять электрические свойства, характерные для планарных многослойных структур [2]. Для этого необходимо изменять диаметр провода и радиус кривизны подводящих электродов. Кроме того, квантовый микроkontakt может управляться инфракрасным светом с длинами волн до 20 мкм, может являться и источником этого света, а также управляться электрическим полем (транзисторный эффект).

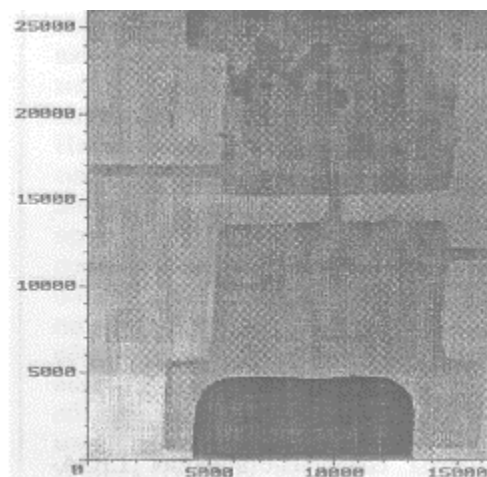
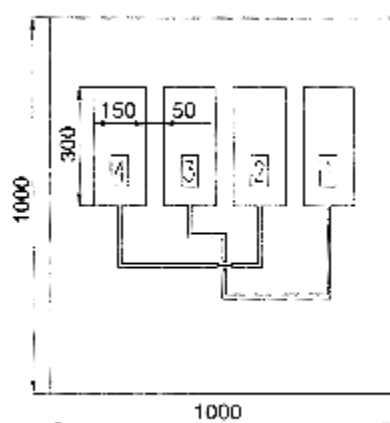


Рис. 1. Геометрия и топология планарных элементов на кристалле

Однако вертикальные квазиодномерные микроконтакты, когда контакт образуется между проводящей подложкой и вертикально расположенным над ним зондом, обладают существенным недостатком - высокой чувствительностью к температуре окружающей среды. Дело в том, что зонд относительно подложки фиксируется в диэлектрической матрице, например, из эпоксидной смолы, у которой коэффициент линейного расширения достаточно высок. Для преодоления высокой термочувствительности вертикальных квантовых микроконтактов и развития наиболее производительных планарных методов технологии является весьма актуальным создание планарных 2D-наноразмерных структур из проводящих материалов на диэлектрических подложках. Проводящие дорожки на диэлектрических подложках могут иметь поперечные размеры, характеризующиеся практически всегда двумя величинами. Двухстадийному процессу формирования и исследованию электрических свойств планарных 2D-наноразмерных структур посвящена эта статья.

Для проявления квантовых свойств проводящих дорожек при комнатных температурах на диэлектрических подложках прежде всего необходимо, чтобы любой из поперечных размеров a_1 , a_2 удовлетворял неравенству [2]

$$a_{1,2} \leq \frac{\pi \eta^2 k_f}{30mkT},$$

где k_f - волновое число Ферми; m - масса носителей тока; k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура. Выполнение этих неравенств необходимо для создания многомоновых 0D-квантовых проводов, когда несколько уровней поперечного квантования энергии лежат ниже уровня Ферми и участвуют в переносе носителей тока. Для наблюдения квантовых эффектов в квазиодномерном канале необходимо также, чтобы длина когерентности носителей тока превышала длину провода. В этом случае может реализоваться баллистический квантовый "транспорт". Для преодоления дифракции носителей тока на границах перехода от макроэлектродов к проводящему каналу важна плав-

ность перехода электродов - "берегов" - в квантовый канал. Качество поверхности квантовых проводов является также принципиальным для наблюдения квантовых эффектов, шероховатость поверхности приводит к размыванию уровней поперечного квантования энергии. Поверхностные энергетические состояния, возникающие на границе между диэлектрической подложкой и квантовым проводом, также могут оказывать существенное влияние на "транспорт" носителей тока в канале. Все эти факторы усугубляют возможность наблюдения квантовых свойств проводимости при комнатных температурах.

Рассмотрим последовательно двухстадийную технологию изготовления макетов планарных двухэлектродных устройств с квазиодномерными проводами.

На рис. 1 представлены геометрия планарных элементов на одном кристалле размерами 1x1 мм и топография титановой дорожки с подводящими электродами. На одном из подводящих титановых traversов написана аббревиатура названия журнала (MT) методом анодирования (см. ниже). Основной титановый проводник выполнен в виде дорожки, ширина которой составляет 0,5 мкм, толщина 50 нм. Потенциальные титановые проводники позволяют выполнять дополнительные электрические измерения. В качестве исходной несущей подложки были выбраны изолирующие GaAs-пластины диаметром 32 мм. В качестве материала проводников, на которых в последующем формируются участки с квазиодномерной проводимостью, был выбран титан. Титан достаточно просто окисляется в электрическом поле, что важно для применения зондовой технологии при формировании квазиодномерных перемычек. В качестве материала подводящих электродов было выбрано золото. Золотые контактные площадки имеют размеры 300x150 мкм, что позволяет достаточно просто устанавливать внешние зонды для проведения измерений. Весь цикл технологических операций по созданию кристаллов с планарными титановыми проводниками и золотыми электродами был выполнен в Институте радиотехники и электротехники РАН (ИРЭ РАН) в отделе № 29. Для последующего проведения зондовых технологических операций и

измерений пластины разрезались на кристаллы с размерами $1,0 \times 1,0$ мм.

Явление анодного окисления пленок, которое далее будем называть *анодизацией* (anodization), известно давно и достаточно изучено [3]. Успехи японских исследователей по анодизации титановых пленок с помощью зонда туннельного микроскопа [4] способствовали тому, что нами были выбраны именно титановые планарные проводники для проведения на следующей стадии техпроцесса зондовой анодизации. При анодизации титановых пленок электролитом между зондом и подложкой служит адсорбат паров воды. В работе [4] при напряжении между зондом и титановой пленкой 5 В (положительный потенциал подается на пленку) и силе тока 1 нА происходит окисление пленки на глубину 4 нм. Скорость движения зонда при анодизации 0,01 мкм/с, ширина окисленной дорожки 80 нм.

Масс-анализ показал, что окислы титана содержат следы углерода, их удельное сопротивление составляет -10 Ом-см. Эти параметры диэлектрических пленок на основе титана являются вполне удовлетворительными для "вырезания" квазиодномерных проводников из исходных проводящих дорожек зондовым методом.

В результате окисления титанового проводника получается переключатель между двумя макроэлектродами. При характерных размерах переключки менее 7 нм должно осуществляться полное поперечное квантование энергии носителей тока, и многообразие вольт-амперных характеристик (ВАХ) будет зависеть от геометрической кривизны подводных электродов [2]. Проблемы качества поверхности квазиодномерных проводов предполагается решать за счет предельного уменьшения поперечных размеров, что должно приводить к увеличению "резкости" поперечного квантования.

На рис. 2 в качестве примера изображен фрагмент дорожки в увеличенном масштабе. Можно видеть несовершенство геометрии электродов в нанометровых масштабах, что в конечном счете ведет к неоднозначности получаемых характеристик планарных элементов.

На рис. 3 в качестве примера приведено изображение центральной дорожки после окисления. Можно видеть, что образуются выступы из окисленного титана, которые имеют неправильную форму. На титановых дорожках, имеющих аморфную структуру (однородные пленки больших размеров), как правило, области окисления имеют правильную форму. Многократным повторением циклов окисления можно было добиться полного прекращения проводимости дорожки. Таким образом, метод зондового окисления позволяет изменять проводимость титановых дорожек в относительно больших пределах.

Основными результатами, полученными при исследовании двухэлектродных элементов с титановыми проводниками, являются ВАХ. На рис. 4 показана исходная ВАХ центральной дорожки с электродами (кривая 1). Можно видеть, что имеет место местный омический контакт с полным сопротивлением цепи 450-1000 Ом. Для анодирования применялись, как правило, прямоугольные импульсы напряжения с различными амплитудой и скважностью. На рис. 4

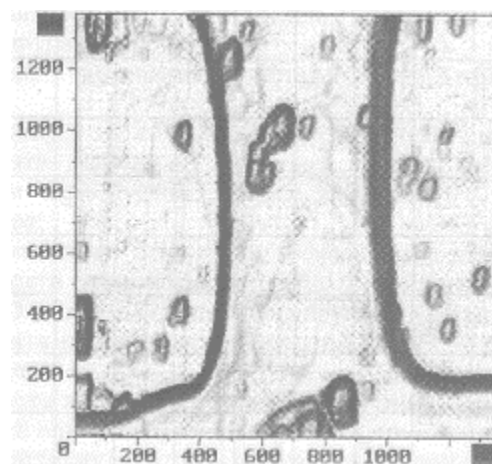


Рис. 2. Топография фрагмента центральной титановой дорожки

(кривые 2-4) показаны ВАХ при различных циклах окисления. Можно видеть, что наблюдаются так называемые S-образные ВАХ, с помощью которых, в частности, можно реализовать генераторные режимы работы нанодиодов.

Одной из проблем при создании планарных квантовых проводов является *качество границ раздела*. При формировании вертикальных проводов в сканирующем туннельном микроскопе качество границы между проводом и эпоксидной матрицей определялось процессами самоформирования структуры между зондом и проводящей подложкой. Экспериментальные результаты показывали, что качество границы высокое, поскольку квантовые эффекты наблюдались при комнатных температурах. В случае планарных проводников границы раздела возникают в разных технологических операциях, что создает дополнительные проблемы. В

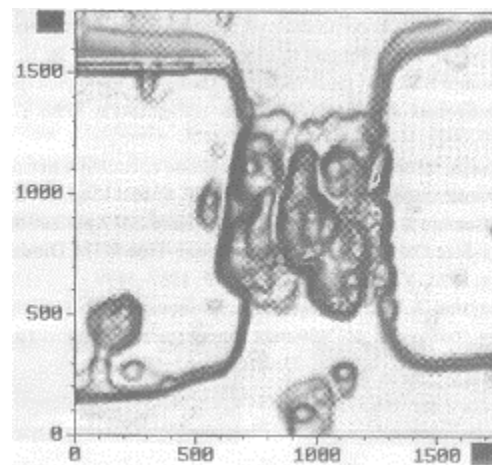


Рис. 3. Топография фрагмента центральной титановой дорожки после окисления

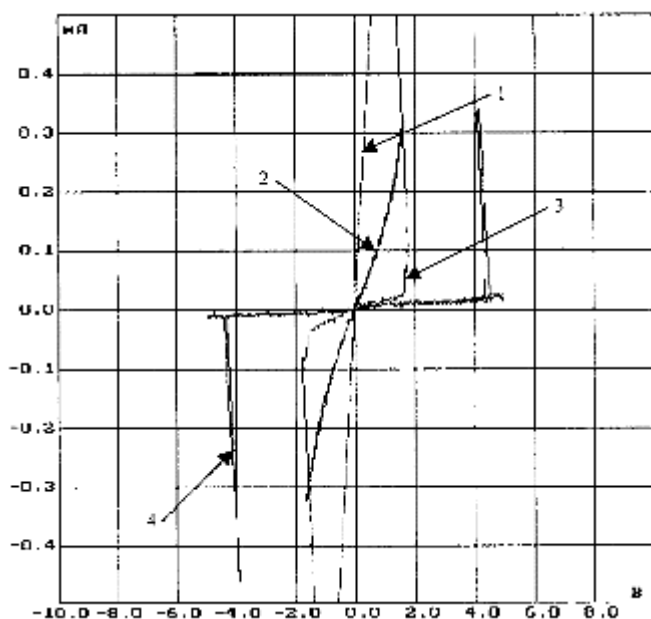


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) планарных двухэлектродных элементов:
1 - ВАХ элемента до окисления; 2, 3, 4 - ВАХ элементов после нескольких стадий окисления

связи с этим являются актуальными идеи самоформирования планарных квантовых проводов [5].

Таким образом, созданы лабораторные макеты планарных двухэлектродных элементов с 20-наноразмерными структурами, проявляющих многообразие ВАХ и имеющих в связи с этим разнообразное функциональное назначение. Ясно, что необходима дальнейшая отработка всех стадий технологии изготовления планарных структур для более явного проявления квантовых свойств проводимости при комнатных температурах.

Список литературы

1. Неволин В.К. Электронные устройства с элементами нанометровых размеров // Электронная промышленность. 1993. № 10. С. 20.
2. Неволин В.К. Двухэлектродные элементы наноэлектроники на основе квантовых проводов // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 4. С. 293-300.
3. Физика тонких пленок. Современное состояние исследований и технические применения: Пер. с англ. Т 6. М.: Мир. 1973. С. 97.
4. Matsumoto R., Takahashi S., Ishii V. and an. Application of STM Nanometer-Size Oxidation Process to Planar-Type MIM Diode // Jpn. J. Appl. Phys. 1995. V. 34. Part 1, No. 2B. P. 1387-1390.
5. Касумов А.Ю., Кислов Н.А., Кононенко О.В. и др. Новая концепция создания модельных элементов наноэлектроники // Микроэлектроника. 1994. Т. 23. № 5. С. 52-60.

УДК 621.315.592

Е.И.Ивашенко, Ю.Б.Цветков, канд. техн. наук. доц.,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

МЕТОД РАЗМЕРНОГО СТОП-ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРОМЕХАНИКИ

Исследован процесс анизотропного травления кремния ориентации (100) с электрохимической остановкой процесса в целях изготовления изделий микромеханики. Экспериментально подтверждена возможность самоостановки травления на эпитаксиальном слое при подаче на него потенциала пассивации. Разработана система защиты топологии пластины от воздействия /правителя. Установлен характер зависимости скорости травления от температуры раствора. Определены оптимальные режимы обработки кремния.

Введение

Устойчивая тенденция к миниатюризации в современной технике выразилась в появлении и бурном развитии ряда новых областей, объединенных концептуальным понятием - *микромеханика*, в основе которой лежит тот факт, что кремний, помимо общеизвестных полупроводниковых свойств, обладает великолепными прочностными и упругими свойствами, а также относится к числу пьезоэлектрических материалов [1]. Это позволяет в сочетании с современными электронными технологиями использовать его для изготовления чувствительных элементов микромеханических устройств и преобразовывать деформации встроенных в них тензорезисторов в электрические сигналы. Примеры таких устройств показаны на рис. 1.

В *кремниевых соплах* для струйных принтеров (рис. 1,а) размер отверстия составляет 20 мкм, причем на одной кремниевой пластине получают одновременно до 300...500 таких сопел, что способствует снижению разброса размеров отверстий.

Пьезорезистивный датчик давления (рис. 1,б) размером 3х3 мм и толщиной 0,4 мм имеет упругую диафрагму с размерами 1х1 мм и толщиной в пределах 10...20 мкм. Размещенные по краям мембраны диффузионные пьезорезисторы соединены в мостовую схему. При приложении давления мембрана изгибается, на ее внешней поверхности возникают напряжения, вследствие чего меняются сопротивление тензорезисторов и выходное напряжение мостовой схемы. Чувствительность и точность такого датчика соответствуют лучшим образцам подобных приборов при гораздо меньших (примерно на порядок) размерах. Это позволяет использовать их в аэрокосмической промышленности, автомобилях, медицине.

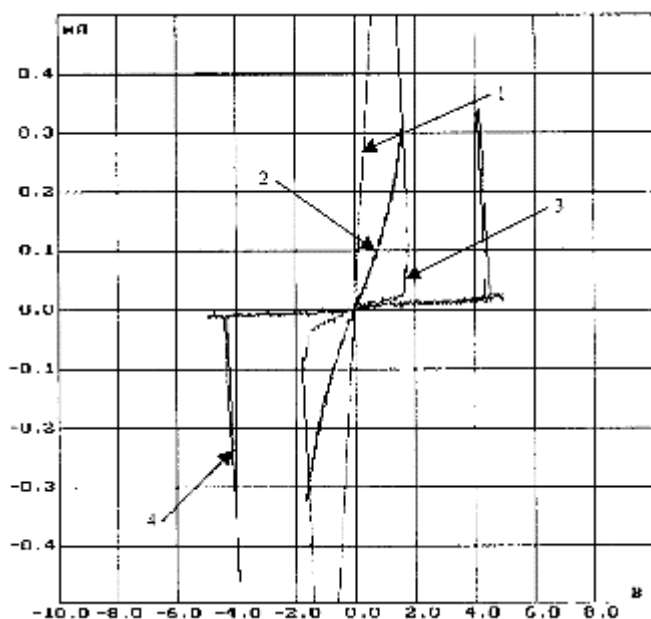


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) планарных двухэлектродных элементов:
1 - ВАХ элемента до окисления; 2, 3, 4 - ВАХ элементов после нескольких стадий окисления

связи с этим являются актуальными идеи самоформирования планарных квантовых проводов [5].

Таким образом, созданы лабораторные макеты планарных двухэлектродных элементов с 20-наноразмерными структурами, проявляющих многообразие ВАХ и имеющих в связи с этим разнообразное функциональное назначение. Ясно, что необходима дальнейшая отработка всех стадий технологии изготовления планарных структур для более явного проявления квантовых свойств проводимости при комнатных температурах.

Список литературы

1. Неволин В.К. Электронные устройства с элементами нанометровых размеров // Электронная промышленность. 1993. № 10. С. 20.
2. Неволин В.К. Двухэлектродные элементы наноэлектроники на основе квантовых проводов // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 4. С. 293-300.
3. Физика тонких пленок. Современное состояние исследований и технические применения: Пер. с англ. Т 6. М.: Мир. 1973. С. 97.
4. Matsumoto R., Takahashi S., Ishii V. and an. Application of STM Nanometer-Size Oxidation Process to Planar-Type MIM Diode // Jpn. J. Appl. Phys. 1995. V. 34. Part 1, No. 2B. P. 1387-1390.
5. Касумов А.Ю., Кислов Н.А., Кононенко О.В. и др. Новая концепция создания модельных элементов наноэлектроники // Микроэлектроника. 1994. Т. 23. № 5. С. 52-60.

УДК 621.315.592

Е.И.Ивашенко, Ю.Б.Цветков, канд. техн. наук. доц.,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

МЕТОД РАЗМЕРНОГО СТОП-ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРОМЕХАНИКИ

Исследован процесс анизотропного травления кремния ориентации (100) с электрохимической остановкой процесса в целях изготовления изделий микромеханики. Экспериментально подтверждена возможность самоостановки травления на эпитаксиальном слое при подаче на него потенциала пассивации. Разработана система защиты топологии пластины от воздействия /правителя. Установлен характер зависимости скорости травления от температуры раствора. Определены оптимальные режимы обработки кремния.

Введение

Устойчивая тенденция к миниатюризации в современной технике выразилась в появлении и бурном развитии ряда новых областей, объединенных концептуальным понятием - микромеханика, в основе которой лежит тот факт, что кремний, помимо общеизвестных полупроводниковых свойств, обладает великолепными прочностными и упругими свойствами, а также относится к числу пьезоэлектрических материалов [1]. Это позволяет в сочетании с современными электронными технологиями использовать его для изготовления чувствительных элементов микромеханических устройств и преобразовывать деформации встроенных в них тензорезисторов в электрические сигналы. Примеры таких устройств показаны на рис. 1.

В кремниевых соплах для струйных принтеров (рис. 1,а) размер отверстия составляет 20 мкм, причем на одной кремниевой пластине получают одновременно до 300...500 таких сопел, что способствует снижению разброса размеров отверстий.

Пьезорезистивный датчик давления (рис. 1,б) размером 3х3 мм и толщиной 0,4 мм имеет упругую диафрагму с размерами 1х1 мм и толщиной в пределах 10...20 мкм. Размещенные по краям мембраны диффузионные пьезорезисторы соединены в мостовую схему. При приложении давления мембрана изгибается, на ее внешней поверхности возникают напряжения, вследствие чего меняются сопротивление тензорезисторов и выходное напряжение мостовой схемы. Чувствительность и точность такого датчика соответствуют лучшим образцам подобных приборов при гораздо меньших (примерно на порядок) размерах. Это позволяет использовать их в аэрокосмической промышленности, автомобилях, медицине.

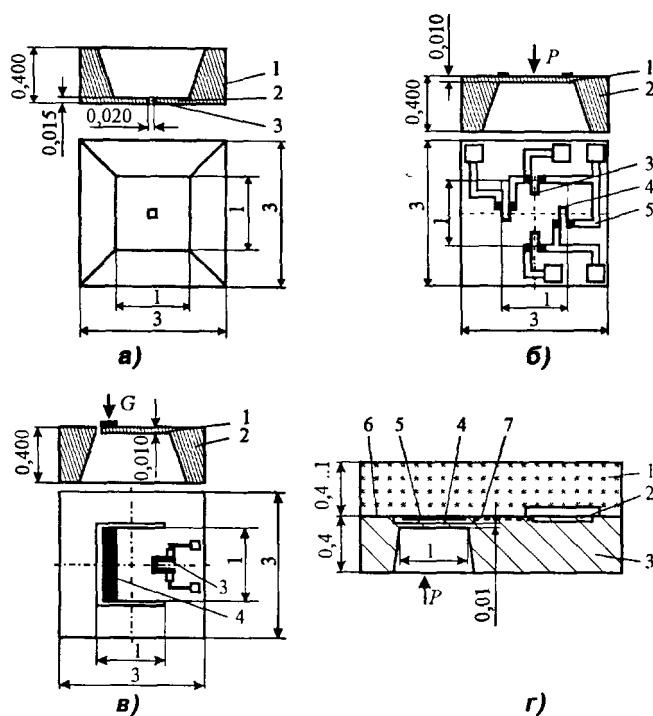


Рис. 1. Примеры микромеханических устройств:

а - кремниевое сопло для струйного принтера (1 - кремниевый кристалл; 2 - диафрагма; 3 - отверстие для иодачи краски);
б - пьезорезистивный датчик давления (1 - кремниевая диафрагма; 2 - кристалл, 3 - продольные диффузионные резисторы; 4 - поперечные диффузионные резисторы, 5 - металлизация);
в - кремниевый акселерометр (1 - упругая кремниевая балка; 2 - кремниевый кристалл; 3 - диффузионный резистор; 4 - инерционная масса);
г - емкостной датчик давления (1 - стеклянная пластина; 2 - интегральный преобразователь; 3 - кремниевый кристалл; 4 - мембрана; 5 - неподвижная металлическая обкладка, 6 - соединение кристалла со стеклянной пластиной; 7-диффузионный токоподвод)

Кремниевый акселерометр (рис. 1,в) по размерам сопоставим с датчиком давления, однако у него вместо мембраны используется упругая кремниевая балка толщиной 10...20 мкм. На свободном конце балки размещена инерционная масса, а в месте соединения балки с основанием выполнены тензорезисторы. По своему классу и областям применения акселерометр аналогичен кремниевому датчику давления.

В емкостном датчике давления (рис. 1,г) упругая диафрагма используется как подвижная обкладка плоского конденсатора, перемещающаяся при приложении давления. Неподвижная обкладка конденсатора обычно формируется в виде тонкой металлической пленки, напыленной на изолирующую стеклянную пластину. Под действием давления P изменяется емкость датчика. Толщина упругой мембраны лежит в диапазоне от одного до нескольких микрометров. Площадь составляет несколько квадратных миллиметров.

Приведенные примеры не исчерпывают номенклатуру изделий микромеханики, подробно рассмотренных в [2]. Кремниевые детали используются в качестве чувствительных элементов прецизионных роботов, термопечатающих головок, микромеханических

модуляторов света, двигателей, гироскопов и целого ряда других устройств.

Общие требования для деталей изделий микромеханики:

- допуск на габаритный размер чувствительного элемента должен составлять 2...5 мкм; толщина - 5...20 мкм с допуском, не превышающим 10 % заданного размера;
- толщина основания, исходя из соображений жесткости устройства, должна составлять не менее 0,4...0,5 мм, т.е. для получения упругого чувствительного элемента необходимо удалять до 95...99 % толщины заготовки.

Столь жесткие требования к точности обработки деталей и их рельефу ограничивают применение в этой области таких известных методов локальной прецизионной обработки, как ультразвуковая, электроэрозионная, лазерная.

Наиболее удобным и универсальным методом микрообработки кремния является локальное травление с использованием в качестве защитной маски слоев оксида или нитрида кремния [1]. Локальные отверстия в маске формируют с помощью фотолитографии. Существуют многочисленные травители, изотропные и анизотропные, по-разному воздействующие на кремний. Их использование позволяет получать различные по форме и размеру элементы микромеханического прибора.

Микрообработка кремния

Применение анизотропных травителей позволяет обеспечить точные габариты микроструктур, имеющих прямоугольную форму [3,4,5]. Это объясняется тем, что в отличие от изотропных травителей (рис. 2) данные травители (рис. 3) неодинаково воздействуют на различные кристаллографические плоскости кремния. Скорость химической реакции минимальна в направлении (111), а максимальна - в направлении (100). Соотношение скоростей травления в указанных направлениях может составлять 10...400 раз. После травления пластины ориентации (100) получается канавка, боковые стенки которой ориентированы в плоскости (111), т.е. перпендикулярны направлению, соответствующему наименьшей скорости травления. При малом времени травления канавка имеет плоское дно (рис. 3,а), с ростом времени она углубляется и становится V-образной (рис. 3,б). После этого травление резко замедляется (практически останавливается), так как дальше оно

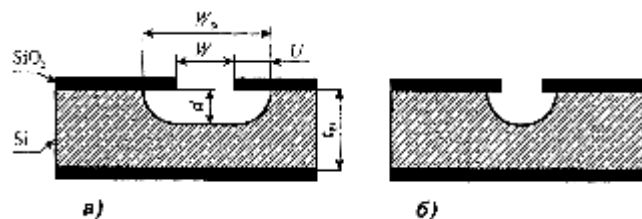


Рис. 2. Изотропное травление кремния:

а - без перемешивания раствора; *б* - с перемешиванием раствора

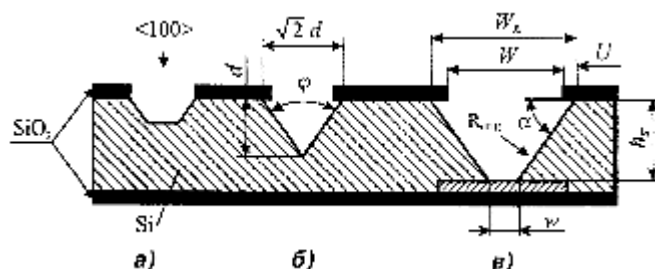


Рис. 3. Анизотропное травление кремниевой пластины ориентации (100)

возможно лишь в направлении (111). Глубина канавки d определяется размерами отверстия в маске W и составляет приблизительно $0,7 W$. Угол между стенками $\varphi = 70,52^\circ$.

Если же на пути распространения фронта травления сформировать ограничивающую область (рис. 3, в), то при ее достижении процесс обработки останавливается, и получается глубокая канавка с плоским дном. Таким образом, возможно изготовление, например, тонких мембран в кремнии, толщина которых будет определяться толщиной ограничивающей области или ее положением относительно поверхности пластины.

Ширина получаемой мембраны ω зависит от размера окна в маскирующем покрытии W , величины подтрав под оксид U и глубины травления h_{Si} :

$$\omega = W_{Si} - \sqrt{2}h_{Si}, U = V_{(111)} \tau / \sin \alpha, W_{Si} = W + 2U$$

где $\alpha = 54,74^\circ$; τ - время травления.

Подтрав U образуется из-за того, что, несмотря на то, что скорость $V_{(111)}$ мала, но при большой длительности процесса воздействие травителя все же сказывается.

Разнотолщинность пластин, как и при изотропном травлении, также будет влиять на размеры получаемого элемента. Однако при анизотропном травлении смещение фронта травления происходит с вполне определенной скоростью, равной $V_{(100)}$. Это позволяет устранить неопределенность границ формируемого углубления при касании фронта травления и ограничивающей области.

Таким образом, анизотропное травление позволяет с достаточной точностью формировать прямоугольные углубления и выступы в кремниевых пластинах, и поэтому оно широко используется в технологии микромеханики. Необходимо, однако, отметить некоторые особенности и ограничения анизотропных травителей. Они значительно медленнее изотропных, даже скорость травления плоскости (100) обычно не превышает $1...2$ мкм/мин. Для достижения такой скорости необходимо разогреть травитель до температуры $85...115^\circ \text{C}$, что затрудняет использование при защите топологии пластин таких традиционных для технологии травления материалов, как воск. Как и у изотропных травителей, скорость травления в данном случае существенно зависит от температуры. Но анизотропные травители мало чувствительны к перемешиванию - это является их достоинством.

Методы контроля процесса травления

Толщина упругого элемента механоэлектрического преобразователя является одной из важнейших геометрических характеристик прибора, влияющих на его физико-механические параметры. Она определяет чувствительность, диапазон линейного преобразования и геометрические размеры преобразователя. Поэтому при изготовлении чувствительного элемента методами травления очень важно остановить процесс обработки при достижении необходимой толщины.

К настоящему моменту известно несколько методов контроля и обеспечения воспроизводимости толщины упругих элементов [5]. Наиболее важными из них являются:

- контроль по времени травления;
- оптический способ;
- контрольное подтравливание;
- использование самотормозящих видов травления

(стоп-травление).

При большом числе положительных характеристик данные методы обладают существенными недостатками:

большая погрешность толщины упругого элемента (*контроль по времени травления*), ограниченность диапазона толщин кремниевых упругих элементов (*оптический способ контроля*), усложнение технологии и необходимость в специальном оборудовании, привносимые механические напряжения (*контрольное подтравливание и легирование*).

Электрохимический контроль травления

Наиболее перспективным методом изготовления чувствительных элементов заданной толщины является анизотропное травление с электрохимической автоматической остановкой процесса [6-10]. Метод предполагает использование эпитаксиального слоя n -типа, который традиционно используется в технологии микроэлектроники. Толщина слоя может составлять от единиц до десятков микрон с погрешностью порядка 10 %.

Из работ [6,7] известно, что вольт-амперная характеристика образцов кремния различного типа проводимости (n , p) при электрохимическом травлении в растворе едкого калия КОН (рис. 4) имеет характерные

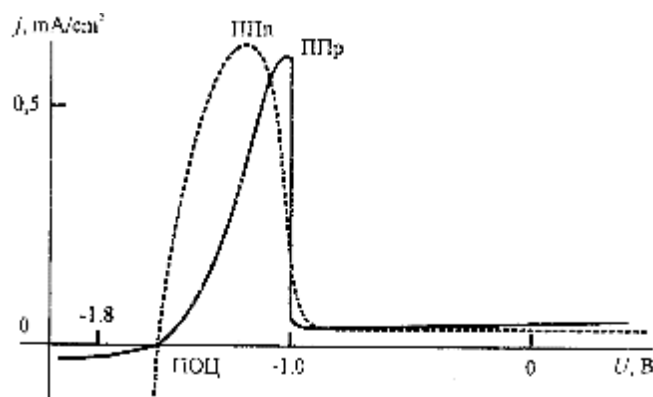
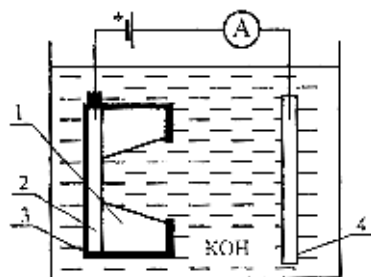


Рис. 4. Электрохимическая вольт-амперная характеристика кремния p - (—) и n -типа (----) ориентации (100) при травлении в 40 %-м растворе КОН и при температуре 60°C

Рис. 5. Схема проведения процесса обработки с электрохимической остановкой'

1 - *p*-подложка; 2 - эпитаксиальный *n*-слой; 3 - система защиты пластины; 4-нейтральный электрод



точки, в которых процесс обработки меняется коренным образом. Так, при потенциалах, больших потенциала пассивации *n*- или *p*-кремния (ППн, ППр), происходят окисление поверхности и остановка травления, а при меньших потенциалах кремний травится обычным образом. Другая характерная точка на вольт-амперной характеристике - "потенциал открытой цепи" (ПОЦ). Здесь наблюдается максимальная скорость электрохимического травления: для *n*-кремния - примерно 1,4 мкм/мин, а для *p*-кремния - 1,6 мкм/мин при $C_{\text{KOH}} = 40\%$ и $T = 60^\circ\text{C}$ [6].

Технология электрохимического стоп-травления основана на процессах анодной пассивации при травлении кремния с обратным смещенным *p-n*-переходом. Остановка травления достигается при подаче положительного потенциала на тонкий эпитаксиальный слой кремния *n*-типа посредством омического электрического контакта, в то время как электрический контакт к травящейся подложке кремния *p*-типа осуществляется через травильный раствор с инертным электродом (рис. 5). При этом на месте *p-n*-перехода образуется область обедненного заряда. При достаточном потенциале на *p*-кремнии (потенциал пассивации *n*-кремния ППн, рис. 4) зона пространственного заряда *n*-слоя перестает генерировать нужное для травления *n*-кремния число носителей заряда, как дырок, так и электронов, при этом на поверхности *p*-кремния их оказывается достаточно для обычного химического саморастворения. В процессе травления через систему течет ток, представляющий собой обратный ток *p-n*-перехода. В момент протравы *p*-подложки и контактирования травителя с *n*-слоем он резко возрастает. Такой рост обратного тока может быть объяснен инъекцией дырок при разряде ионов водорода на тех участках травления, где обедненный слой выходит на поверхность электролита. Часть дырок, генерируемых сильным электрическим полем на границе раздела кремний - электролит, не расходуется на реакцию, а втягивается обратным смещенным переходом, вследствие чего увеличивается его обратный ток. При этом происходит быстрое окисление поверхности полупроводника, препятствующее дальнейшей реакции растворения. Так как оксид является диэлектриком, то сила тока уменьшается и далее стабилизируется.

Экспериментальные исследования

Для изучения метода анизотропного электрохимического травления использовались кремниевые пластины

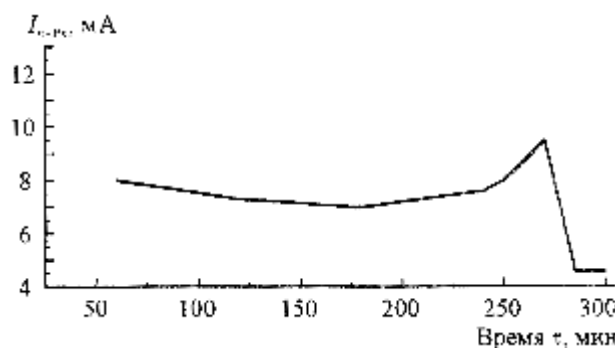


Рис. 6. Характер изменения силы тока I_{n-p} во времени при электрохимическом травлении кремния ($C_{\text{KOH}} = 30\%$, $T = 80^\circ\text{C}$, $U_{n-p} = 1,0\text{ В}$)

p-типа ($\rho = 4,5\text{ Ом см}$) ориентации (100) толщиной 400 мкм и диаметром 76 мм с эпитаксиальным слоем кремния *n*-типа ($\rho = 4,5\text{ Ом см}$) толщиной 20 мкм. Травление проводилось в 30 %-м растворе KOH при температурах 70...90°C. В качестве защитной маски для травящейся подложки использовался слой нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 0,3 мкм, в котором были вскрыты прямоугольные окна размером 1,56x1,56 мм. Схема проведения эксперимента показана на рис. 5. Пластина размещалась в защитной кассете базовым срезом вверх. На *n*-слой подается положительное относительно травящего раствора напряжение 1,0 В. Контакт с травителем осуществляется через нейтральный платиновый (или никелевый) электрод (*Pt*-электрод), при этом *p*-подложка остается под потенциалом раствора. Во время травления контролируется сила тока I_{n-p} между *n*-кремнием и нейтральным электродом. Характер изменения силы тока во времени представлен на рис. 6. Скачок силы тока сигнализирует о протраве *p*-подложки и контакте травителя с эпитаксиальным слоем. Увеличение силы тока не является резким, так как ячейки протравливаются не одновременно, и суммарный ток через них нарастает постепенно. После протравы подложки *n*-слой под воздействием положительного потенциала покрывается пленкой оксида кремния SiO_2 , который препятствует прохождению тока, при этом сила тока снижается и стабилизируется, а ее конечное значение обусловлено утечками через боковые стенки протравленных ячеек.

Начало стабилизации силы тока принималось за критерий окончания процесса, по которому рассчитывается скорость процесса.

При проведении экспериментов обработано 12 пластин при различных температурах. Характер зависимости скорости травления кремния ориентации (100) $V_{(100)}$ от температуры раствора в диапазоне 70...90°C представлен на рис. 7.

Для контроля разброса толщины полученных мембран пластина разрезалась по центрам ячеек на четыре части по вертикальной и горизонтальной осям относительно расположения в кассете во время травления. Результаты измерений толщины (рис. 8) показали, что разброс толщины большинства мембран в рабочей зоне пластины (показана штриховой окружностью) попадает в поле допуска $20 \pm 2\text{ мкм}$ (на рисунке выделен

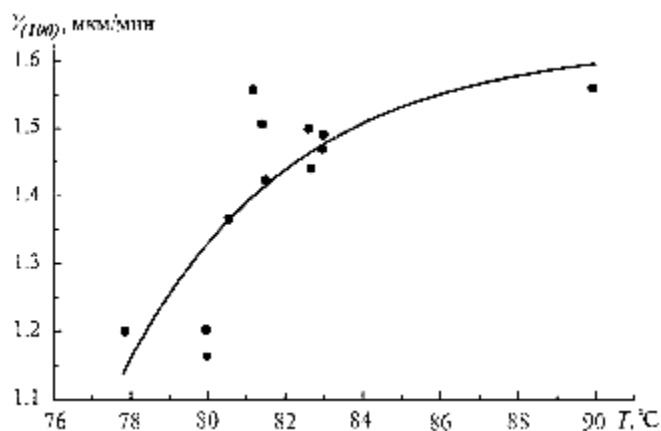


Рис. 7. Экспериментальная зависимость скорости травления кремния ориентации (100) от температуры раствора КОН ($C_{\text{кон}} = 30\%$)

жирными линиями). Точность получения мембраны данным методом в основном определяется точностью изготовления эпитаксиального слоя (которая обычно составляет $\pm 10\%$), поэтому колебания толщины мембраны можно объяснить неравномерностью выращивания эпитаксиального слоя.

Одной из основных задач при реализации процесса анизотропного травления является создание системы защиты необрабатываемой стороны пластины и подводимых к ней электрических контактов от воздействия агрессивной щелочной среды при условии длительной обработки (4...6 ч) и повышенной температуры (70...90°C). Для решения данной задачи были испытаны кассеты из различных материалов (фторопласт, коррозионно-стойкая сталь), различной конструкции (с винтовой и фланцевой крышкой) и различными герметизирующими материалами (воск, оплавленный полиэтилен, тонкослойный фторопласт, химически стойкая резина). В результате опытов установлено, что оптимальным является использование кассеты из коррозионно-стойкой стали с винтовой крышкой и двусторонней герметизацией пластины химически стойкой резиной.

Для проведения экспериментов разработана и изготовлена герметичная кассета из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, которая не поддается воздействию горячей щелочи. Электрические провода для подачи к пластине потенциалов проведены внутри трубчатого держателя кассеты и также защищены от воздействия травителя.

По результатам экспериментального травления можно сделать вывод, что оптимальными условиями проведения процесса с точки зрения производительности и надежности являются:

- концентрация травителя КОН 30 %;
- рабочий диапазон температур 80...90°C, при этом скорость травления составляет 1,2...1,6 мкм/мин;
- максимальная температура раствора определяется стойкостью маскирующего покрытия;
- подаваемый на пластину потенциал 1,0 В.

Для повышения производительности процесса обработку следует вести при максимальной температу-

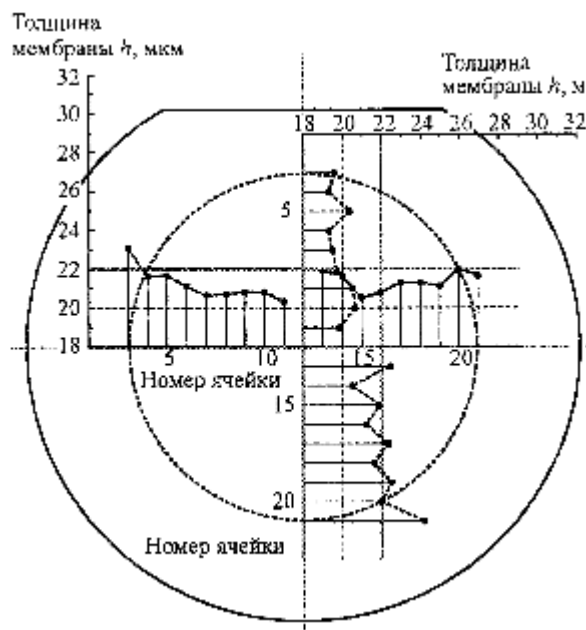


Рис. 8. Разброс толщины мембраны по пластине после экспериментального травления

ре, определяемой стойкостью маскирующего покрытия. В качестве критерия завершения процесса следует выбирать начало стабилизации силы тока I_{n-p} . Для защиты топологии пластины необходимо использовать герметичные кассеты из коррозионно-стойкой стали.

Список литературы

1. Petersen К.Е. Silicon as a mechanical material // Proc. IEEE, 70, 1982. P.420-457.
2. Корляков А.В., Лучинин В.В. Перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. 1999. № 1. С.12-15.
3. Bassous E. Fabrication of novel three-dimensional microstructures by the anisotropic etching of (100) and (110) silicon // IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, 1978. P. 1178.
4. Jolly R.D., Muller R.S. Miniature cantilever beams fabricated by anisotropic etching of silicon // J. Electrochem. Soc., 127, 1980. P.2750-2754.
5. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
6. Smith R.L., Kloeck B., De Rooij N., Collins S.D. The potential dependence of silicon anisotropic etching in KOH at 60 °C // J. Electroanal. Chem., 238, 1987. P. 103-113.
7. Linden Y., Tenerz L., Tiren J., Hok B. Fabrication of three-dimensional structures by means doping-selective etching // Sensors and Actuators 16, 1989. P. 67-82.
8. Иващенко Е.И., Цветков Ю.Б. Экспериментальное исследование электрохимической остановки анизотропного травления кремния // Высокие технологии в промышленности России (Материалы V междуна. научно-технологической конф.). М., 1999. С. 72-76.
9. Иващенко Е.И., Цветков Ю.Б. Формирование чувствительного элемента полупроводникового датчика методом анизотропного травления с электрохимической самоостановкой процесса // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Гурзуф, 1998. С. 21.
10. Цветков Ю.Б., Иващенко Е.И. Микрообработка монокристаллического кремния при изготовлении изделий микромеханики // Машиностроительные технологии (Тез. докл. Всероссийской научно-технической конф.), 1998. С. 232-234

УДК 535.312

В.А. Быков, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.,
Гос. НИИФП, НТ-МДТ,
тел. (095) 535-03-05, факс (095) 535-64-10,
e-mail: spm@ntmdt.zgrad.ru,
http://www.ntmdt.ru

МИКРОМЕХАНИКА ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Описаны возможности и перспективы развития чувствительных элементов для сканирующей зондовой микроскопии. С помощью острых щупов на пружинящих балках – кантилеверов – в настоящее время можно измерять распределение ван-дер-ваальсовых, электростатических, магнитных, электродинамических, адгезионных сил, сил трения, тепловых полей, проводимости. Кантилеверы могут быть использованы и в качестве инструментов для модификации поверхности.

Рассмотрены технологические подходы к изготовлению кантилеверов, дан обзор продукции фирм – производителей, обсуждены результаты последних разработок по созданию сложных зондовых систем.

Анализ тенденций развития показывает, что прогресс в зондовой микроскопии и нанотехнологии будет связан с усложнением и интеллектуализацией зондовых инструментов.

Введение

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) – это приборы для анализа поверхности с помощью твердотельных зондовых сенсоров. С использованием СЗМ имеется возможность получать карты распределения целого ряда физических и физико-химических характеристик поверхности, таких как топография, распределение при поверхностных электростатических, магнитных, электродинамических сил, адгезионных сил, сил трения, тепловых полей, теплопроводности, электропроводности с высоким пространственным разрешением вплоть до атомного. Это стало возможным, с одной стороны, благодаря развитию аппаратных средств и программного обеспечения, а с другой – благодаря созданию зондов специальных типов.

Зондами в СЗМ являются острые иглы. В туннельных микроскопах – это специальным образом заточенные металлические или полупроводниковые проводящие иглы, в ближкопольной оптической микроскопии – заостренные световые волокна, в сканирующей силовой микроскопии – иглы, закрепленные на упругих балках – кантилеверах (рис. 1). Угол наклона балки в процессе сканирования регистрируется и может либо пересчитываться в рельеф – при этом сила в процессе сканирования будет изменяться, либо поддерживаться постоянным вертикальным перемещением кантилевера или образца,

а это перемещение, осуществляемое для поддержания постоянного угла наклона кантилевера специальной подвижкой, и будет определять рельеф поверхности. Описанный режим измерения рельефа называется *контактным сканированием*. В процессе контактного сканирования между образцом и кончиком кантилевера с одной стороны действуют ван-дер-ваальсовы силы отталкивания, экспоненциально возрастающие с уменьшением расстояния, а со стороны упруго деформированной балки кантилевера – сила упругости и, в случае измерений на воздухе, капиллярные силы (как правило, это силы притяжения). Именно последними определяются минимальные силы в процессе контактного сканирования. Диапазон этих сил $1 \div 5 \cdot 10^{-9}$ Н. В случае, если радиус кривизны зонда кантилевера меньше 10 нм, в системе зонд – поверхность развивается давление больше $1,5 \cdot 10^8$ Па (1500 атм.), что приводит к пластическим деформациям большинства органических материалов.

Существует возможность значительно (до 1000 раз) снизить давление на образец. Для этого регистрируют не изменение угла наклона балки кантилевера, а изменение амплитуды ее резонансных колебаний. Такой режим называют *полуконтактным* или, по терминологии, введенной в обиход компанией Digital Instruments, "теппинг" (постукивание) – режимом сканирования. При этом поверхность ощупывают колеблющимся зондом в режиме малых резонансных колебаний консоли. Колебания консоли кантилевера возбуждают пьезоакустическим элементом 5 (рис. 1). Амплитуду колебаний иглы устанавливают в диапазоне 1–50 нм и считывают фотодиодом 4 как сумму переменных сигналов в секциях.

На рис. 2 приведены изображения одной и той же полимерной мембраны, выполненные в режимах контактного и полуконтактного сканирования. Из сравнения рис. 2, а и 2, б легко видеть, что в процессе

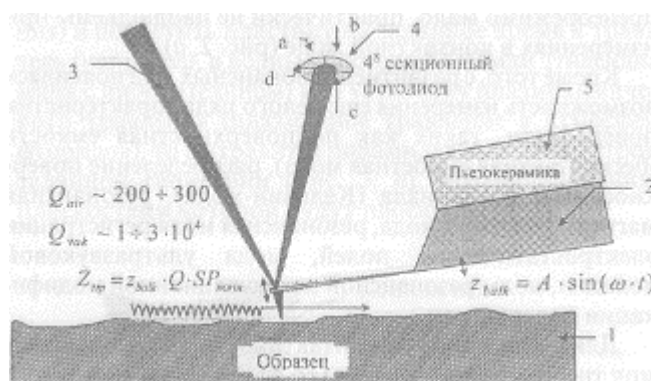


Рис. 1. Принцип работы сканирующего зондового микроскопа с оптико-позиционной схемой регистрации положения кантилевера:
1 – образец, 2 – кантилевер, 3 – лазерный луч регистрирующей системы, 4 – 4-секционный фотодиод (о, б, с, д – секции фотодиода) для регистрации перемещения отраженного от кантилевера луча лазера, 5 – пьезоакустический вибратор, возбуждающий колебания кантилевера,
 Z_{bal} – мгновенное значение амплитуды колебания чипа кантилевера, Z_{tot} – мгновенное значение амплитуды колебания конца балки кантилевера; Q – добротность кантилевера на возбуждающей частоте

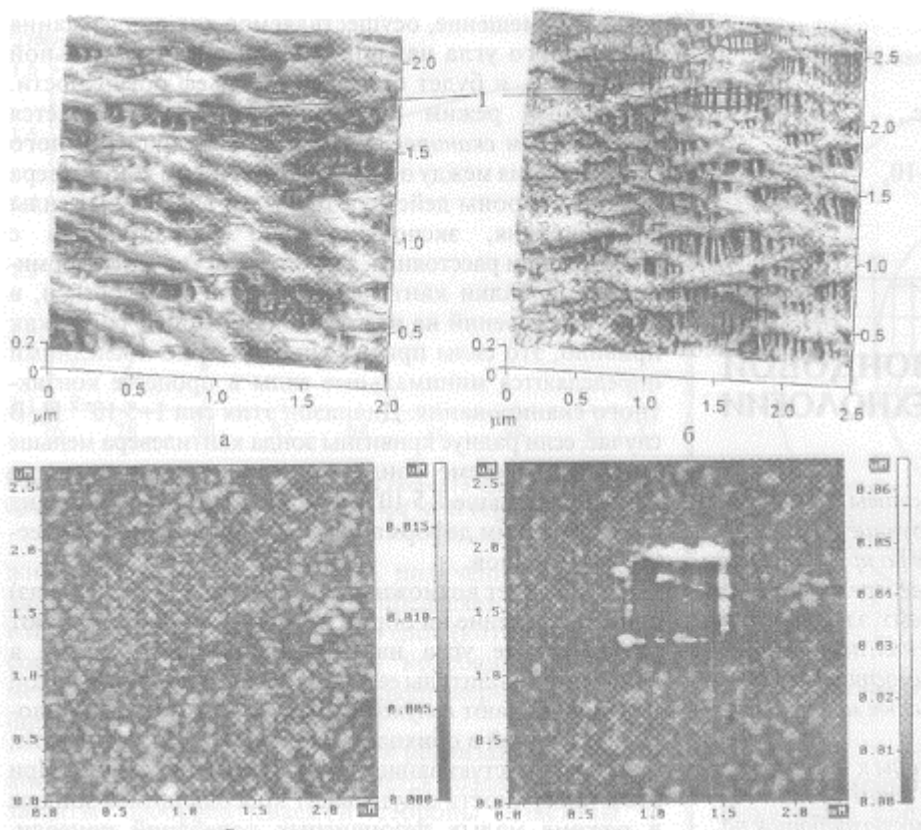


Рис. 2. Атомно-силовое изображение топографии поверхности полимерных пленок, выполненные в режиме контактного (а) и полуконтактного (б, в, г) сканирования. Квадрат в центре рисунка (г) появился в результате сканирования пленки (в) в контактом режиме с силой прижима порядка 100 нН

контактного сканирования наблюдается существенная деформация поверхностных структур данного образца. "Тяжи" на мембране, которые хорошо наблюдаются при измерениях как в полуконтактной моде 1 (рис. 2, б), так и в электронном микроскопе, где давление на образец пренебрежимо мало, практически не наблюдаемы при измерениях в контактной моде (рис. 2, а).

Кроме того, с развитием резонансных мод появилась возможность измерения еще целого ряда характеристик поверхности, таких как подповерхностная емкость (бесконтактная емкостная мода), распределение поверхностного потенциала (Кельвин-мода), резонансная магнитно-силовая мода, резонансная мода регистрации электростатических полей, мода ультразвуковой локации, моды резонансной и модуляционной модификации поверхности.

Для реализации как контактных, так и резонансных мод требуются кантилеверы со специальными и заданными характеристиками.

Несмотря на то, что атомно-силовая микроскопия была изобретена еще в 1986 г. [1], она начала интенсивно развиваться и получила широкое распространение только с 1990 г. после изобретения групповой технологии изготовления кантилеверов [3-10]. Для создания кантилеверов было предложено использовать технологию кремниевой микромеханики. В основе этой техно-

гии лежит классическая микроэлектронная технология с использованием процессов легирования, формирования окисных слоев, фотолитографических процессов, процессов травления. Для изготовления одинаковых игл кантилеверов особую и исключительно важную роль играют эффекты селективного травления, позволяющие производить иглы, тождественные с точностью до единиц нанометров. Балки заданной и повторяемой толщины получают либо применением стоп-слоев и путем легирования кремния бором или фосфором на заданную глубину, либо напылением пленочных структур заданной толщины.

Одновременно были разработаны кантилеверы из Si_3N_4 и монокристаллического Si, которые в основном и применяются на практике.

1. Геометрия и физические свойства кантилеверов

Для современной зондовой микроскопии существенными являются следующие параметры кантилеверов:

- жесткость;
- резонансные частоты;
- добротность;
- радиус кривизны зонда;
- форма иглы;
- тип покрытия на поверхности иглы кантилевер (магниточувствительные слои, проводящие слои, диэлектрические покрытия, твердые покрытия).

Физически современные кантилеверы изготавливаются в виде чипов шириной $1,6 \pm 0,1$ мм, длиной 3,5-4 мм, толщиной 0,35-4 мм. Чувствительными элементами являются балки с заданной жесткостью и резонансной частотой с острыми иглами или без них на свободных концах. Балки могут иметь форму прямоугольных полос, треугольников, трапеций, многоугольников в зависимости от функционального назначения.

Силовые и резонансные свойства балок кантилеверов. Рассмотрим механические свойства простейшего безыгольчатого кантилевера в виде балки в форме параллелепипеда длиной L , толщиной l и шириной w .

Если взять упругую балку с эффективной массой M , геометрическими размерами L , w , h (рис. 3), жесткостью k в среде с затуханием H , колеблющуюся под действием периодической раскачки держателя вдоль оси Z ($z_{\text{ball}} = a \cos(\omega t)$), то в отсутствие внешних сил малую деформацию $u(x, t)$ можно описать известным уравнением [2]

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + H \frac{du}{dt} + k[u - \cos(\omega t)] = 0. \quad (1)$$

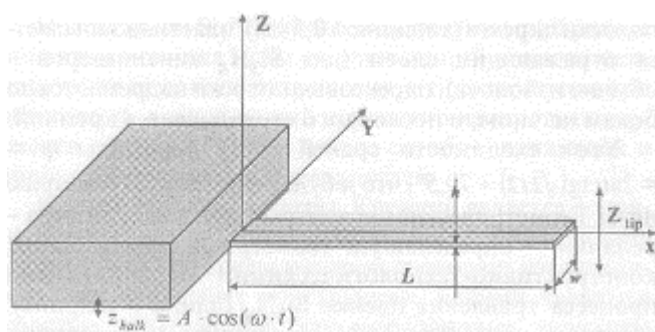


Рис. 3. Кантилевер в виде прямоугольной балки

Тогда, если амплитуда колебаний балки при $x = 0$ равна a , то в соответствии с (1) амплитуда колебаний свободного конца балки будет определяться выражением

$$U(\omega) = \frac{a}{\left| 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{i}{Q} \frac{\omega}{\omega_0} \right|} = \frac{a}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \frac{1}{Q^2} \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}}, \quad (2)$$

где $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ – первая резонансная частота балки; $Q = k / (H \omega_0)$ – добротность колебаний балки.

Жесткость кантилеверов k_z , и резонансная частота f_R для балки в форме параллелепипеда связаны с их геометрическими параметрами и упругими константами материала балки следующими соотношениями [6, 11]:

$$k_z = \frac{E t^3 w}{4 L^3}, \quad f_R = 0,162 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3)$$

а его торсионная жесткость

$$k_\psi = \frac{E t^3 w}{6(1+n) L h},$$

где t – толщина; w – ширина; L – длина кантилевера; E – модуль упругости (для кремния $E = 1,45 \cdot 10^{11}$ Н/м²); ρ – плотность материала балки (для кремния $\rho = 2330$ кг/м³), h – длина иглы; n – отношение Пуассона (0,3).

Для кантилеверов с V-образными балками

$$f_R = a \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где $a = 0,194 \div 0,284$ в зависимости от конкретной геометрии балки, а силовая константа k_z^Δ при этом определяется выражением

$$k_z^\Delta = \frac{E t^3 w}{2 L^3}.$$

Иглы и методы изготовления кантилеверов. Для недеформируемых поверхностей и жесткого кантилевера изображение в СЗМ – это свертка реального профиля поверхности и формы зонда (рис 4)

Если решение прямой задачи – вычисление СЗМ изображения известной поверхности при использовании зонда известной формы (задача конволюции) – большо-

го труда не представляет, то обратная задача – восстановление геометрического профиля поверхности по измеренному СЗМ изображению – даже при известной форме иглы (задача деконволюции) точного решения не имеет. Например, показанная на рис 4 полость никакого вклада в СЗМ изображение практически не дает.

Очевидно, что точность решения задачи деконволюции тем выше, чем меньше радиус кривизны иглы и чем меньше угол сходимости конуса иглы. Задача деконволюции упрощается для игл "правильной" формы.

Первые кантилеверы изготавливались вручную. Материалом балки служила тонкая платиновая фольга, а иглы просто приклеивались [1]. Материалом игл служил бой монокристаллов (сапфир). Технология была сложной и неповторяемой, а результаты измерений – только качественные.

Решение было найдено [3-10] применением групповой технологии изготовления чипов с использованием эффектов селективного анизотропного травления. В определенных условиях травление монокристалла может происходить анизотропно. Можно подобрать такие условия, когда скорость травления v_{ijk}^{mp} вдоль граней с

меньшей спаянностью существенно ниже, чем вдоль других направлений. Для кремния плоскостью наименьшей спаянности или, что то же самое, легчайшего скола или наименьшей поверхностной энергии является плоскость (111). Скорости травления вдоль плоскостей (100) и (111), (411) могут различаться более чем в 100 раз:

$$v_{Si(100)}^{mp} / v_{Si(111)}^{mp} > v_{(100)}^{mp} / v_{(411)}^{mp} \geq 100.$$

Использование этого эффекта позволяет делать как пирамидальные лунки, так и иглы заданной формы.

Пленочные кантилеверы. Если взять пластину Si(100), фотолитографией выделить лунку травления (остальную часть пластины защитить фоторезистом или другой защитной пленкой, например нитридом кремния) и поместить пластину на заданное время в травитель (например, в водный раствор КОН или этилендиамина с пирокатехином) или установку плазмохимического травления (плазменное травление в атмосфере фторидов), то вытравится пирамидальная лунка строго заданной геометрии (рис. 5, а), ограничивающими плоскостями которой будут плоскости (111).



Рис. 4. Имитация процесса получения СЗМ изображения с помощью реального зонда

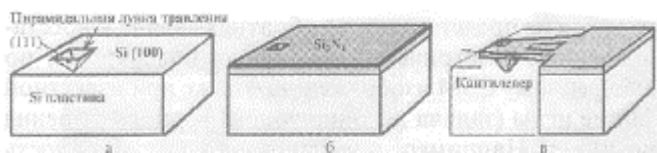


Рис. 5. Основные стадии процесса получения кантилеверов из Si_3N_4

После травления лунок поверхность кремния покрывают аморфной пленкой заданной толщины, например Si_3N_4 , которая полностью повторяет рельеф поверхности (рис. 5, б). Затем делается форма балки кантилевера (фотолитография и травление Si_3N_4) (рис. 5, в), на верхнюю сторону пленки приклеивают

полоски пирекса (толщиной 0,5 мм), пластина запыляется отражающим слоем (для Si_3N_4 кантилеверов – обычно из золота), пирексовые полоски надрезаются по бокам на чипы, и после этого стравливается кремний.

Угол сходимости граней (111) пирамиды $\varphi =$

$2 \arctg(\sqrt{2}/2) \approx 70,5^\circ$, что и будет определять геометрию иглы. Геометрические параметры такого кантилевера – реплики – определяются геометрией фотошаблона, конструктивно-технологическими ограничениями процесса травления пленки Si_3N_4 (длина и ширина), режимом нанесения Si_3N_4 (толщина) и условиями травления лунок (параметрами игл).

Для чисто пирамидальных ($70,5^\circ$) игл характерные радиусы кривизны лежат в диапазоне 30-50 нм. Применение дополнительного режима травления позволяет изготовить двухступенчатую пирамидку с углом при вершине $\varphi = 36^\circ$ (приблизительно соответствует пересечению граней (211)). В этом случае удастся получить иглы с радиусом кривизны порядка 20 нм.

Кантилеверы этого типа производятся фирмой "ThermoMicroscope" (CA, USA) (рис. 6). Технологическими тонкостями производства являются изготовление ненапряженных или компенсированных балочных структур. Это позволяет сохранить плоскость реплики (балок кантилеверов) после стравливания кремния и точность приклейки пирекса, что обеспечивает повторяемость длины балок.

Кантилеверы этого типа благодаря высокой прочности нитрида кремния могут быть сделаны очень тонкими вплоть до 0,5 мкм и мягкими с силовой константой $k_z^A \leq 0,01$ н/м, что обеспечивает возможность прецизионных неразрушающих измерений топографии, в том числе и в жидких средах. Другим преимуществом нитридных кантилеверов является высокая химическая стойкость, которая позволяет применять их для изучения процессов в агрессивных средах, например процессов анизотропного травления кремния [19].

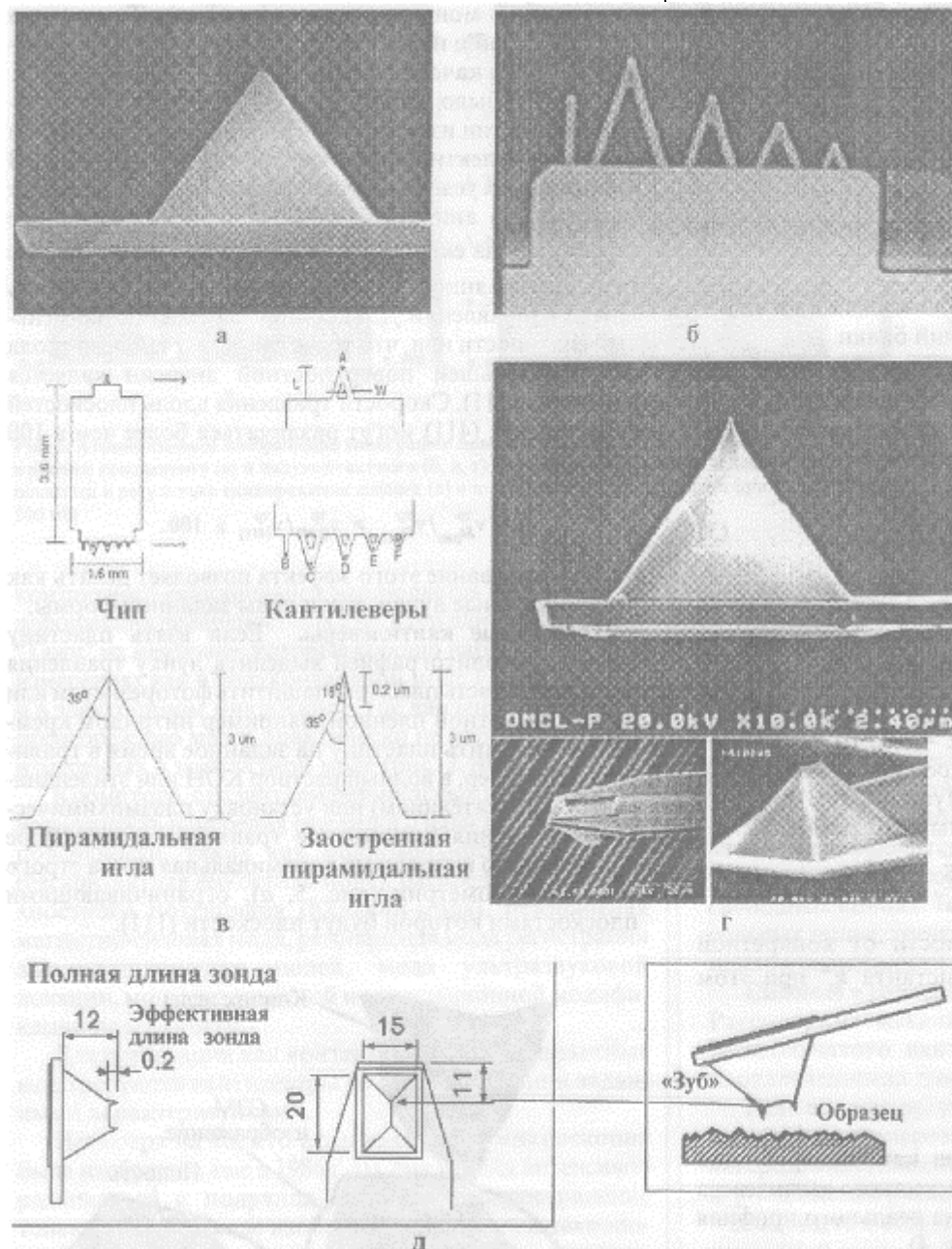


Рис. 6. Электронно-микроскопическая фотография отдельной иглы (а), чипа с кантилеверами (б), эскизных чертежей кантилеверов и игл (в) производства компании ThermoMicroscope, CA, USA и два типа пирамидальных Si_3N_4 одно- и двухигольчатых кантилеверов фирмы "Olympus Optic", Япония (г-д)

Недостатком Si_3N_4 зондов является большой радиус кривизны кончика иглы, исключающий возможность получения высокого разрешения, и большой угол при вершине, не позволяющий корректно измерять поверхности с особенностями в виде столбиков, канавок и вообще шероховатых поверхностей.

Кремниевые кантилеверы. Кремний является основным материалом микроэлектроники, модификация кристаллической среды которой позволяет изготавливать как каркасные конструкции, какими являются простые кантилеверы, так и различные варианты сенсоров, датчики изгиба, активные функциональные элементы. Тем не менее, основным элементом сенсора атомно-силового микроскопа является игла на балке, прикрепленной на теле чипа, и именно эта конструкция в настоящее время пользуется спросом на рынке. Принимая во внимание все интереснейшие возможности кремния, остановимся на технологических и конструктивных особенностях простейшего кремниевого кантилевера.

Цикл изготовления пассивных кремниевых кантилеверов включает:

- формирование кремниевых столбиков, из которых последующим заострением будут выполнены иглы;
- формирование консоли;
- нанесение отражающего покрытия;
- разделение пластины на отдельные чипы.

В настоящее время известны три варианта технологии изготовления кремниевых кантилеверов, различающиеся способом формирования кремниевых столбиков и способами изготовления консоли.

В первом варианте используется технологическая возможность выращивания на поверхности кремния столбиков длиной до долей миллиметра. На основе этого эффекта был предложен способ изготовления кантилеверов [20, 21], хотя в настоящее время кантилеверы этим способом не производятся. Несмотря на привлекательность метода (столбики можно выращивать требуемой длины и имеется возможность предварительно сформировать однородный, не возмущенный наличием столбиков стоп-слой для консоли), предлагаемая технология не лишена недостатков, главный из которых состоит в том, что рост вискероов возможен лишь на плоскости кремния (111). При этом сложно строго выдержать геометрию чипа в месте стыковки балки и чипа. Эта сложность возникает из-за того, что скорость травления по плоскости (111) минимальна, а именно эта плоскость будет плоскостью чипа. К тому же пропадает возможность автоматического (определяемого кристаллографией кремния) воспроизводства угла стыковки тела чипа и балки кантилевера. Эта же причина делает разброс по длинам кантилеверов значительным, а от этого параметра в сильной степени зависит резонансная частота и жесткость кантилевера (3). Кроме того, иглы будут отличаться повышенной хрупкостью, так как при такой ориентации пластины плоскость наилегчайшего скола (111) оказывается перпендикулярной оси иглы.

В двух других технологиях, которыми пользуются производители кантилеверов, столбики под иглы

формируют изотропным травлением пластины. Различие технологий состоит в том, что в одной (В-технология) стоп-слой, определяющий толщину консоли, изготавливается диффузией бора в кремнии, а в другой (Р-технология) травление консоли осуществляется электрохимически и глубинное травление прекратится, когда травление достигло предварительно организованного в кремнии $p-n$ -перехода. Кроме того, в Р-технологии стоп-слой формируют до травления столбиков.

Преимуществом В-технологии является автоматический контроль толщины балки кантилевера по пластине, поэтому разброс характеристик кантилеверов, обусловленный разнотолщинностью, практически отсутствует. Кроме того, балки и иглы кантилеверов автоматически имеют высокую проводимость, так как уровень легирования, необходимый для формирования стоп-слоя, в этой технологии составляет порядка $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Это же, в свою очередь, является недостатком в случае, если имеется необходимость формирования функциональных структур (даже пары резисторов для тензорезисторного считывания угла изгиба кантилевера) на балке и теле кантилевера. Кроме того, из-за особенности последовательности формирования структуры игла является маской при формировании стоп-слоя на кремниевой балке. Из-за этого после формирования балки на отражающей поверхности кантилевера над иглой образуется лунка, которая, с одной стороны, приводит к потерям при отражении, а с другой – указывает местоположение иглы.

В Р-технологии остановка процесса глубинного травления осуществляется автоматически, так как используется электрохимическое травление, и при достижении $p-n$ -перехода возникает скачок напряжения, и травление останавливается. Достаточная степень легирования в Р-технологии составляет $10^{15}-10^{16} \text{ см}^{-3}$, что допускает формирование активных структур. При использовании Р-технологии процесс формирования структуры следующий: первоначально диффузией фосфора формируется глубоко залегающий $p-n$ -переход. Глубина залегания $p-n$ -перехода задается равной сумме длины иглы и толщины консоли. После этого формируются столбики под иглы травлением n -слоя. Контроль травления проводят по времени. После этого глубинным электрохимическим травлением с обратной стороны формируют балку. Маскирующего эффекта здесь не возникает в принципе, и лунка над иглой не образуется, однако отсутствует автоматический контроль толщины балки и возможен разброс характеристик кантилеверов по пластине. Поэтому требования к Р-технологии более жесткие, чем в В-технологии.

В настоящее время ведущие производители используют как Р-, так и В-технологии в зависимости от требований к конкретному виду кантилеверов.

На рис. 7-10 приведены конструкции и геометрические характеристики простых кремниевых кантилеверов, которые производятся в настоящее время. Если не применять специальных процедур заточки игл, то углы при вершине кремниевых кантилеверов получаются близкими углам схождения граней (111), (211), (311)

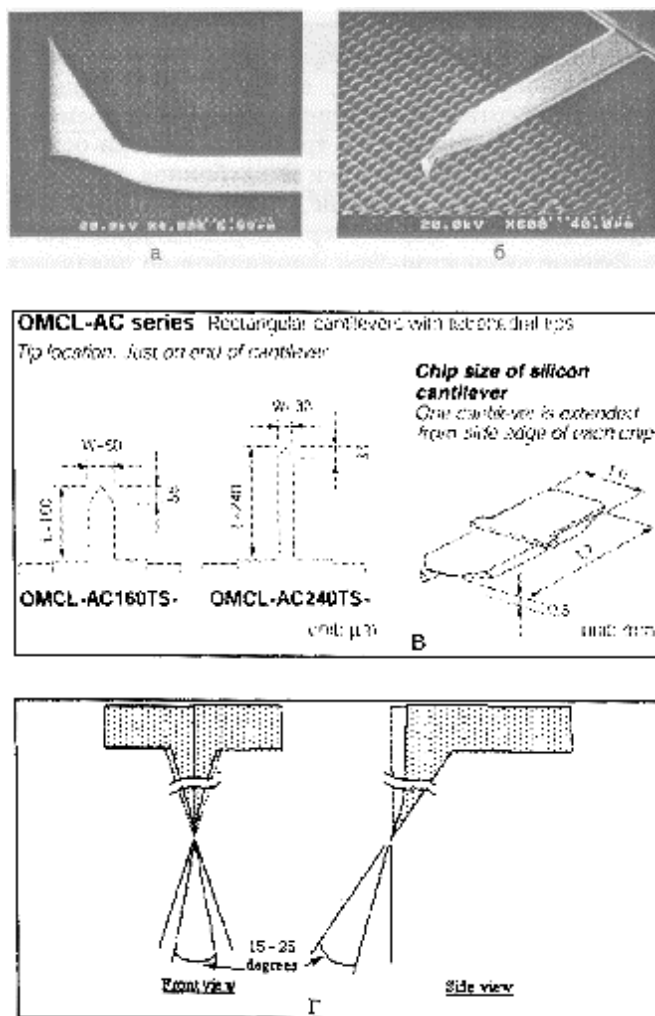


Рис. 7. Промышленные кантилеверы фирмы "Olympus" (Япония): а-б – электронно-микроскопическая фотография кремниевых кантилеверов, в-г – конструкция

(411). Углы этих граней относительно нормалей к поверхности равны $\varphi_{\perp(i11)} = \arctg \frac{\sqrt{2}}{2i}$, что составляет

соответственно 35,26° (рис. 9, д), 19,47°, 13,26°, 10,02°. В зависимости от исходной ориентации пластины, геометрии столбика и условий травления можно добиться строгой повторяемости параметров игл. Радиус кривизны кремниевых игл обычно находится в диапазоне 5-15 нм и строго не контролируется. При отработанной технологии с вероятностью порядка 80 % удастся гарантировать радиус кривизны кремниевых игл не хуже 10 нм. На рис 11 приведено электронно-микроскопическое изображение кончика иглы кремниевых кантилевера. Изображение было получено на электронном микроскопе высокого разрешения в институте Макса Планка г. Штутгарда. У этой иглы радиус кривизны не превышает 1,5 нм. Фирма "NanoSensor" разработала технологию дополнительной заточки кремниевых игл (см. рис. 8, в, г), которая

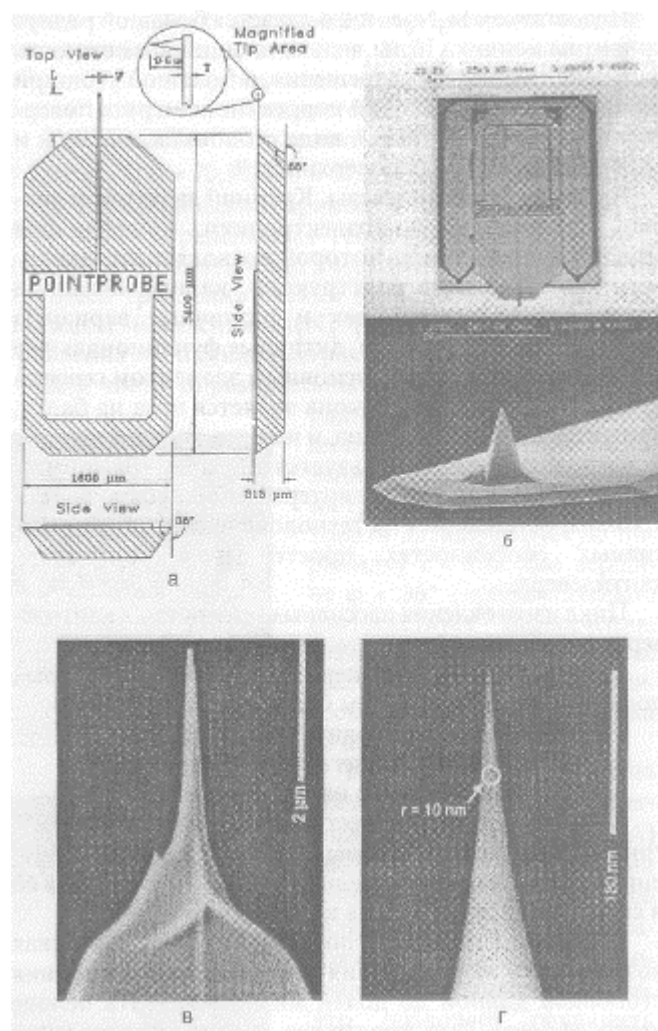


Рис. 8. Промышленные кантилеверы фирмы "NanoSensor" (Германия): а – конструкция, б – электронно-микроскопическая фотография кремниевых кантилеверов в оправке, в – заостренная кремниевая игла на конце кремниевых кантилеверов, г – кончик заостренной кремниевой иглы

гарантированно обеспечивает с вероятностью 80 % радиус кривизны острия менее 2 нм при угле сходимости 8-10° на длине до 2 мкм (аспектное отношение 1:5-1:7).

При исследованиях в СЗМ возникает ограничение, связанное с геометрией иглы и геометрическими особенностями установки кантилеверов. В зависимости от особенностей способа крепления кантилевера в различных приборах угол наклона чипа по отношению к образцу колеблется в пределах 10–20°. При этом могут существовать области, в которых изображение в основном определяется формой иглы и геометрией ее крепления (рис.12).

Для конических и пирамидальных кантилеверов в приближении нулевого радиуса кривизны или области недовосстановления определяется простыми выражениями (рис. 12). При $\psi \leq \alpha$, что выполняется для кремниевых кантилеверов фирм "NanoSensor", НТ-МДТ, "Силикон-МДТ", "Thermoscope" для конструкций, у которых угол крепления кантилевера $\alpha \geq 15^\circ$ (в микроскопах фирмы

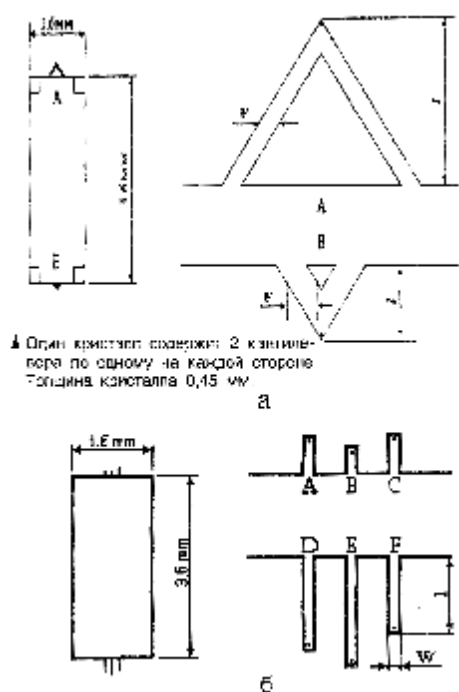


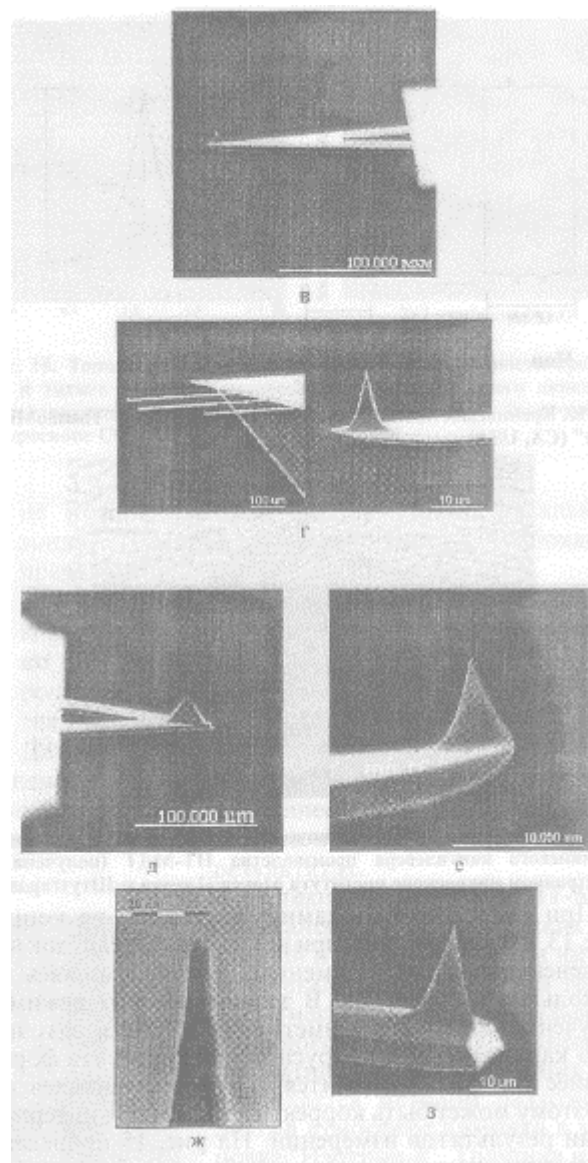
Рис. 9. Промышленные кантилеверы фирмы НТ-МДТ к "Силикон-МДТ" (Зеленоград, Россия):

а, б – конструкции, в, г–з – электронно-микроскопические фотографии кремниевых кантилеверов

НТ-МДТ $\alpha = 20^\circ$), область недовостерности L_ψ для ступеньки определяется только радиусом кривизны иглы. Область недовостерности для конических кантилеверов с углом сходимости 22° ($\varphi = 11^\circ$) и $\alpha = 20^\circ$ получается значительной и составляет $L_\varphi = 0,6 h_2$. Это обстоятельство ставит под сомнение целесообразность использования СЗМ для решения метрологических задач в субмикронной электронике, где требуется проводить измерения канавок, в том числе качества "дна", с шириной до 0,2 мкм при глубине до 1 мкм.

Кантилеверы с вискерами на остриях. Решение задачи по уменьшению "мертвой зоны" при измерениях "глубоких" колодцев потребовало разработки специальной технологии производства кантилеверов, позволяющей строго контролировать рост вискеров на кончике иглы кантилевера. Возможность электрон-стимулированного роста вискеров известна давно. В настоящее время фирмы "NanoTOOLS" и НТ-МДТ уже создали основы технологии электрон-стимулированного роста вискеров. Пока еще стоимость кантилеверов с вискерами на концах высока, но после отработки и автоматизации ряда операций ее, возможно, удастся снизить.

В фирме НТ-МДТ вискеры (рис. 13) выращиваются следующим образом. Рост вискера инициируется сильно сфокусированным электронным лучом и осуществляется в установке электронно-лучевого экспонирования. Движение луча в процессе роста вискера и доза экспонирования в процессе роста задаются программно. По окончании процесса геометрия выращенного вискера контролируется той же установкой с переходом в режим растрового электронного микроскопа. Предусмотрены



подача и контроль исходного материала для роста вискеров. Электронографический анализ показывает, что по своей структуре материал вискера соответствует аморфному углероду. Измерения зависимостей силы взаимодействия этих зондов с поверхностью показали, что они гидрофобные, при этом подвижный водный адсорбционный слой на них не обнаружен.

Созданная технология позволяет выращивать объемные структуры заданной сложной формы (рис. 14). Толщина вискеров может составлять 50–100 нм, радиус кривизны до 3 нм, длина до 3 мкм (может быть наперед заданной с точностью 20–30 нм), что делает иглы такого типа чрезвычайно перспективными для применений как в аналитической атомно-силовой микроскопии, так и в нанотехнологии.

Комбинация групповых методов микромеханики и методов электрон-стимулированного направленного роста структур открывает возможности создания сложных инструментальных устройств.

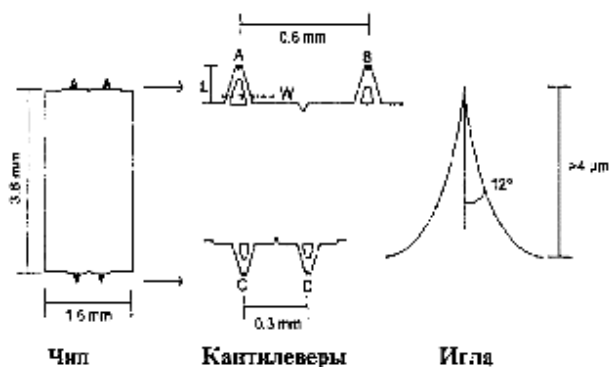


Рис. 10. Кремниевые качилеверы производства фирмы "ThermoMicroscope" (CA, USA)

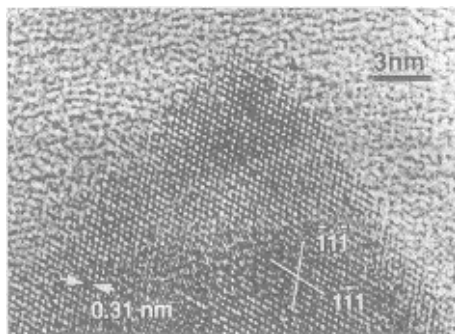


Рис. 11. Электронно-микроскопическая фотография кончика иглы кремниевого качилевера производства НТ-МДТ (поточена на электронном микроскопе института Макса Планка г. Штутгарда)

При измерениях зондами с вискерами на концах (рис. 13, 15) мертвая зона при исследовании канавок или ступенек значительно уменьшается, сокращаясь до нескольких нанометров. В зависимости от режимов получения вискер может иметь форму конуса, заточенного карандаша, многоярусной башни, но эта форма заранее известна (содержится в паспорте качилевера) и поэтому может быть корректно учтена при интерпретации результатов измерений. На рис 15 приведены результаты измерений тестового образца субмикронных размеров обычным кремниевым качилевером и качилевером с вискером на конце.

2. Модификация поверхности игл

Методами сканирующей зондовой микроскопии в дополнение к топографии имеется возможность измерения множества характеристик материалов.

С помощью зондов с проводящей поверхностью можно:

- измерять относительное распределение поверхностного сопротивления;
- работать в режимах туннельной микроскопии и спектроскопии;
- работать в режиме измерения относительного распределения работы выхода (Кельвин-мода);
- измерять относительное распределение поверхностной емкости;
- проводить токовую модификацию поверхности;
- измерять электрические характеристики поверхностных структур.

С помощью магниточувствительных зондов можно измерять распределение приповерхностных магнитных полей.

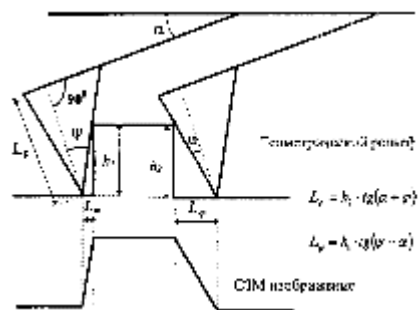


Рис. 12. Геометрический рельеф ступеньки и ее СЗМ изображение

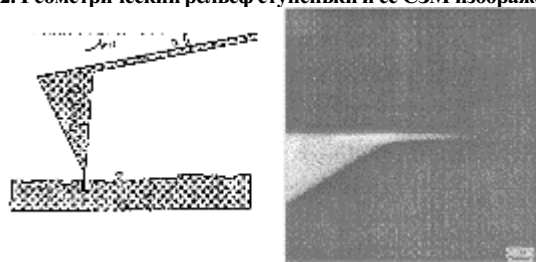


Рис. 13. Кремниевый качилевер с выращенным на конце вискером для исследований дна субмикронных "колодцев" с отвесными стенками (технология и производство НТ-МДТ)

Проводящие зонды с диэлектрической поверхностью позволяют:

- измерять распределение приповерхностных электростатических полей;
- работать в режиме измерения относительного распределения работы выхода (Кельвин-мода);
- измерять относительное распределение поверхностной емкости;
- проводить электростатическую модификацию поверхности с возможностью манипуляции кластерами, частицами на поверхности.

С помощью зондов с покрытиями из материалов высокой прочности (нитрид бора, алмазоподобные покрытия и т.д.) возможны:

- наноиндентация, измерение твердости приповерхностных структур;
- тензоиндуцированная модификация поверхности;
- маркировка поверхностей.

Зонды с покрытиями из электропластичных материалов позволяют осуществлять:

- модификацию поверхности;
- осаждение проводящих кластеров;
- формирование коммутации между элементами;
- коррекцию структур.

С помощью химически-модифицированных структур можно:

- измерять и интерпретировать распределение адгезионных сил;
- проводить качественные исследования поверхности;
- измерять механические свойства кластеров и молекул.

С помощью зондов со сформированными активными элементами на концах выполняют:

- измерение распределения приповерхностных тепловых полей;
- измерение распределения теплопроводности;
- термоиндуцированную модификацию поверхности;
- измерение распределения инфракрасного излучения от поверхности.

Приведенным выше не ограничиваются возможности зондовой микроскопии, но и из вышеназванного очевидно, что:

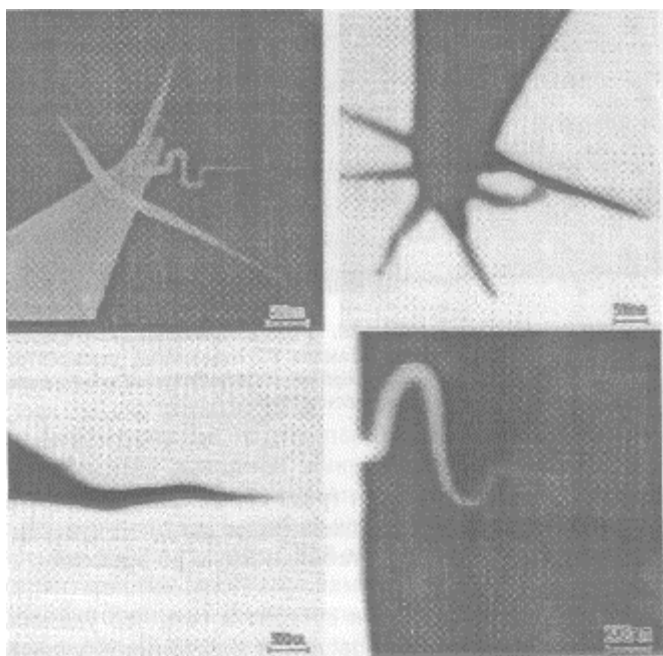


Рис. 14. Вискер-структуры, выращенные с использованием технологии электрон-стимулированного роста на кончиках игл кремниевых кантилеров (НТ-МДТ и лаборатория Г. М. Михайлова ИПТМ РАН)

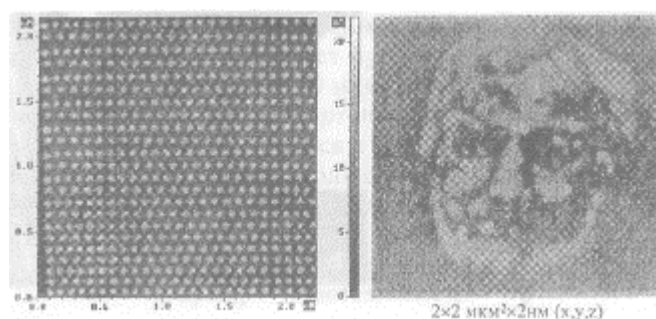


Рис. 16. Топографическое СЗМ изображение поверхности кремния (а) и титана (б) после процесса локального анодного окисления осциллирующим кантилером с покрытием W_2C (получено на микроскопе СОЛВЕР-Р47 (НТ-МДТ))

- не может существовать одного универсального зонда, способного интегрировать требования, предъявляемые в методиках исследований,
- для раскрытия аналитических и препаративных возможностей зондовой микроскопии, являющихся, по сути, сенсорными методами, исключительную роль играют свойства зондов, требующие разнообразия покрытий

Даже кратное изложение всех технологических приемов и результатов их применения займет слишком много места, поэтому далее остановимся только на кратком описании наиболее важных, по мнению автора, результатах.

В технологии фирмы НТ-МДТ для нанесения металлических покрытий и пленок оксидов и нитридов металлов используются технологии магнетронного и импульсного лазерного напыления. Нанесение покрытий из нитрида кремния осуществляется методом разложения $SiCl_4$ в атмосфере аммиака в установке "Изотрон-4". Толщина наносимых покрытий составляет 10–20 нм, что обеспечивает радиус кривизны зондов после модификации порядка 30 нм.

Проводящие углы. Проблема создания устойчивых проводящих кантилеров состоит в том, что большая часть металлических покрытий "сползает" под действием электрического поля с кончика кантилера. Оказалось, что устойчивые проводящие кантилеры получаются при нанесении на их поверхность W_2C , TiN , TiO , W , Cr . Проводимость покрытий лежит в диапазоне 5–150 мкОм·см. Наилучшие результаты по долговечности проводящих игл при их использовании в процессах анодного окисления поверхностей (рис 16) получаются с применением покрытия W_2C .

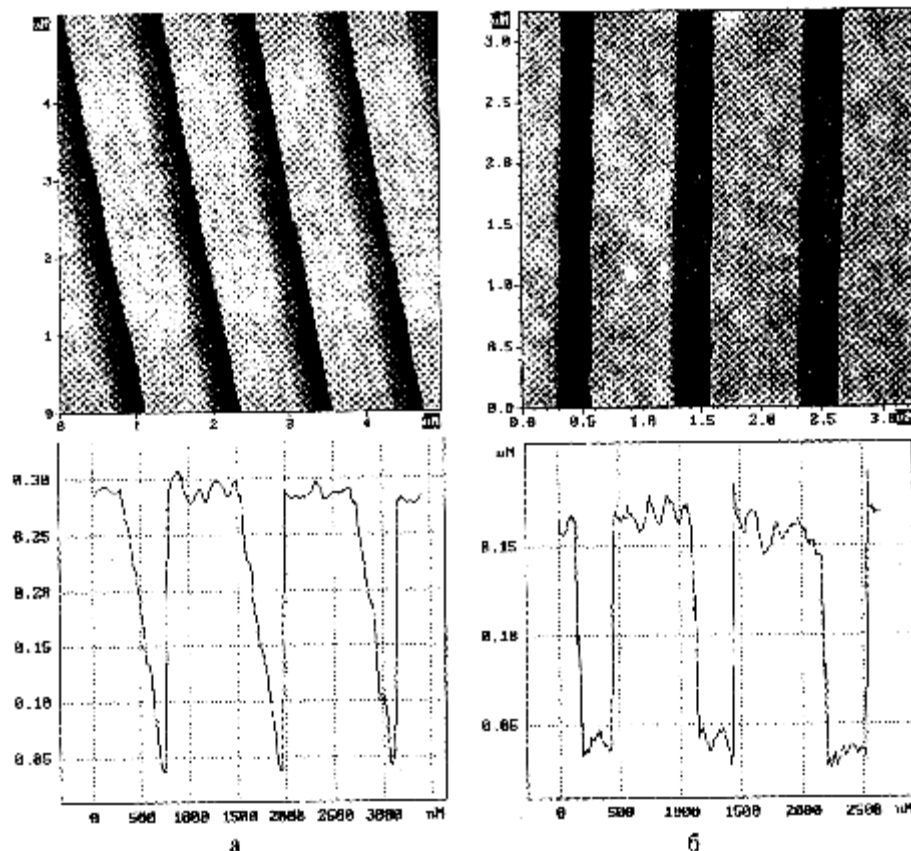


Рис. 15. СЗМ изображения субмикронных структур, (полученные (а) – стандартным кремниевым кантилером (см. рис. 8) и (б) (см. рис. 11) – кантилером с вискером на конце иглы

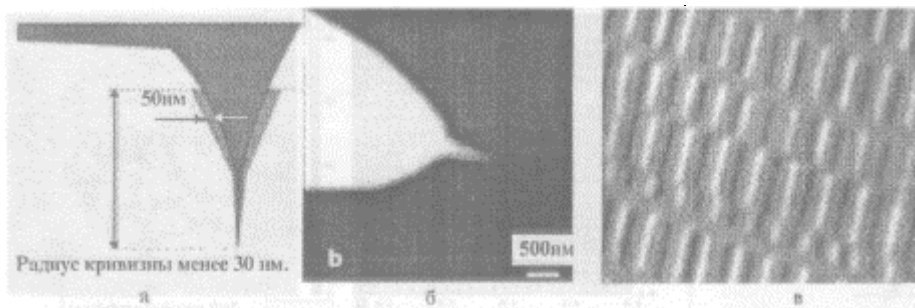


Рис. 17. Измерение магнитно-силового рельефа:

а – схема; б – РЕМ изображение кончика иглы с магниточувствительным покрытием из Со; в – магнитно-силовое СЗМ изображение ZIP драйвера (двухпроходная методика $\Delta Z = 10$ нм размер скана 55×55 мкм², прибор – СОЛБЕР-Р47)



Рис. 20 РЭМ-изображения кантилевера Дж. Мамина (Стенфордский университет, Калифорния, <http://www-snf.stanford.edu/Project#SNF95-041>)

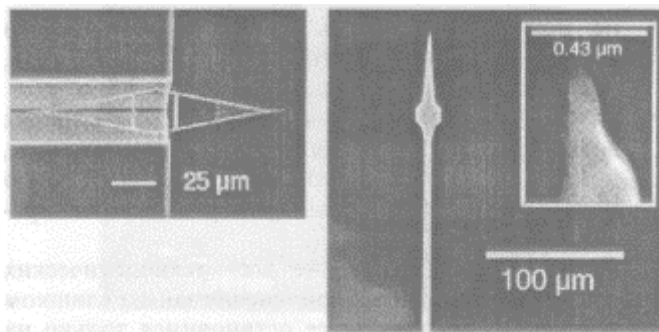


Рис. 18. РЭМ-изображение сверхвысокочувствительного кантилевера Т. Кенни и Д. Ругара (Стенфордский университет, Калифорния <http://www-snf.stanford.edu/Project#SNF97-038>)

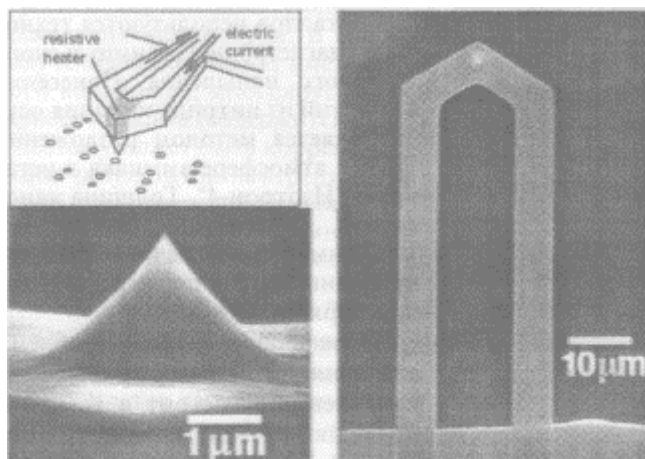


Рис. 19. Схема и РЭМ-изображения термокантилевера Т. Кенни и Дж. Мамина (Стенфордский университет, Калифорния, <http://www-snf.stanford.edu/Project#SNF96-091>)

Магниточувствительные иглы получают нанесением Со, Fe и других ферромагнитных материалов на поверхность чипа со стороны иглы В большинстве своем при использовании требуется предварительное подмагничивание перед применением Фирма НТ-МДТ применила новую технологию, состоящую в том, что магнитный слой наносится только на кончик иглы

кантилевера вискер-типа (рис 17, а) Оказалось, что такие кантилеверы обладают более высокой чувствительностью и большей стабильностью во времени

Сущность технологии состоит в том, что удалось разработать процесс проведения электронно-лучевой литографии непосредственно на готовом чипе, что чрезвычайно важно для многозондовых устройств.

3. Специальные кантилеверы

В настоящее время в разработках микромеханических устройств для СЗМ значительно продвинулись исследовательские группы Стенфордского университета (см. <http://www-snf.Stanford.edu/>). Группой Т. Кенни и Д. Ругара (Project # SNF97-038) созданы кантилеверы с жесткостью 10^{-5} Н/м, с помощью которых можно регистрировать силы до 10^{-18} Н (рис. 18). Использование таких кантилеверов позволяет регистрировать магнитно-силовой рельеф с разрешением до 5 нм.

Т. Кенни и Дж. Мамин (Project # SNF96-091) разработали кантилевер для исследований теплопроводности и термоиндуцированной модификации поверхности (рис. 19).

Дж. Мамин (Project # SNF95-041) создан кантилевер с временем механического отклика 90 нс (рис. 20).

С.Е. Quate создан кантилевер, интегрированный с микросканером, который позволяет получать атомарное разрешение (рис. 21).

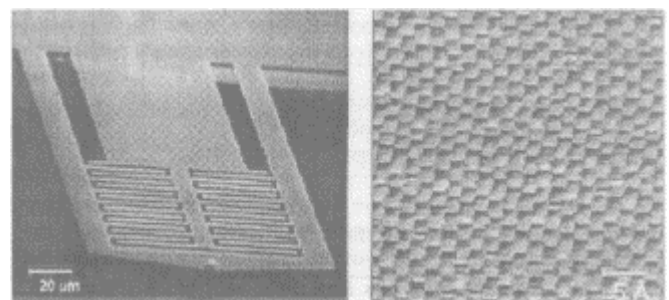


Рис. 21. Комбинированный со сканером кантилевер Квайта и полученное с его помощью СЗМ изображение решетки графита

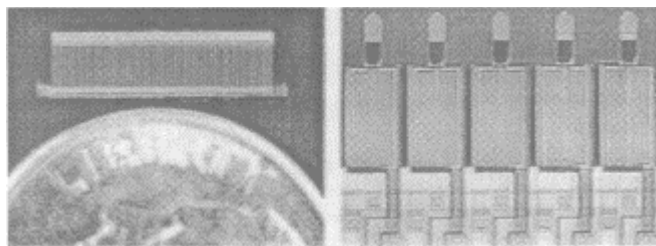


Рис. 22. Многозондовая линейка тензорезистивных кантилеверов из 50 зондов [22] (шаг – 20 0мкм)

4. Многозондовые картриджи для СЗМ

Аналитические и препаративные возможности сканирующей зондовой микроскопии весьма значительны, но для их реализации требуются кантилеверы с различными свойствами (см. разд. 2). В настоящее время в существующих СЗМ для измерения различных характеристик требуется замена кантилевера, что, с одной стороны, занимает несколько минут, а с другой – делает весьма затруднительным проведение исследований того же самого места, так как точность переустановки кантилеверов сложно сделать лучшей, чем несколько микрон. Данная задача решается созданием многозондовых картриджей, включающих значительное число (например несколько десятков) зондов с различными характеристиками.

Многозондовые системы для записи информации в настоящее время уже существуют [22] (рис. 22). Каждый кантилевер содержит пьезоэлектрический отклоняющийся привод и тензорезисторный сенсор, причем имеется возможность прикладывать напряжение к иглам. С помощью каждого кантилевера линейки имеется возможность как записывать информацию, так и получать СЗМ изображения с высоким разрешением.

Развитие систем такого типа должно привести к созданию СЗМ с широкими аналитическими возможностями. Фирма НТ-МДТ в настоящее время ведет разработку многозондового кантилеверного картриджа,

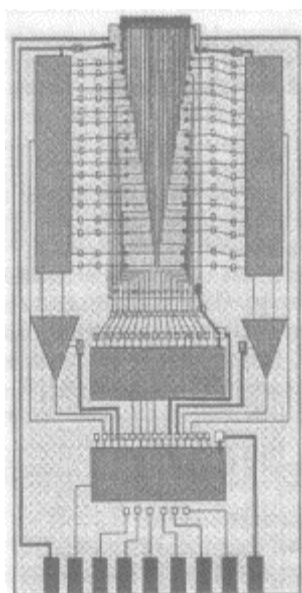


Рис. 23. Конструкция электростатически управляемого зонда с тензорезистивным чувствительным элементом и системы управляемых микрозондов, выполненных в виде гибкой микросхемы

фной пластинки. Пропускание электрического тока через нерабочий зонд будет приводить к требуемому подъему зонда (порядка 10 мкм).

Внедрение в практику картриджей из линеек управляемых зондов представляется в настоящее время оптимальным для решения большинства аналитических задач сканирующей зондовой микроскопии.

5. Микромеханические устройства для решения проблем нанотехнологии

В последние несколько лет стало очевидным [23], что решение инструментальных проблем нанотехнологии вполне возможно, но для этого требуется разработка сложных микромеханических изделий, включающих матрицы управляемых зондов, сканеров, систем позиционирования, программного обеспечения, многопроцессорной техники, способной управлять системой.

К настоящему времени принципиальная часть работы уже выполнена. Группой специалистов компании IBM [24] в рамках разработки проекта "MILLIPEDE" создана работающая матрица, содержащая 32×32 зонда для записи и считывания информации (рис. 24).

Дальнейшая разработка устройств такого типа приведет к созданию чипов для записи и считывания больших массивов информации емкостью вплоть до нескольких терабит на чипе.

* * *

Уже сегодня ясно, что следующим шагом в создании инструментов для нанотехнологии будут микророботы, простейшим из которых можно считать МИЛЛИПЕД. Главным недостатком существующих сейчас устройств является то, что геометрия зондовых систем в них строго фиксирована, и это существенно ограничивает их возможности как манипуляторов и аналитических щупов сканирующих зондовых микроскопов ("мертвые зоны" и пр.). Основной задачей в разработке микромеханических устройств, по мнению автора, следует считать создание "сустава" микронных размеров, содержащего исполнительные элементы, датчики перемещения, систему фиксации. Технологическая схема при разработке такого сустава должна допускать возможность мультипликации. Следующим шагом будет создание механизма типа "рука", с помощью которой можно будет осуществлять как исследования, так и трансляцию отдельных кластеров для создания заданных функциональных систем, а затем и микроробота, имеющего в своем составе тысячи рук, способных "ткать" функциональные устройства следующих поколений. Развитие микропроцессорных, программных, вычислительных средств делают реальным решение задачи создания такого инструмента в течение ближайшего десятилетия.

Автор выражает искреннюю благодарность Дремову В.В., Мазуренко С.Н., Мишачеву В.И., Михайло-

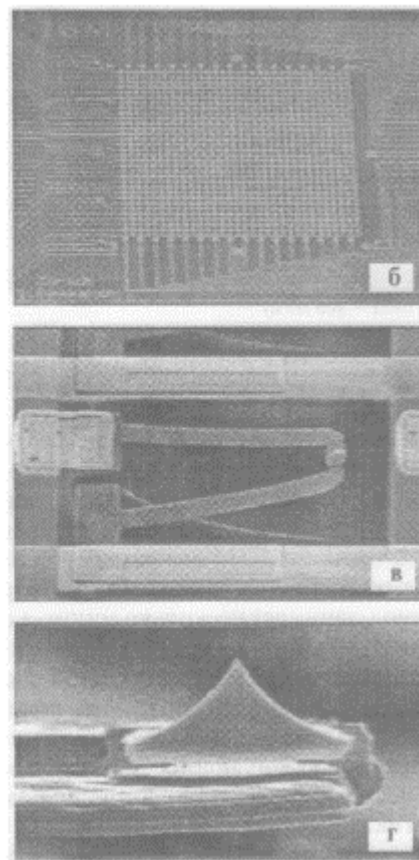
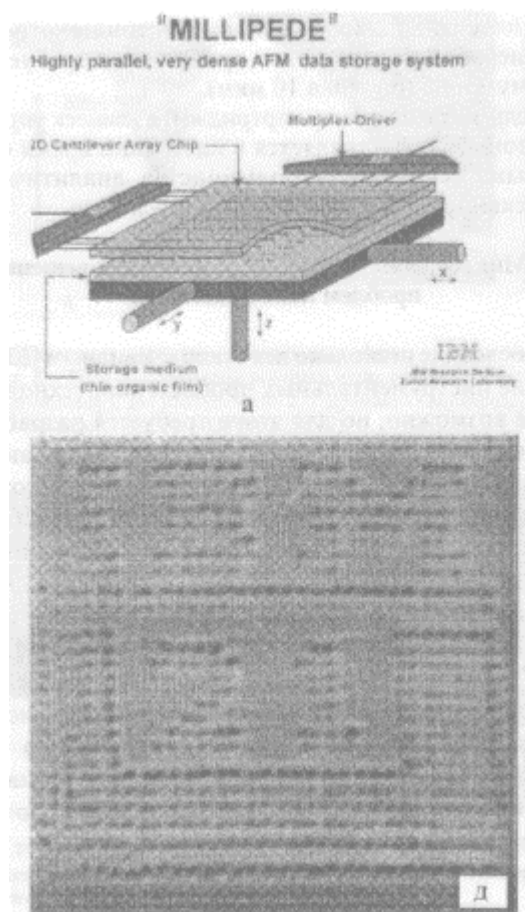


Рис. 24. Конструкция многозондового устройства для записи больших массивов информации. Проект "MILLIPEDE", IBM. Zurich Department:

a – конструкция устройства; *б-г* – РЭМ фотографии внешнего вида многозондовой матрицы, зонда и иглы; *д* – результат записи массива информации на полимерную матрицу

ву Г.М., Саунину С.А., Полторацкому Э.А., Шубину А.Б. за полезные обсуждения материала, Лемешко С.В. за помощь в подготовке результатов экспериментальных исследований, а также всему коллективу ЗАО "НТ-МДТ" и ГНЦ Гос. НИИФП, без которых было бы невозможно проведение цикла экспериментальных работ. Автор глубоко благодарен министерству науки и технической политики Российской Федерации (департамент перспективных исследований) за всестороннюю помощь и поддержку в развитии работ по сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии в России.

Список литературы

1. Binnig G., Gerber Ch., Stoll E., Albrecht T.R., Quate C.F. Atomic resolution with atomoc force microscope // Surface, 189/190, 1-6, 1987.
2. Leveque G., Girard P., Belaidi S., Solal G. Cohen. Effects of air damping in noncontact resonant force microscopy // Rev. Sci. Instrum. 68 (11), November 1997.
3. Kong L.C., Orr B.C., Wise K.D., Orme C., Sudijono J. A Silicon Micromachined Sensor for Force Microscopy // Book of Abstracts of the Fifth International Conference on Scanning Tunneling Microscopy / Spectroscopy (SPM-90) and the First International Conference on Nanometer Scale Science and Technology (NANO-1). Baltimore, Maryland USA. July 23-27, 1990. P. 227.
4. Wise K.D., Orr B.G. Macromachined Silicon Sensors: Tending Instrumentation Systems into Nano World // Book of Abstracts of the Fifth International Conference on Scanning Tunneling Microscopy / Spectroscopy

(SPM-90) and the First International Conference on Nanometer Scale Science and Technology (NANO-1). Baltimore, Maryland USA. July 23-27, 1990. P. 303 (Si cant.)

5. Wolter O., Bayer Th., Greschner J. Micromachined Silicon Sensors for Scanning Force Microscopy // Book of Abstracts of the Fifth International Conference on Scanning Tunneling Microscopy / Spectroscopy (SPM-90) and the First International Conference on Nanometer Scale Science and Technology (NANO-1). Baltimore, Maryland USA. July 23-27, 1990. P. 311 (Si cant.)

6. Grutter P., Rugar D., Mamin H.J., Gastello G., Lin C.-J., Valletta B., Wolter O., Greschner J., Bayer Th. Batch Fabricated Cantilevers for Magnetic Force Microscopy // Book of Abstracts of the Fifth International Conference on Scanning Tunneling Microscopy / Spectroscopy (SPM-90) and the First International Conference on Nanometer Scale Science and Technology (NANO-1). Baltimore Maryland USA. July 23-27, 1990. P. 313. (Si cant. With Co 15nm magnetic coating).

7. Akamine S., Barrett R.C., Quate C.F. Microfabrication of Cantilevers with Sharp Tips for Use in Atomic Force Microscopy of Large Features // Book of Abstracts of the Fifth International Conference on Scanning Tunneling Microscopy / Spectroscopy (SPM-90) and the First International Conference on Nanometer Scale Science and Technology (NANO-1). Baltimore, Maryland USA. July 23-27, 1990. P. 314 (Si₃N₄ cantilevers with Si tips).

8. Albrecht T.K., Akamine S., Carver T.E., Quate C.F. // J. Vac. Sci. Technol., A 1990, 8, 3386.

9. Информационный лист фирмы "Nanosensors".

10. Информационный лист фирмы "Park Scientific Instruments".

11. Cho S.T., Najafi K., Wise K.D. Internal Stress Compensation and

Scaling Ultrasensitive Silicon Pressure Sensors IEE TED Vol. 139.N 4. 1993. P. 836-842.

12. Патент США N 5021364 МКИ H01L 27/465.

13. **Magonov S.N., Whangbo M.-H.** Surface Analysis with STM and AFM // VCH, Weinheim – New York – Basel – Cambridge – Tokyo, 1996. P. 35-37.

14. **Быков В.А., Лазарев М.И., Саунин С.А.** Зондовая микроскопия для биологии и медицины // Сенсорные системы. 1998. Т. 12. № 1. С.101-124.

15. **Быков В.А., Гологанов А.Н., Салахов Н.Э., Шабратов Д.В.** Способ формирования кантилевера сканирующего зондового микроскопа // ЗАО "НТ-МДТ", ЗАО "СИЛИКОН-МДТ". Российская Федерация. Патент на изобретение" 2121657, приоритет от 08.05.97.

16. **Быков В.А., Гологанов А.Н., Салахов Н.Э., Шабратов Д.В.** Многозондовый кантилевер для сканирующего зондового микроскопа //ЗАО "НТ-МДТ", ЗАО "СИЛИКОН-МДТ". Российская Федерация. Патент на изобретение № 2124251, приоритет от 06.12.96.

17. **Быков В.А., Гологанов А.Н., Салахов Н.Э., Шабратов Д.В.** Кантилевер для сканирующего зондового микроскопа // ЗАО "НТ-МДТ". ЗАО "СИЛИКОН-МДТ". Российская Федерация. Патент на изобретение" 2124780, приоритет от 06.12.96.

18. **Быков В.А., Гологанов А.Н., Салахов Н.Э., Шабратов Д.В.** Способ изготовления кантилевера сканирующего зондового микроско-

па // ЗАО "НТ-МДТ", ЗАО "СИЛИКОН-МДТ". Российская Федерация. Патент на изобретение № 2125234, приоритет от 08.5.97.

19. **Бухарев А.А., Нургазизов Н.И., Можанова А.А., Овчинников Д.В.** Изучение с помощью атомно-силового микроскопа in situ кинетики жидкостного химического травления субмикронных пленок диоксида кремния // Микроэлектроника 1999. Т. 28. С. 385-394.

20. **Гиваргизов Е.И.** патент № 2074444 от 27.02.97. International Application Number PCT/Ru95/00154 от 18.07.95г., EP0726589 A1.

21. **Гиваргизов Е.И.** Патент № 2099808 от 20.12.97. International Application Number PCT/Ru97/00078 от 24.03.97 г., WO 97/37064 A1.

22. **Quate C.F.** The Scanning probe microscopy as a tool nanotechnology//Preliminary Proceeding ofSTM-99. 10th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy / Spectroscopy and Related Proximal Probe Microscopy. 19-23 July, 1999, Seoul Korea, p. 1. and <http://www-snf.stanford.edu/ScanningProbeArraysProject#SNF97016>.

23. **Bykov V.A.** Langmuir-Blodgett films, and nanotechnology // Biosensor & Bioelectronics Vol. 11, No. 9, pp. 923-932, 1996.

24. **Vettiger P., Despont M., Drechsler U., Dig U., Herle W., Lutwyche M.I., Rothuizen H., Stutz R., Widmer R., Binnig G.K.** "MILLIPEDE" A highly parallel, very dense AFM – base dData Storage System // Preliminary Proceeding of STM-99. 10 International Conference on Scanning Tunneling Microscopy / Spectroscopy and Related Proximal Probe Microscopy. 19-23 July. 1999, Seoul Korea, p. 4. and <http://www.zurich.ibm.com/news/99/n-19991013-milli.html>

УДК 629.735.45

Э.А. Петросян, Л.Н. Никифорова, д-р техн. наук, ОАО "Камов"

БЕСПИЛОТНЫЕ ВЕРТОЛЕТЫ - ОТ МИНИ- ДО МИКРОАППАРАТОВ

Рассмотрены современное состояние дел с беспилотными вертолетами, концепция их применения, а также проблемы создания микровертолетов и систем управления.

Введение

В России и странах СНГ перекося в развитии промышленности, недостаточное внимание к экологии и безопасности привели к концентрации на огромных территориях страны сложных экологических проблем. Большое количество экологически опасных производств и объектов требует постоянного контроля для принятия своевременных мер безопасности. Особого внимания требуют нефтегазовые промышленные установки, нефтегазопроводы, районы типа Чернобыльской АЭС. Постоянного наблюдения требуют также лесные массивы Сибири и такие уникальные природные образования, как озеро Байкал.

Применение в этих целях пилотируемых аппаратов не всегда безопас-

но для экипажей, особенно в зонах крупных катастроф типа Чернобыльской, сопровождающихся радиоактивным химическим и биологическим заражением.

Для решения таких задач требуется оперативное, относительно недорогое средство, способное обеспечить регулярный эффективный экологический контроль. Весьма перспективным средством является беспилотный вертолет, способный вести длительное патрулирование в воздухе, обследовать обширные территории, передавая информацию на наземный пункт, а при необходимости доставлять в заданный район средства подавления и локализации отдельных очагов опасности. При использовании беспилотного вертолета в условиях катастроф его большим преимуществом является безопасность людей, ведущих наблюде-

ние в зонах бедствия. Беспилотные вертолеты могут принести большую пользу и для решения задач органов внутренних дел и пограничной службы.

Практически все беспилотные вертолеты в различных странах спроектированы по концепции основного вертолета в силу его преимуществ на висении и на режиме полета с малыми скоростями. ОАО "Камов" является единственным в мире производителем соосных пилотируемых вертолетов (первыми российскими беспилотными вертолетами стали вертолеты фирмы "Камов" - Ка-37 и Ка-137).

В настоящее время во всем мире существует большая потребность в микровертолетах. Их размеры необычно малы – в размере птиц и даже насекомых. Это кажется нереальным, но современные достижения науки и технологии дают основание для решения всех проблем создания маленького беспилотного вертолета.

Современное состояние беспилотных вертолетов. В развитых странах Запада начиная с 60-х годов ведутся интенсивные научно-исследовательские и оптико-конструкторские работы по созданию беспилотных вертолетов. В результате к началу 80-х годов в этих странах приступили к созданию серийных образцов беспилотных вертолетных комплек-

Scaling Ultrasensitive Silicon Pressure Sensors IEE TED Vol. 139.N 4. 1993. P. 836-842.

12. Патент США N 5021364 МКИ H01L 27/465.

13. **Magonov S.N., Whangbo M.-H.** Surface Analysis with STM and AFM // VCH, Weinheim – New York – Basel – Cambridge – Tokyo, 1996. P. 35-37.

14. **Быков В.А., Лазарев М.И., Саунин С.А.** Зондовая микроскопия для биологии и медицины // Сенсорные системы. 1998. Т. 12. № 1. С.101-124.

15. **Быков В.А., Гологанов А.Н., Салахов Н.Э., Шабратов Д.В.** Способ формирования кантилевера сканирующего зондового микроскопа // ЗАО "НТ-МДТ", ЗАО "СИЛИКОН-МДТ". Российская Федерация. Патент на изобретение" 2121657, приоритет от 08.05.97.

16. **Быков В.А., Гологанов А.Н., Салахов Н.Э., Шабратов Д.В.** Многозондовый кантилевер для сканирующего зондового микроскопа //ЗАО "НТ-МДТ", ЗАО "СИЛИКОН-МДТ". Российская Федерация. Патент на изобретение № 2124251, приоритет от 06.12.96.

17. **Быков В.А., Гологанов А.Н., Салахов Н.Э., Шабратов Д.В.** Кантилевер для сканирующего зондового микроскопа // ЗАО "НТ-МДТ". ЗАО "СИЛИКОН-МДТ". Российская Федерация. Патент на изобретение" 2124780, приоритет от 06.12.96.

18. **Быков В.А., Гологанов А.Н., Салахов Н.Э., Шабратов Д.В.** Способ изготовления кантилевера сканирующего зондового микроско-

па // ЗАО "НТ-МДТ", ЗАО "СИЛИКОН-МДТ". Российская Федерация. Патент на изобретение № 2125234, приоритет от 08.5.97.

19. **Бухарев А.А., Нургазизов Н.И., Можанова А.А., Овчинников Д.В.** Изучение с помощью атомно-силового микроскопа in situ кинетики жидкостного химического травления субмикронных пленок диоксида кремния // Микроэлектроника 1999. Т. 28. С. 385-394.

20. **Гиваргизов Е.И.** патент № 2074444 от 27.02.97. International Application Number PCT/Ru95/00154 от 18.07.95г., EP0726589 A1.

21. **Гиваргизов Е.И.** Патент № 2099808 от 20.12.97. International Application Number PCT/Ru97/00078 от 24.03.97 г., WO 97/37064 A1.

22. **Quate C.F.** The Scanning probe microscopy as a tool nanotechnology//Preliminary Proceeding ofSTM-99. 10th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy / Spectroscopy and Related Proximal Probe Microscopy. 19-23 July, 1999, Seoul Korea, p. 1. and <http://www-snf.stanford.edu/ScanningProbeArraysProject#SNF97016>.

23. **Bykov V.A.** Langmuir-Blodgett films, and nanotechnology // Biosensor & Bioelectronics Vol. 11, No. 9, pp. 923-932, 1996.

24. **Vettiger P., Despont M., Drechsler U., Dig U., Herle W., Lutwyche M.I., Rothuizen H., Stutz R., Widmer R., Binnig G.K.** "MILLIPEDE" A highly parallel, very dense AFM – base dData Storage System // Preliminary Proceeding of STM-99. 10 International Conference on Scanning Tunneling Microscopy / Spectroscopy and Related Proximal Probe Microscopy. 19-23 July. 1999, Seoul Korea, p. 4. and <http://www.zurich.ibm.com/news/99/n-19991013-milli.html>

УДК 629.735.45

Э.А. Петросян, Л.Н. Никифорова, д-р техн. наук, ОАО "Камов"

БЕСПИЛОТНЫЕ ВЕРТОЛЕТЫ - ОТ МИНИ- ДО МИКРОАППАРАТОВ

Рассмотрены современное состояние дел с беспилотными вертолетами, концепция их применения, а также проблемы создания микровертолетов и систем управления.

Введение

В России и странах СНГ перекося в развитии промышленности, недостаточное внимание к экологии и безопасности привели к концентрации на огромных территориях страны сложных экологических проблем. Большое количество экологически опасных производств и объектов требует постоянного контроля для принятия своевременных мер безопасности. Особого внимания требуют нефтегазовые промышленные установки, нефтегазопроводы, районы типа Чернобыльской АЭС. Постоянного наблюдения требуют также лесные массивы Сибири и такие уникальные природные образования, как озеро Байкал.

Применение в этих целях пилотируемых аппаратов не всегда безопас-

но для экипажей, особенно в зонах крупных катастроф типа Чернобыльской, сопровождающихся радиоактивным химическим и биологическим заражением.

Для решения таких задач требуется оперативное, относительно недорогое средство, способное обеспечить регулярный эффективный экологический контроль. Весьма перспективным средством является беспилотный вертолет, способный вести длительное патрулирование в воздухе, обследовать обширные территории, передавая информацию на наземный пункт, а при необходимости доставлять в заданный район средства подавления и локализации отдельных очагов опасности. При использовании беспилотного вертолета в условиях катастроф его большим преимуществом является безопасность людей, ведущих наблюде-

ние в зонах бедствия. Беспилотные вертолеты могут принести большую пользу и для решения задач органов внутренних дел и пограничной службы.

Практически все беспилотные вертолеты в различных странах спроектированы по концепции основного вертолета в силу его преимуществ на висении и на режиме полета с малыми скоростями. ОАО "Камов" является единственным в мире производителем соосных пилотируемых вертолетов (первыми российскими беспилотными вертолетами стали вертолеты фирмы "Камов" - Ка-37 и Ка-137).

В настоящее время во всем мире существует большая потребность в микровертолетах. Их размеры необычно малы – в размере птиц и даже насекомых. Это кажется нереальным, но современные достижения науки и технологии дают основание для решения всех проблем создания маленького беспилотного вертолета.

Современное состояние беспилотных вертолетов. В развитых странах Запада начиная с 60-х годов ведутся интенсивные научно-исследовательские и оптико-конструкторские работы по созданию беспилотных вертолетов. В результате к началу 80-х годов в этих странах приступили к созданию серийных образцов беспилотных вертолетных комплек-

Сравнительные характеристики беспилотных вертолетов

№	Типы вертолетов	Ка-37	Ка-137	RPH-2	CL-327	CYPHER	SPRITE	VIGILANT
1.	Страна, фирма	Россия "Камов"	Россия "Ка-мов"	Япония, Франция "Фьюджен"	Канада "Канадер"	США "Сикорский"	Великобритания "Авиэйшен лимитед"	Франция "ONERA"
2.	Назначение	Экспериментальный	Многоцелевой		Разведка	Разведка	Разведка	Разведка
3.	Взлетная масса, кг	250	250...280	305	340	113	40	32
4.	Силовая установка: тип двигателя количество взлетная мощность, кВт	П-0,37 2 24,6	HIRTH 2706 R 05 1 47,8	Поршневой вод. охл.	-	- 1 47,8	MLN 2/88 2 4,4	Поршневой 5,88
5.	Диаметр винта, м	4,8	5,3	4,8	4	2,95	1,6	1,87
6.	Полезная нагрузка, кг: нормальная максимальная	50 -	50 80	60 85	24 -	- 22,7 -	6 -	7,5 - -
7.	Скорость полета, км/ч: максимальная крейсерская	135 110	175 145	120 -	157 -	- 140	130 -	100 -
8.	Потолок висения, м	3150	3726...2910	-	5500	-	2440	3000
9.	Практический потолок, м	3500	5750...5020	-	-	-	-	-
10.	Скороподъемность, м/с	12	9,8...11,3	-	7,6	-	6,1	-
11.	Максимальная продолжительность полета, ч на удалении, км, с нормальной полезной нагрузкой	0,5 (20)	4 (50)	1	5	3	2 (30)	1
12.	Дальность полета, км (с нормальной полезной нагрузкой)	88	530	0,15				20

сов, предназначенных для решения задач военно-разведывательного характера. Широко обсуждаются также возможности применения беспилотных вертолетов для гражданских целей. Анализ показывает, что в последние годы интерес к использованию беспилотных вертолетов значительно вырос. Это объясняется достижениями вертолетостроения в области конструкции, аэродинамики, технологии и систем управления. Немаловажное значение имеют также существенные преимущества беспилотных вертолетов по сравнению с беспилотными летательными аппаратами других схем:

- возможность безаэродромного применения, отсутствие сложного стартово-посадочного оборудования;
- уменьшение продолжительности подготовки к повторному вылету;
- возможность висения и полета на малых и околонулевых скоростях;

- уникальная возможность маневрирования.

Класс беспилотных летательных аппаратов (см. третью сторону обложки) в последнее десятилетие существенно пополнился за счет беспилотных вертолетов CL-227 (Канада, фирма "Канадер"), Cypher (США, фирма "Сикорский"), Sprite (Великобритания, фирма "Авиэйшен лимитед") и др. Большинство беспилотных вертолетов (см. таблицу) имеют небольшую массу (от 40 до 300 кг), относительно небольшие скорости полета (до 150-200 км/ч), потолок висения – 2- 3км, дальность полета – до 500 км и продолжительность полета – до 4 ч. Эти вертолеты, как правило, эксплуатируются вдали от пункта старта и должны выполнять автономный полет.

Интересно отметить, что практически все беспилотные вертолеты выполнены по соосной схеме, уникальный опыт создания которой

имеет во всем мире только фирма "Камов". Соосные вертолеты обладают рядом свойств (высокий КПД винтов, отсутствие потерь мощности на компенсацию реактивного момента, аэродинамическая симметрия, независимость органов управления, высокие пилотажные и маневренные характеристики, компактность и малые габариты и др.), которые делают эту схему незаменимой для беспилотных вертолетов, что и подтверждает мировой опыт. В этом отношении фирма "Камов" имеет неоспоримое преимущество.

В нашей стране в области создания беспилотных вертолетов имеется серьезное отставание по сравнению с западными странами. В последние годы ведутся интенсивные работы по ликвидации этого отставания. В 1992-1994 годах были проведены работы по созданию экспериментального беспилотного вертолета Ка-37 с полетной массой 250 кг и с

двухлопастными соосными винтами. Первый полет беспилотного вертолета Ка-37 был выполнен в 1995 году, и летные испытания показали работоспособность как самого вертолета, так и его бортовых систем, но недостатки силовой установки не дали возможности дальнейшей эксплуатации вертолета Ка-37. Однако сам вертолет Ка-37 послужил прототипом для более энерговооруженного беспилотного вертолета Ка-137.

Концепция применения беспилотных вертолетов

Из широкого круга задач, решаемых беспилотным вертолетом, в качестве основных можно выделить следующие [5]:

- экологическая экспертиза на суше и над водной поверхностью;
- систематическое наблюдение (патрулирование) районов аварий и чрезвычайных ситуаций;
- биологический и химический контроль в биологически опасной для человека зоне;
- радиационный контроль окружающей среды;
- контроль и предупреждение аварий трубопроводов на газовых, химических и нефтяных магистралях;
- охрана лесов и торфяников, предупреждение лесных пожаров, в том числе и пожаров на территории хозяйственных и промышленных объектов;
- автономная рыборазведка и рыбоохрана на водоемах и прибрежных шельфах;
- доставка и сброс экстренных грузов: сильнодействующих обеззараживающих растворов и порошков, пенообразующих составов, локализирующих разливы; медикаментов, продуктов и почты в процессе оказания помощи в процессе ликвидации аварий и катастроф;
- контроль автомобильных и железнодорожных магистралей;
- оперативная аэрофотосъемка;
- региональная и местная ретрансляция телевизионных сигналов, в том числе и экстренного репортажа;
- выдача необходимой информации, в том числе и телевизионной, соответствующим службам органов внутренних дел;

- охрана важных объектов;
- обеспечение круглосуточного пограничного контроля на труднодоступных участках над сушей и над морем;

- борьба с бандформированиями и наркобизнесом.

Интересно и использование беспилотного вертолета для управления наземными роботами, выполняющими задачи в зонах разрушений и катастроф, где зачастую невозможно управление ими по радиолнии в силу наличия препятствий и необходимости для оператора находиться на большом удалении от очага опасности.

Решение конкретных задач обеспечивается заказом необходимого комплекса специального целевого оборудования модульного использования.

Основные проблемы создания микровертолета

В настоящее время развитие науки и техники позволило вплотную подойти к созданию микроБЛА (беспилотных летательных аппаратов), размеры которых не превышают размеров птиц или даже насекомых. Так, в обзоре работ в США по микроБЛА [1] говорится: "Идея создания микроБЛА как средства разведки войсковых подразделений принадлежит специалистам лаборатории им. Линкольна Массачусетского технологического института. Считается, что такое средство, размером с птицу, особенно эффективное при ведении боевых действий в городских условиях, помимо наблюдения обстановки могло бы применяться для целеуказания, обнаружения элементов химического и биологического оружия, ретрансляции сигналов радиосвязи, минирования труднодоступных объектов."

"В последние годы здесь (в области беспилотной авиации) обозначились три новых перспективных направления: микроБЛА, "разыскивающее оружие" и "необитаемая разведывательно-ударная авиация". Теоретические разработки в этих областях, которыми руководит управление DARPA, охватывают весь спектр боевых действий... и после реализации способны карди-

нально повлиять на характер будущих войн, максимально снижая в них влияние человеческого фактора [1]. ... с 1998 финансового года FARPA планирует открыть по ним (по мини-БЛА) расходную статью в военном бюджете с финансированием трехлетних работ (20 млн долларов)."

Из того же обзора [1]: "К микроБЛА предъявляются следующие общие требования: длина 6-20 см, взлетная масса 10-100 г, масса полезной нагрузки 1-19 г, время полета 20-60 мин, крейсерская скорость 30-65 км/ч, дальность полета 1-10 км. Рассматривается возможность режима висения".

Следует отметить, что при создании микровертолета возникают как чисто исследовательские теоретические проблемы, так и технологические.

В процессе решения проблем создания микровертолета возникает ряд конкретных задач, от успешного решения которых зависит сама возможность создания такого вертолета. Весь комплекс задач в первом приближении можно разделить на отдельные составляющие, из которых основными являются следующие.

♦ *Силовая установка.* Необходимы миниатюрные двигатели, удовлетворяющие потребность микровертолетов, потребная мощность которых зависит от массы вертолета и его габаритов. Обороты несущего винта весьма высоки, поэтому или двигатель будет иметь высокие обороты, или надо будет ставить специальный редуктор.

♦ *Система управления* необычно (для существующих вертолетов) миниатюрных размеров. Это требует новых конструкций, материалов и специальных теоретических разработок в области управления (возможно, из области теории оптимального управления, нейросетей или других областей теории управления). Особое внимание необходимо уделить системе управления при посадке в целях обеспечения точности вертикальной посадки (без ливнейных и угловых скоростей).

♦ *Специфические датчики*, миниатюрность размеров которых потребует новых нестандартных подходов к их созданию:

- датчики углового положения вертолета (тангаж, крен, курс);
- датчики угловых скоростей по трем осям;
- датчики воздушной скорости полета, углов атаки и скольжения (обязательно измерение воздушных скоростей, начиная от режима висения, где воздушная скорость равна нулю);
- датчики положения относительно заданной точки (продольное, боковое, высота);
- датчики обратной связи системы управления;
- датчики системы полезной нагрузки (световые, электрические, химические и т.п.).

• *Миниатюрный бортовой компьютер* и связанный с ним линией передачи данных компьютер наземный.

• *Материалы и технология их обработки для миниатюрных деталей*, в том числе и вращающихся, с достаточно большими нагрузками. Так, лопасти несущего винта имеют размеры: длина – от 10 см, хорда – от 0,3 см, толщина – от 0,05 см.

• *Средства сообщения с наземным пунктом*, откуда осуществляется управление полетом.

• *Проведение исследовательских и экспериментальных работ*, направленных на изучение специфики миниатюрных размеров винта и связанных с этим теоретических проблем, системы управления и др.

Решение этих вопросов невозможно без применения современных достижений науки в создании микросистемной техники, ее элементной базы, высокоэнергоемких микродвигателей, микроэлектронных сенсорных систем и т.п. Перспективы в создании таких элементов отражены, в частности в [2, 3].

Проблемы создания систем управления авиационных роботов

Системы управления беспилотными вертолетами, а особенно микровертолетами, ставит ряд задач, которые для беспилотного вертолета типа Ка-137 имеют частично решение, но в случае микровертолета могут потребовать особого подхода, а именно:

- определение оптимальных траекторий перелета из заданной начальной точки пространства в заданную конечную, в том числе и наиболее сложный вариант траектории – полет на малой высоте – так называемый маловысотный полет (МВП);
- автоматизация выполнения отдельных штатных режимов (разворот в горизонтальной плоскости, заход на посадку и посадка, набор высоты, снижение, маневры в вертикальной плоскости и т.п.), а также полета в целом;
- автоматическое выполнение посадки в случае отказов, в частности, отказа двигателя и др.;
- распознавание объектов в целях выполнения задания;
- ориентация по картине подстилающей поверхности в целях стабилизации висения над точкой и точной посадки;
- предупреждение выхода за ограничения при выполнении сложных маневров.

В настоящее время создание перспективных систем управления вертолетами настоятельно диктует необходимость отхода от прежних принципов построения систем автоматического управления, основанных на традиционных принципах выработки управляющего сигнала, пропорционального, как правило, первым членам разложения в ряд Тейлора изменения параметров движения, с использованием традиционных же датчиков. Такие методы за рубежом получили название PID-управление, т.е. управление по сигналам, пропорциональным отклонению параметра от заданного

(P-position), интегралу от этого отклонения (I-integral) и производной (D-derivative). При современных требованиях, предъявляемых к вертолетам, необходимо сделать следующий шаг в развитии систем автоматического управления – переход от традиционных методов управления к новым, в частности, к использованию методов теории оптимального управления [4] и применению нейроруправления [5].

Основные задачи, которые должны решать такие системы автоматического управления, основанные на методах теории оптимального управления и нейрокомпьютерах, включают в себя:

- формирование сигналов управления на основе оптимального управления на данном или близком к нему режиме, заложенному в память компьютера;
- самообучение на базе запомненного опыта управления;
- использование информации нетрадиционных (для прежних САУ) датчиков типа оптических систем и т.п.;
- применение нетрадиционных принципов формирования сигналов управления;
- выбор самой системой автоматического управления оптимального в данных условиях способа управления и формирования сигналов управления.

Список литературы

1. Афинов В. Стратегические разведывательные БЛА и направления развития беспилотной авиации в США // Зарубежное военное обозрение, 1997. № 7. С. 35-41.
2. 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.
3. Корляков А.В., Лучинин В.В. Перспективная системная база микросистемной техники // Микросистемная техника, 1999. № 1. С. 12-15.
4. Кротов В.Ф., Гурман В.И. Методы и задачи оптимального управления. М.: Наука, 1973.
5. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Пер. с англ. / Под ред. А.И. Галушкина. М.: Мир, 1992.

УДК 621.3

Ю.И. Янкевич - руководитель программы "Беспилотные летательные аппараты" ОКБ им. А.С. Яковлева, лауреат премии Правительства РФ;

Ю.В. Веркин - зам. руководителя программы "Беспилотные летательные аппараты" ОКБ им. А.С. Яковлева

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ МИКРОАППАРАТОВ

Описаны основные особенности дистанционно пилотируемых летательных аппаратов как одного из классов беспилотных летательных аппаратов и история их развития. Представлены требования ВС США к летательным микроаппаратам, решаемым ими задачам и краткие итоги работ фирмы "Аэро Вайронмент" по созданию экспериментального образца летательных микроаппаратов (ЛМА). Сформулированы основные направления работ научного и прикладного характера, выполнение которых необходимо для создания ЛМА, способного эффективно решать различные практические задачи.

Летательные микроаппараты представляют собой один из видов авиационной техники, получившей название дистанционно-пилотируемые летательные аппараты (ДПЛА). В зарубежной печати этот вид летательных аппаратов именуется *unmanned air vehicle* (UAV). В свою очередь ДПЛА представляют собой частный класс беспилотных летательных аппаратов (БЛА), занимающий промежуточное положение между пилотируемой авиацией и беспилотной ракетной техникой.

Термин "дистанционно-пилотируемые" подразумевает не просто радиоуправляемый летательный аппарат по типу авиамodelей. Смысл дистанционного управления сводится к тому, что между человеком-оператором, находящимся на наземном пункте управления, и ДПЛА, находящемся в воздухе, непрерывно происходит обмен информацией, а с помощью полезной нагрузки, находящейся на борту (например, телевизионной камерой), создается иллюзия наблюдения за наземными целями с борта самолета. Огромное значение имеет и то, что при этом с оператора снимаются реальные физические и психологические нагрузки, которым подвергается экипаж пилотируемого самолета. Оператор ДПЛА задает новые параметры полета, а непосредственное отклонение органов управления летательного аппарата осуществляет система автоматического управления. Основное отличие

ДПЛА от спортивных авиамodelей заключается в том, что оператор не может влиять на интенсивность выполнения маневра, непосредственно управляя отклонением рулей и тем самым определяя траекторию полета. Кроме того, управление авиамodelью возможно только тогда, когда она находится в поле зрения оператора, и он отчетливо представляет пространственное положение модели.

История беспилотных самолетов не намного короче истории пилотируемых. Впервые планомерное изучение концепции БЛА начала армия США уже в 1917 г. В этом году армейские войска связи имели построенный фирмой "Дейтон райт" беспилотный биплан "Баг", с помощью которого можно было обеспечить доставку боевого заряда. Однако после окончания первой мировой войны первая эра разработки БЛА в США завершила свое существование, не достигнув стадии широкого использования. В 1924 г. в одном из журналов появилось сообщение о разработке радиоуправляемого самолета, оснащенного телевизионным оборудованием, однако первое применение подобного самолета во время второй мировой войны принесло довольно скромные результаты, так как не было эффективной системы наведения, неприемлемы были лётно-технические характеристики и надежность аппарата. Первый беспилотный радиоуправляемый самолет-мишень был сделан в Великобрита-

нии в начале 1930-х годов на базе поплавкового гидросамолета Фейри F (предназначался для тренировки расчетов корабельной зенитной артиллерии), и до окончания второй мировой войны беспилотные самолеты использовались в качестве мишеней.

После второй мировой войны усилия по разработке беспилотных самолетов сконцентрировались на переоборудовании пилотируемых самолетов в воздушные мишени и беспилотные разведчики. Во второй половине 50-х годов стали появляться специально разработанные беспилотные самолеты-разведчики. Это были реактивные машины массой в несколько тонн. В основном эти летательные аппараты совершали полеты по программе, и полученная разведывательная информация обрабатывалась на земле после посадки.

В 1960-х годах новый военный конфликт опять стимулировал потребность в БЛА. Эскалация войны во Вьетнаме выявила потребность в проведении операций и полетов с использованием разведывательных беспилотных аппаратов. Необходимость в выполнении таких операций была вполне очевидна, и во время действий во Вьетнаме различные модификации БЛА "Файр-би", выполнили свыше 3000 полетов.

Семидесятые годы можно считать завершением первого этапа развития беспилотной авиации.

В начале 80-х годов произошел буквально взрыв интереса к беспилотным самолетам.

Значительные успехи в области микроэлектроники, двигателестроения, оптикоэлектроники, авиационных материалов, инфракрасной аппаратуры и, главным образом, в области эффективной, помехозащищенной радиосвязи обеспечили стремительное развитие ДПЛА.

Многие развитые страны приступили к созданию беспилотных летательных аппаратов массой около 50-70 кг для решения задач телевизионной разведки (как основной). Близость габаритов этих летательных аппаратов к авиамodelям породили всеобщую иллюзию, что этот вид техники можно сделать просто, быстро, дешево и с большим эконо-

мическим эффектом. Множество фирм за рубежом и различные организации у нас в стране ринулись разрабатывать ДПЛА, в том числе самых невероятных аэродинамических схем. В 90-х годах было поднято в воздух более 100 типов ДПЛА. У нас в стране не менее 20 организаций разрабатывали тактические ДПЛА и сумели довести их до стадии летных испытаний, и только один из них - "Пчела-1Т" разработки ОКБ им. А.С. Яковлева - был доведен до серии и принят на вооружение. Впрочем, и во всем мире количество типов серийно выпускаемых тактических ДПЛА исчисляется единицами.

ДПЛА используются в различных армиях мира для ведения воздушной разведки - телевизионной в дневное и ночное время, химической, радиационной, радиоэлектронной, а также постановки помех линиям связи и поражения наземных целей с помощью встроенной боевой части.

В 80-е и 90-е годы продолжалось снижение массы бортовых систем ДПЛА, особенно радиоэлектронного оборудования. И если ДПЛА, осуществляющий телевизионную разведку с передачей изображения в реальном масштабе времени на дальность 50 км, в 80-е годы имел массу свыше 100 кг, то масса аналогичной разработки 90-х годов составляла уже 30-40 кг. Однако все возрастающий объем задач, возлагаемый на ДПЛА, и растущие требования заказчика обуславливали тот факт, что масса тактических ДПЛА не опускалась ниже 130 кг.

В настоящее время сложилась ситуация, когда уровень микротехники позволяет ожидать нового качественного скачка в развитии ДПЛА и начала нового этапа развития БЛА - создания летательных микроаппаратов (ЛМА), способных осуществлять воздушную разведку и выполнять ряд других задач, традиционно стоящих перед ДПЛА.

Впервые концепция военного применения микророботов была предложена специалистами корпорации Rand (США) в декабре 1992 г. на совещании представителей военных ведомств и научно-промышленных кругов по проблеме использова-

ния технических достижений в военно-оперативных целях.

На слушаниях в Конгрессе США по теме "Разведывательное сообщение 21 века", проходивших в 1995 г., начальник управления новой техники ЦРУ заявил, что проведенные исследования показали возможность создания в ближайшей перспективе миниатюрного разведывательного радиоуправляемого летательного аппарата, получившего название MAV - micro air vehicle.

Разработку этого аппарата возглавило Управление перспективных исследований и разработок (ДАРПА) МО США. В период до 2000 г. планировалось создание действующего образца летательного микроаппарата. Начальное финансирование этих работ в размере 35 млн. долл. с 1997 г. осуществляет ДАРПА совместно с НАСА.

Был заключен целый ряд контрактов на разработку как ЛМА, так и отдельных систем (двигатели, топливные элементы и т.д.).

В США были выдвинуты следующие требования к ЛМА:

Длина, см	6-20
Взлетная масса, г	10-100
Полезная нагрузка, Н	0,1-0,18
Время полета, мин	20-60
Скорость, км/ч	30-65
Дальность, км	1-10

В настоящее время наибольших успехов в реализации ЛМА достигла американская фирма "Аэро Вайронмент". После двух с половиной лет работы им удалось создать ЛМА с максимальными габаритами 150 мм и массой 60 г. В марте 1999 г. этот аппарат совершил успешный полет продолжительностью 22 мин. При этом осуществлялось наблюдение подстилающей поверхности с помощью бортовой черно-белой телевизионной камеры. Скорость полета составила 12...22 м/с. За время полета аппарат пролетел 16 км. Полеты выполнялись над пересеченной местностью.

Это несомненное техническое достижение американских конструкторов и ученых показало возможность создания летательного аппарата массой около 100 г, способного решать разведывательные задачи. Однако этот полет ставит больше вопросов, чем дает ответов.

Создание ЛМА перешло из теоретических и экспериментальных

исследований в конкретную плоскость, и это сразу же ставит вопрос: зачем нужны ЛМА?

В журнале "Aviation Week and Space Technology" (1998, 8. VI, v. 148, № 23. Р. 4,42-43,47-48) предлагается достаточно широкий спектр задач ЛМА. Прежде всего, ЛМА рассматриваются как аппараты, заменяющие более дорогую военную технику, но способные решать те же задачи, а именно:

- применение в качестве индивидуального разведывательного средства, а также в качестве техники одноразового использования (например, при проведении химико-бактериологической разведки или диверсионных операций);
- ведение разведки по различным физическим параметрам (визуальную, радиационно-химическую, биологическую, акустическую);
- в условиях боя в городе обследование зданий, находящихся в зоне боевых действий;
- доставка взрывчатых устройств для поражения уязвимых узлов боевой техники противника (например, кабелей информационных и энергетических сетей). Небольшая грузоподъемность может компенсироваться их групповым применением или проведением серии последовательных подрывов небольшой мощности, но в итоге выводящих из строя объекты противника на длительное время;
- доставка химических средств поражения личного состава и техники, не попадающих под запрет действующих международных соглашений;
- скрытое проникновение на объекты противника для сбора аудио-, видео и другой информации;
- противодействие распространению оружия массового поражения. Так, посредством ЛМА, снабженных химическими, биологическими и радиационными датчиками, предполагается скрыто контролировать деятельность производств, места хранения и маршруты перевозки оружия массового поражения на зарубежных территориях;
- борьба с незаконным производ-

ством и оборотом наркотиков;

- патрулирование объектов и территорий в целях их защиты от несанкционированного проникновения. При использовании ЛМА планируется достичь более высокой эффективности охраны по сравнению с обеспечиваемой личным составом военных или специальных подразделений, в том числе за счет фактора скрытности;
- мониторинг последствий природных и техногенных катастроф и поиска пострадавших людей, а также для обследования объектов, присутствие на которых опасно для человека (например, разрушенных в результате землетрясения, зараженных радиоактивными, вредными химическими или биологическими веществами).

Предложенный спектр задач показывает, что подавляющее большинство из них способны выполнять существующие ДПЛА, а групповое использование ЛМА для доставки взрывных устройств относится, скорее, к области деятельности Дэвида Копперфильда, чем к военной технике. При этом несомненно, что ЛМА с наземной аппаратурой управления будет не дешевле ДПЛА "Пойнтер" разработки той же "Аэро Вайронмент" и имеющего массу 4 кг.

Пока просматривается только один вид задач, которые не может решить любой из существующих ДПЛА, но сможет решить ЛМА - это полеты по улицам города на уровне первых этажей, полеты под кронами деревьев и внутри помещений. Реализация этих возможностей ЛМА и является первостепенной. Вопросы о типах размещаемой на нем полезной нагрузки являются вторичными.

ЛМА разработки фирмы "Аэро Вайронмент" имеет аэродинамическое качество 3-4, что как минимум в 3 раза хуже, чем у ДПЛА традиционных размеров. Тяговооруженность этого ЛМА составляет 0,07 Вт/г, что в 2,5 раза хуже, чем у традиционных ДПЛА, и в 4 раза хуже, чем у спортивных самолетов. Это влечет за собой очень плохую маневренность и невозможность летать при достаточно сильном ветре и беспокойной атмосфере, при этом всякие рассуждения о полетах по улицам, под кронами деревьев и в помещениях теряют смысл.

Трудности, с которыми столкнулись разработчики ЛМА, обусловле-

ны прежде всего тем, что при малых габаритах летательного аппарата (в данном случае 150 мм) традиционные аэродинамические поверхности (крылья или профилированный фюзеляж) имеют крайне низкие аэродинамические характеристики, а органы управления в виде отклоняемых поверхностей малоэффективны. И если для успешного развития ДПЛА в 80-е годы достаточно было уменьшения габаритов радиоэлектронных систем, а собственно летательный аппарат создавался путем простого масштабирования традиционных самолетных схем, то для создания ЛМА необходимо принять принципиально новые решения, прежде всего в облике собственно летательного аппарата.

Создание ЛМА потребует серьезных исследований в различных отраслях науки и техники. Чтобы достичь максимального эффекта, эти исследования должны быть ориентированы на создание ЛМА, что не исключает решения многих проблем в других областях техники в качестве побочного эффекта.

Можно выделить следующие основные направления работ:

- создание новых аэродинамических схем летательных аппаратов, обеспечивающих более высокое аэродинамическое качество при малых линейных размерах. Поскольку размеры ЛМА в идеале не должны превышать размеров крупных насекомых, потребуется серьезное рассмотрение некоторых аспектов полетов насекомых и птиц. С уменьшением размеров летательного аппарата растет вероятность применения машущего крыла;
- создание различных типов микродвигателей, в том числе газотурбинных, дизельных, электрических и турбореактивных;
- реализация адаптивного крыла, способного менять свой профиль в зависимости от режима полета для обеспечения управления полетом, а также рассмотрение возможности применения струйных рулей;
- разработка новых технологических процессов для изготовления как самого летательного аппарата, так и его механических и радиоэлектронных систем;
- создание микроприводов, в том числе с нетрадиционными принципами действия;
- существенное улучшение характеристик топливных элементов или

создание топливных элементов на новых принципах выработки энергии;

- создание микродатчиков абсолютного и относительного положения;
- разработка системы навигационного обеспечения и разработка принципов управления ЛМА при полетах в замкнутом пространстве;
- создание микротелекамер и иных датчиков (акустика, запахи) для получения информации;
- исследование вопросов заметности ЛМА;
- создание интегрированной конструкции летательного аппарата без четкого деления на системы и агрегаты для увеличения весовой отдачи ЛМА в целом.

По оценке наших специалистов, на основе разработанных в России элементов и традиционных для авиации технических решений в настоящее время можно создать летательные аппараты массой 650 г, размахом крыла около 400 мм, с электродвигателем, телевизионной аппаратурой в качестве полезной нагрузки, продолжительностью полета 20 мин.

Масса элементов такого летательного аппарата, г:

Телевизионная камера с передатчиком	50
Система автоматического управления	150
Радиокমানная линия	50
Маршевый двигатель	150
Топливные элементы	150
Элементы конструкции ...	100

Предполагаемая продолжительность режима висения - несколько минут. Это совпадает и с зарубежной информацией о разработке подобных экспериментальных летательных аппаратов.

Создание образца ЛМА, способного решать задачи, свойственные только этому классу летательных аппаратов, будет возможно после решения перечисленных выше принципиальных проблем, связанных главным образом с обликом летательного аппарата и новым двигателем.

Рисунки, иллюстрирующие основные положения настоящей статьи, приведены на четвертой стороне обложки.

Н.А. Шелепин, канд. техн. наук, ГНЦ РФ НПК "Технологический центр" МИЭТ

КРЕМНИЕВЫЕ МИКРОСЕНСОРЫ И МИКРОСИСТЕМЫ: ОТ БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ ДО АВИАЦИОННЫХ ПРИБОРОВ

Представлены основные направления и результаты разработок микросенсоров и микросистем Государственного научного центра Российской Федерации НПК "Технологический центр" МИЭТ за период 1994–1998 гг. Описаны основные характеристики и конструкции указанных сенсоров. Рассмотрены новые направления разработок по созданию сложных микросенсорных систем, проводимые в НПК ТЦ технология поверхностной микромеханики, технология многослойных модулей; разработка специализированных аналогоцифровых интегральных схем преобразования сигналов сенсоров.

Введение

Научно-производственный комплекс "Технологический центр" (НПК ТЦ) основан при Московском институте электронной техники (МИЭТ) в 1988 г. В 1989 г. в "Технологическом центре" запущен комплект технологического и аналитического оборудования для обработки кремниевых пластин диаметром 100 мм и изготовления фотошаблонов. В 1990 г. выпущены первые микросхемы по технологии КМОП. В настоящее время микросхемы и микросенсоры изготавливаются на производственных участках общей площадью 2200 м, включая чистые помещения класса "100" площадью 1000 м². Комплект технологического и аналитического оборудования обеспечивает выпуск до 1000 пластин диаметром 100 мм в месяц с проектными нормами до 1,5-1,2 мкм. Исследования и разработки "Технологического центра" можно условно разделить на три основных области микроэлектроника, микросистемная техника, микроэлектронная аппаратура.

В области технологий микросистем и микросенсоров исследования и разработки осуществляются с 1994 г. по технологии объемной микромеханики, а с 1997 г. - и по технологии поверхностной микромеханики.

Интегральные преобразователи механических величин и микродатчики на их основе

Интегральные преобразователи давления и модули на их основе. Первыми изделиями, разработанными и освоенными в производстве с использованием технологии объемной микрообработки, были кристаллы микросенсоров давления с плоской мембраной (интегральные преобразователи давления) ИПД-1 и ИПД-2. Их основные характеристики представлены в [1, 2]. Изменение толщины и других размеров мембраны

обеспечивает возможность изготовления преобразователей на номинальные давления от 0,1 до 30 МПа. Следует заметить, что на всей территории бывшего СССР технология изготовления преобразователей давления на пластинах диаметром 100 мм была разработана впервые. Технологами НПК ТЦ были решены проблемы:

- формирования высококачественных масок для глубокого анизотропного травления в щелочи;
- точного совмещения топологии мостовой схемы с топологией мембран на лицевой и обратной сторонах пластины (при отсутствии установок двухстороннего совмещения);
- температурного гистерезиса "нуля".

Кроме того, разработанная технология обеспечивает формирование на кристаллах преобразователей схемы температурной компенсации чувствительности, которая в последующем была реализована и на других кристаллах тензопреобразователей. Для расширения номенклатуры и удовлетворения потребностей отечественных производителей прецизионных датчиков разработана конструкция ИПД-4 с жестким центром для диапазонов давления 10-100 кПа, а также оригинальная конструкция кристалла ИПД-3 с тремя жесткими центрами и расположенными между ними параллельно друг другу резисторами мостовой схемы (рис. 1). Кристаллы поставляются различным организациям, среди которых особо следует отметить ОАО "АВТОЭЛЕКТРОНИКА" (г. Калуга), объем заказов которого в конце 1999 г. составил 5 тыс. шт. в месяц. В последние годы появилась новая форма взаимодействия с заказчиками, при которой "Технологический центр" обеспечивает изготовление кристаллов по их чертежам. Примером является кристалл ИПД-9, чертежи которого разработаны в НПП "Персей" (г. Раменское, Московская обл.). Эта фирма в последнее время является постоянным заказчиком данного изделия.

Далеко не все производители датчиков давления владеют технологией, обеспечивающей механическую развязку кристаллов ИПД от металлических или

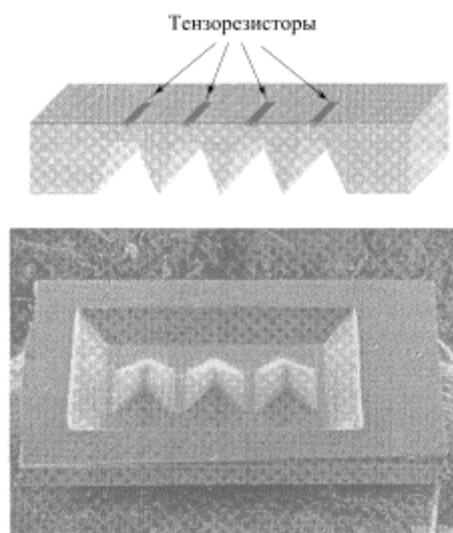


Рис. 1. Конструкция и микрофотография кристалла преобразователя давления с тремя жесткими центрами

пластмассовых корпусов. В связи с этим в НПК ТЦ разработана технология соединения кристаллов и кремниевых оснований с помощью легкоплавких стекол при температуре около 500°C. На основе чувствительных элементов, выполненных по такой технологии, разработан ряд модулей-преобразователей, обеспечивающих возможность их монтажа в корпуса без применения специальных технологий. Конструкция и технические характеристики модулей представлены в [3]. Данные модули применяются приборостроительными фирмами для изготовления различных датчиков давления, в том числе и прецизионных общепромышленного применения с классом точности 0,2 % в диапазоне температур -50 +70°C. Примерами подобных датчиков являются ТЖИУ406Д (ВНИИ автоматики Минатома, г. Москва) и ПМ-100, ПМ-500 (ЗАО МЕДИКОН-М, г. Москва), внесенные в реестр средств измерений.

Интегральные балочные тензопреобразователи и датчики на их основе. Следующим примером реализации возможностей объемной микрообработки кремния является разработка двух типов балочных тензопреобразователей (ТКБ-5 и ТКБ-6) [4], принципиальная конструкция которых представлена на рис. 2. Технология их изготовления, помимо операций, аналогичных операциям технологии изготовления кристаллов ИПД, включает дополнительные операции:

- объемная микрообработка боковых сторон концентраторов механических напряжений, которая в несколько раз превышает их прочность;
- формирование припойных столбиков на контактных площадках.

Последняя операция обеспечивает возможность непосредственной пайки изолированных проводов к кристаллам, что связано с особенностями их конструктивного использования в составе датчиков.

Преобразователи с двумя концентраторами напряжений используются в основном для изготовления датчиков силы. Принцип их действия ясен из рис. 3. Тензопреобразователь ТКБ-6 жестко заделывается параллельно силовым балкам, которые связывают между собой два основания. Смещение оснований под воздействием внешней силы вызывает одинаковый по величине, но различный по знаку изгиб концентраторов напряжения балочного тензопреобразователя, в каждом из которых расположена пара резисторов мостовой схемы. Данная

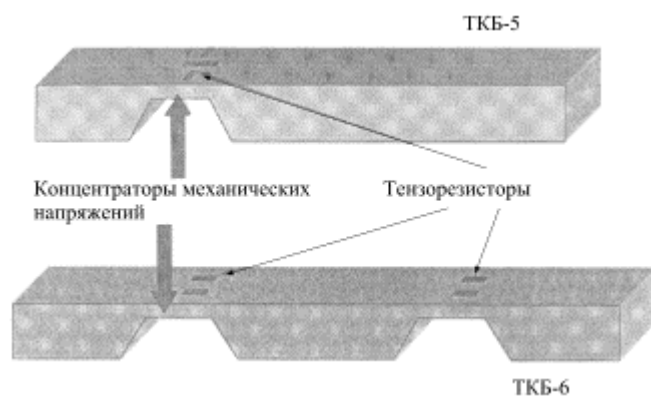


Рис. 2. Интегральные балочные преобразователи

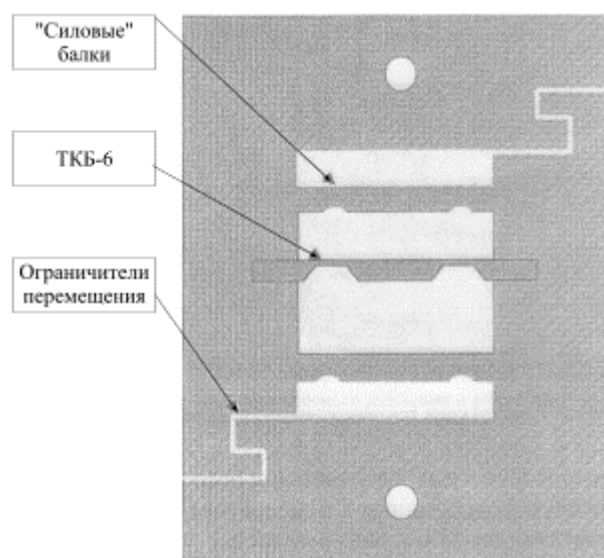


Рис. 3. Датчик силы на основе кремниевого балочного тензопреобразователя серии ПС

конструкция при сохранении высокой линейности преобразования обеспечивает чувствительность, примерно в 20 раз более высокую по сравнению с чувствительностью датчиков силы традиционной конструкции на основе пленочных тензорезисторов.

Эти датчики, в частности, используются в электронных бытовых безменах. Пример более сложной конструкции датчика представлен на рис. 4. Этот датчик на номинальное усилие 100-150 Н обеспечивает независимость показаний от точки приложения силы на установленной платформе размером до 30×30 см и

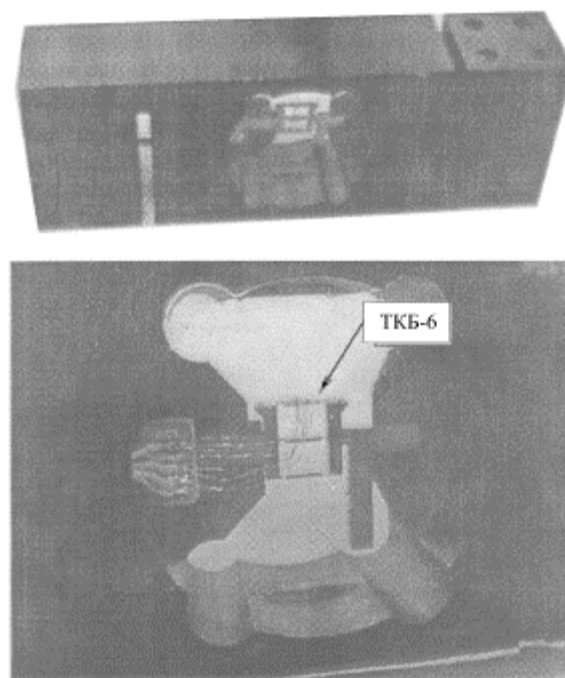


Рис. 4. Датчик силы серии ПС-1 и его кремниевый микро-механический чувствительный элемент

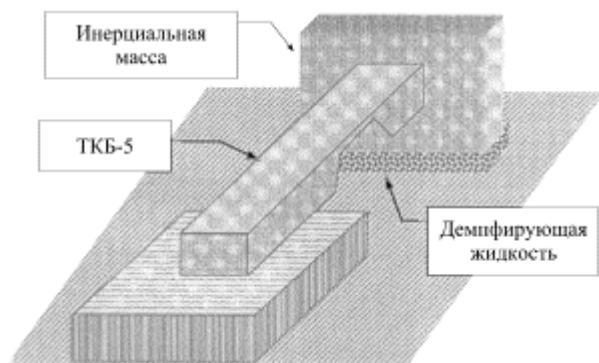


Рис. 5. Конструкция тензоакселерометра серий АВИ и МТА

используется для изготовления портативных торговых весов, разработанных Сосненским приборостроительным заводом (Калужская область). Эта же конструкция применена для разработки лабораторных весов с динамическим диапазоном 10000 (1200×0,1; 560×0,05 и 240×0,02 г). Впервые в мире на полупроводниковых датчиках получены значения нелинейности и гистерезиса менее 0,03 % при выходном сигнале 40 мВ.

Балочный тензопреобразователь ТКБ-5 использован для создания серии акселерометров АВИ (рис. 5), разработанных совместно со специалистами ЛИИ им. Громова (г. Жуковский, Московская обл.) [3]. Данные акселерометры благодаря малым габаритным размерам и прочному титановому корпусу оказались весьма удобными при измерении вибраций в летных испытаниях. Высокий показатель отношения поперечной чувствительности к основной (не более 3 %) достигнут в результате использования оригинальной конструкции, защищенной патентами Российской Федерации. На рис. 6 показан кремниевый кристалл высокочувствительного тензоакселерометра, изготовленный методами объемной микрообработки. Выполненные на основе данного элемента образцы акселерометров имеют чувствительность 0,4 мВ / (г · В) и рабочий частотный диапазон 0-500 Гц. Однако кристаллы чувствительного элемента требуют очень аккуратного

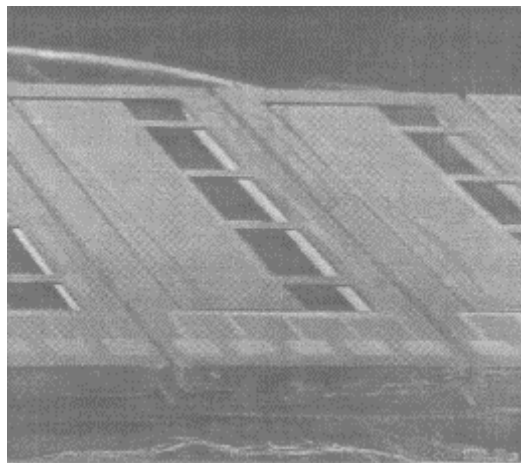


Рис. 6. Кристаллы высокочувствительного тензоакселерометра, изготовленные методами объемной микрообработки

обращения вследствие чрезвычайной хрупкости, что создает дополнительные трудности при их изготовлении.

Новые разработки

Поверхностные микромеханические структуры.

К настоящему времени разработана технология получения балочных, консольных и мембранных элементов из пленок поликристаллического кремния. Исследованы механические напряжения в пленках поликремния и эффект "прилипания". На рис. 7 представлена микрофотография системы балок и консолей из поликремния толщиной 1 мкм и длиной балок до 70 мкм, на основе которых возможно построение чувствительных элементов сенсоров физических величин. В частности, получены экспериментальные образцы поликремниевых мембран площадью до 100×100 мкм с вакуумной полостью, являющихся сенсорами абсолютного давления. Исследуются возможности объединения технологий поверхностной и объемной микромеханики для создания инерциальных микросистем с чувствительными элементами емкостного типа. На рис. 8 представлена микрофотография чувствительного элемента микротермоанемометра. Пленочные терморезисторы, изготовленные методами планарной технологии, оказываются подвешенными в воздухе благодаря вытравливанию толстого слоя кремния под ними методами анизотропного травления.

Специализированные интегральные схемы для преобразования сигналов микросенсоров. Разработана элементная база (операционные и трансимпедансные усилители, источники опорного напряжения, библиотека элементов цифровой логики) для создания специализированных аналого-цифровых контроллеров в целях выполнения следующих функций:

- преобразование сигнала основного сенсора в цифровой код;
- преобразование сигнала сенсора температуры в цифровой код;

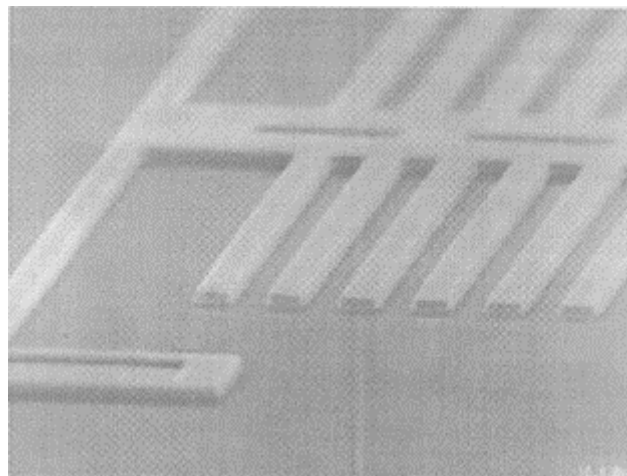


Рис. 7. Поликремниевые микромеханические элементы (балки консоли) над поверхностью кремниевого кристалла

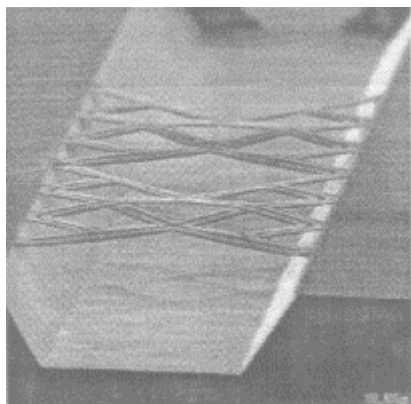


Рис. 8. Чувствительный элемент микротермоанемометра

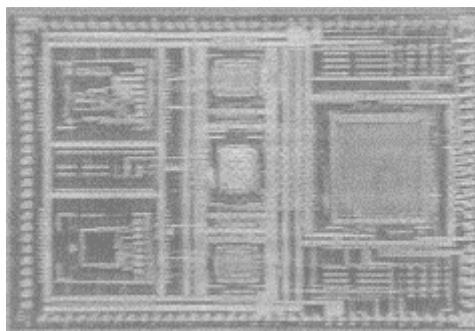


Рис. 9. Многокристальная микросистема

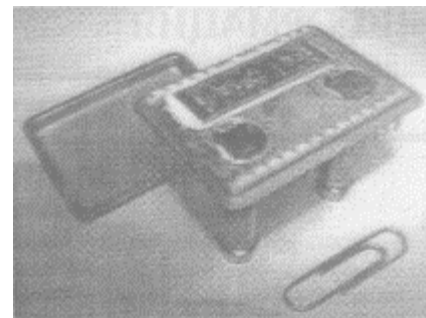


Рис. 10. Микросенсорная система измерения барометрического давления и разности давлений

- цифровой обмен с внешней системой цифровой калибровки датчиков и запись в память калибровочных коэффициентов,

- расчет точных значений выходного сигнала по значениям сигналов основного сенсора, сенсора температуры и калибровочных коэффициентов,

- передача рассчитанного цифрового сигнала во внешнее считывающее устройство или преобразование его в аналоговый сигнал.

Такие микроконтроллеры в сочетании со стабильными первичными преобразователями позволят создать сенсорные системы повышенной точности для измерения физических величин в широком диапазоне внешних воздействующих факторов, в первую очередь температуры.

Многокристальные модули. Для создания описанных выше микросистем специального применения (авиация, космос) предполагается использовать технологию многокристальных модулей. Чипы различных сенсоров и интегральных схем соединяются в микросистему на кремниевой подложке, которая изготавливается по технологии БИС. Основные преимущества данной технологии [8].

- совпадение температурных коэффициентов сенсоров, схем и подложки;
- хороший теплоотвод;
- высокая плотность проводников для соединений между чипами.

На рис. 9 представлен макет подобной микросистемы. На кремниевом чипе-подложке с трехуровневой алюминиевой металлизацией размещены два сенсора, чипы схемы стабилизатора напряжения для сенсоров, схемы АЦП и схемы цифровой обработки сигналов.

Следует заметить, что оценка данной технологии, представленная в [9], не во всем верна. Подложки-носители должны изготавливаться не по тонкопленочной технологии, а по технологии БИС, что обеспечит требуемое высокое качество и высокую плотность трассировки межсоединений.

На рис. 10 представлена микросистема измерения барометрического давления и разности двух давлений, имеющая аналоговые выходные сигналы, причем оба

сенсора измеряют абсолютное давление, а их разность определяется электронной схемой. Микросистема разработана на основе технических требований МНПК "Авионика".

* * *

Представленные результаты показывают возможности отечественной микроэлектронной технологии в области кремниевых микросенсоров и микросистем. Все сенсоры изготовлены в НПК ТЦ. Они применяются многими российскими фирмами для разработки и изготовления различных систем контроля и управления. Обозначенные направления перспективных исследований и полученные первые результаты позволяют надеяться на завершение в ближайшие годы разработок технологий сложных микросенсорных систем, в том числе специального применения.

Список литературы

1. Зимин В.Н., Чаплыгин Ю.А., Шабратов Д.В., Шелепин Н.А. Интегральные преобразователи давления на нормальный ряд от 0 до 30 Мпа // Измерительная техника. 1994. №2. С. 35.
2. Зимин В.Н., Салахов Н.Э., Чаплыгин Ю.А., Шелепин Н.А. Прецизионные интегральные преобразователи давления // Измерительная техника, 1995. №1. С. 20-21.
3. Галушков А.И., Зимин В.Н., Чаплыгин Ю.А., Шелепин Н.А. Кремниевые интегральные датчики физических величин на основе технологии микроэлектроники // Электронная промышленность. 1995. №4-5. С. 95-101.
4. Зимин В.Н., Салахов Н.Э., Шелепин Н.А. Интегральные балочные тензопреобразователи // Измерительная техника. 1994. №3. С. 36.
5. Панкратов О.В., Брехов Р.С., Погалов А.И., Шелепин Н.А. Разработка и исследование интегральных пьезорезистивных акселерометров // Известия вузов. Электроника. 1997. №1. С. 57-61.
6. Годовицын И.В., Шелепин Н.А., Лыженкова Г.А. Формирование поверхностных микромеханических структур из пленок поликремния, получаемых на промышленных установках осаждения ИЗОТРОН // Известия вузов. Электроника. 1997. №2. С. 49-54.
7. Shelepin N.A. and Godovitsin I.V. Fabrication of polysilicon surface-micromachined structures using FAB IC processes // Proceeding of the 11th NEXUSPAN Workshop on Microsystems in Environmental Monitoring, 13-14 December. 1996. Moscow Russia.
8. Шелепин Н.А. Конструктивно-технологический базис микросенсорных систем // Сб тез Всероссийская научно-техническая конф. "Электроника и информатика-97" МИЭТ 1997. Ч. 1. С. 211-212.
9. Качаев И.А., Котов В.Н., Клиндухов В.Г., Кухаренко А.П. Микроэлектронные сенсорные системы: опыт создания и применения // Микросистемная техника, 1999. № 1. С. 32-35.

**Российская Академия наук,
Министерство науки и технологий Российской Федерации,
Министерство образования Российской Федерации,
Российский фонд фундаментальных исследований,
Федеральный фонд развития электронной техники,
Научный совет Российской Академии Наук по аналитической химии,
Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
Российский научно-исследовательский институт "Электронстандарт",
Международная программа Европейского Сообщества NEXUS**

приглашают Вас и Ваших коллег принять участие в работе Всероссийской конференции с международным участием по современным проблемам разработки и применения сенсоров и элементной базы микросистемной техники

«Сенсоры и микросистемы» СЕНСОР-2000

21-23 июня 2000 г., Санкт-Петербург.

Конференция является третьей из серии проходивших в Санкт-Петербурге конференций "Химические сенсоры 89" (1989 г.) и MST-SENSOR TECHNO'93 (1993 г.).

В третий день работы конференции, 23 июня, будет проведена специальная сессия на английском языке "Russian sensors and MST in the 21st century", спонсируемая в рамках международной программы Европейского сообщества в области микросистемной техники "NEXUS", на которой будут представлены достижения и перспективы российских и европейских ученых в области разработки и создания элементной базы микросистемной техники.

Основные темы конференции:

- теория и принципы функционирования сенсоров и актюаторов;
- новые материалы для сенсорики и микросистемной техники;
- сенсоры химического состава;
- сенсоры механических величин;
- сенсоры температуры и потоков тепла;
- биосенсоры;
- сенсоры для экстремальных условий эксплуатации;
- интеллектуальные сенсоры;
- мультисенсорные системы ("электронный нос", "электронный язык");
- вторичные преобразователи и методы обработки информации;
- применение сенсоров;
- элементная база микросистемной техники.

В период проведения конференции предполагается организация выставки "Сенсоры и микросистемы".

Заявки на участие и тезисы докладов принимаются до 15 апреля 2000 г.

Адрес оргкомитета конференции:

**"Сенсоры и микросистемы"
СЕНСОР**

**2000 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9
Санкт-Петербургский университет, химический факультет
Электронная почта (e-mail): sensor2000@VK5346.spb.edu
Телефон/факс: (812) 328 95 95**

Вся информация о конференции представлена на сайте в Интернет: www.sensor.spb.ru

Семинар-совещание

"Новые отечественные высокотехнологичные процессорные БИС: опыт разработки и применения"

15 декабря 1999 года в г. Москве Ассоциацией заказчиков и потребителей унифицированных изделий электронной техники "Фонд УНИЭТ" и Гензаказчиком проведено семинар-совещание на тему "Новые отечественные высокотехнологичные процессорные БИС: опыт разработки и применения". В работе семинара-совещания приняли участие 305 специалистов, представляющие 137 предприятий-разработчиков радиоэлектронной аппаратуры и предприятий электронной промышленности.

Интерес научно-технической общественности к семинару-совещанию был вызван, в первую очередь, отсутствием в течение достаточно длительного периода отечественных высокотехнологичных ИЭТ, сопоставимых по характеристикам с аналогичными зарубежными изделиями, что привело к необходимости широкого использования в разработках РЭА БИС иностранного производства. Доклады и сообщения, подготовленные специалистами НТЦ "Модуль", МЦ Спарк-технологии, НПЦ ЭЛВИС, НИИ Супер ЭВМ и НИИВК, АО "Микрон", КГБ "Светлана-микроэлектроника", АО "Ангстрем", НИИЭТ, были заслушаны с огромным вниманием и убедительно продемонстрировали высокий научно-технический потенциал ряда творческих коллективов, достижения которых в проектировании высокотехнологичных ИЭТ соответствуют мировому уровню, а отдельные разработки не имеют аналогов в мире. Представители ведущих предприятий электронной промышленности ознакомили участников семинара-совещания с номенклатурой новых изделий, освоение которых стало возможным благодаря проведенному в последние годы техническому перевооружению.

Участники семинара-совещания дали высокую оценку работе, проделанной экспертным советом Ассоциации "Фонд УНИЭТ" и его рабочими группами по созданию проекта "Перечня минимально необходимой номенклатуры ЭРИ иностранного производства, рекомендуемых для применения в РЭА и воспроизведения в РФ". В процессе работы над проектом Перечня удалось свести номенклатуру высокотехнологичных ЭРИ иностранного производства (более чем 2000 типонаименований), использованных в конкретных разработках РЭА, к 170 типонаименованиям. В настоящее время данный проект Перечня используется в качестве справочного и рекомендуемого материала более чем 150 предприятиями при разработках РЭА специального назначения.

В результате обсуждения докладов и сообщений и развернувшейся дискуссии по наиболее важным вопросам повестки дня был принят итоговый документ "Предложения участников семинара-совещания для Ассоциации "Фонд УНИЭТ" и Гензаказчика по решению проблемы обеспечения разработок РЭА специального и двойного назначения перспективной элементной базой".

В. И. Штейнберг, канд. техн. наук,
директор Ассоциации "Фонд УНИЭТ"

Генеральный спонсор
AGFA

Международная специализированная выставка
приборов и оборудования
для промышленного неразрушающего контроля

ДЕФЕКТОСКОПИЯ 2000

13-16 июня 2000 г.
Санкт-Петербург, Михайловский манеж

Организатор выставки
Выставочное объединение "РОССТЭК"
Россия, 197110 Санкт-Петербург, д. 288
Тел: (812) 320-8091, 320-8092; факс: (812) 320-8090
E-mail: rostec@rostec.spb.ru; Internet: http://www.rostec.ru

Информационное обеспечение
Журнал "В мире неразрушающего контроля"
Россия, 196220 Санкт-Петербург, д. 277
Тел: (812) 324-8988; факс: (812) 324-0899
E-mail: expo@ndworld.com; Internet: http://www.ndworld.com

К сведению авторов журнала

“МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА”

Уважаемые авторы, при подготовке рукописей статей просим руководствоваться следующими рекомендациями

Объем статьи, предлагаемой к публикации, не должен превышать 15 страниц машинописного текста, напечатанного на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через два интервала (не более 30 строк и 60 знаков в строке на странице). В объем статьи входят: текст, иллюстрации, таблицы и библиография.

В редакцию представляются в двух экземплярах:

- текст статьи, подписанный всеми авторами с указанием даты представления;
- иллюстрации, подписанные на обороте карандашом с указанием фамилии автора, номера иллюстрации и названия статьи;
- перечень подрисовочных подписей;
- аннотация размером не более 5-7 строк;
- реферат - **на русском и английском языках**;
- фамилии, инициалы авторов и название статьи - **на английском языке**;
- сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, занимаемая должность, домашний и служебный адреса и телефоны, факс и E-mail, а также паспортные данные).

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень, название организации (полное в соответствии с последней редакцией устава), заглавие и аннотация.

Формулы, буквенные обозначения, цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми. Во втором экземпляре простым карандашом размечаются все символы и текстовые выделения: буквы - двумя черточками (прописные - снизу, строчные - сверху); верхние и нижние индексы (включая штрихи и степени) очерчиваются дужками $\cap$ и $\cup$ соответственно; полужирный шрифт подчеркивается прямой линией, курсив - волнистой линией, а разрядка - короткими штрихами. Следует обратить внимание на четкость математических знаков и сходных по начертанию букв (прописных и строчных, латинского и греческого алфавитов).

Иллюстрации выполняются с учетом последующего воспроизведения их средствами оперативной полиграфии (с использованием сканера): штриховые (чертежи, схемы, графики, рисунки) - программно, с использованием графических редакторов, или вручную (черной тушью или пастой) на белой плотной бумаге; тоновые (фотографии) - на матовой бумаге с высокой контрастностью.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом: для книг и сборников - фамилии и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год желательно общее число страниц; для журнальных статей - фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год, том, номер и номера страниц. Если число авторов более четырех, то необходимо указать первых трех со словами "и др.". Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений.

Статьи, набранные на компьютере, желательно представлять как в виде распечатки на принтере (рисунки на лазерном принтере), так и в файловом виде на дискете 3,25", выполненном в текстовом редакторе Microsoft Word.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – **Мальцев Петр Павлович**, д-р техн. наук, проф., начальник сектора Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, зав. каф. "Микросистемная техника" МИРЭА, г. Москва

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА – **Лучинин Виктор Викторович**, д-р техн. наук, доц., директор Центра диагностики и микротехнологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, г. С.-Петербург

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Антонов Борис Игоревич, главный редактор литературы по информатике и отраслевым изданиям, изд-во "Машиностроение", г. Москва

Аристов Виталий Васильевич, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, директор Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, п. Черноголовка, зав. каф. "Наноэлектроники" МФТИ

Васильев Александр Алексеевич, главный специалист Миннауки России, г. Москва

Гапонов Сергей Викторович, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института микроструктур РАН, зав. каф. "Электроника" Нижегородского государственного университета, г. Нижний Новгород

Горнев Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, зам. директора НИИ молекулярной технологии и завода "Микрон", г. Зеленоград

Градецкий Валерий Георгиевич, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией Института проблем механики РАН, г. Москва

Журавлев Петр Васильевич, канд. техн. наук, с.н.с., зам. директора Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники СО РАН, г. Новосибирск

Каляев Игорь Анатольевич, д-р техн. наук, проф., директор НИИ многопроцессорных вычислительных систем Таганрогского государственного радиотехнического университета, зав. каф. "Автомобильная электроника", г. Таганрог

Климов Дмитрий Михайлович, д-р техн. наук, проф., акад. РАН, академик-секретарь Отделения проблем машиностроения, механики и процессов управления РАН, директор Института проблем механики РАН, г. Москва

Кузин Александр Юрьевич, д-р техн. наук, с.н.с., начальник отдела 32 ГНИИИ МО РФ, г. Мытищи, Моск. обл.

Лифшиц Виктор Георгиевич, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Научно-технологического центра полупроводниковой микроэлектроники Института автоматики и процессов управления ДВО РАН, зав. каф. "Физика и технология материалов для полупроводниковой электроники" Дальневосточного государственного университета, г. Владивосток

Мокеров Владимир Григорьевич, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., зам. директора Института радиотехники и электроники РАН, зав. каф. "Полупроводниковые приборы" МИРЭА, г. Москва

Норенков Игорь Петрович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. "САПР" Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Панфилов Юрий Васильевич, д-р техн. наук, проф., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Петросянц Константин Орестович, д-р техн. наук, проф., зав. каф. "Электроника и электротехника" Московского государственного института электроники и математики (технического университета), г. Москва

Сауров Александр Николаевич, д-р техн. наук, доц., директор НПК "Технологический центр" Московского государственного института электронной техники (технического университета), г. Зеленоград

Сигов Александр Сергеевич, д-р физ.-мат. наук, проф., ректор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета), зав. каф. "Электроника конденсированных сред" МИРЭА, г. Москва

Телец Виталий Арсеньевич, д-р техн. наук, с.н.с., заместитель начальника управления 22 ЦНИИИ МО РФ, г. Мытищи, Моск. обл.

Чаплыгин Юрий Александрович, д-р техн. наук, проф., ректор Московского государственного института электронной техники (технического университета), зав. каф. "Микроэлектроника и микросистемная техника", МИЭТ, г. Зеленоград

Beloglazov V.I., Suhoveev S.P., Siitinen N.V. <i>Three-dimensional Micron and Submicron Structures by Used Fiber Glass Technologies</i>	6
New microcomponent constructions and method of their fabrication have been proposed and developed. These new approach based on fiber glass technology. The outstanding opportunity of this technology have been demonstrated and used for fabrication of submicrometer X-ray mask synchronous micromotor with contained permanent magnet microcoil 7 micrometer lines. Our technology give opportunity for fabrication of structures with extreme high aspect ratio spiral-like conductor and so on.	
Developed technology do not used expensive X-ray lithography. Possible application described technology for production different microcomponents for electron and X-ray optics components MEMS and other devices have been discussed.	
Koliasnikov V.A., Rakhimbabaev T.Ja. <i>Synchrotron Radiation in Micro-technology</i>	9
LIGA microtechnology, the issues of physics and processing for understanding and solving product examples and areas of application are briefly outlined	9
Adamov U.F., Korneev N.V., Mokerov V.G., Nevolin V.K. <i>Creation and Electrical Properties of Planar 2D-nanodimensional Structures</i>	13
From the combination of methods of a traditional planar technology and probe methods of an oxydation of metal conduct tracks on the dielectric substrate were created the double-electrode planar units with 2D-nanodimensional necks in a atomic force microscope. Such structures should exhibit effects in conductivity including quantum effects (nonlinearity of voltage-current characteristics). The probe methods of creation allow to create double-electrode planar units with set of nonlinear current-voltage characteristics having different functionalities.	
Ivaschenko E., Tsvetkov Yu. <i>The Method of the Dimensional Stop-etching of the Silicon in the Micromechanical Product's Manufacture</i>	16
The process of the anisotropic etching of (100)-oriented silicon with the electrochemical stoppage for the micromechanical products manufacture was investigated. The possibility of self-stop of etching at the epitaxial layer by applying of the passivation potential was confirmed. Construction of a chuck for wafer topology protection system was developed and investigated. The nature of the rate dependence upon process temperature was established. The optimal manufacture conditions were defined.	

Bykov V.A. <i>Micromechanics for Scanning Probe Microscopy and Nanotechnology</i>	21
The possibilities and prospects of development of detector elements for scanning probe microscopy have described. Using the sharp tips on the springy levers named cantilevers it is possible to measure a distribution of van-der-Waals forces electrostatic and magnetic fields electrodynamics forces adhesions and frictions interactions heat flows conductivity. In addition to these cantilevers can be used as instruments for the surface modification.	
In work described technological approaches to the cantilevers production made review to product the companies-producers of nanotools for SPM discussed results of last developments on making the complex AFM based microsystems.	
Analysis of trends of development shows that progress in SPM and nanotechnology will be connected with the progress in MEMS technology in the direction of multiprobe robototechnic intellectual instruments.	
Petrosyan E.A., Nikiforova L.N. <i>Uninhabited Helicopters from Minuteman to Microhelicopters</i>	33
This paper addresses the recent status of uninhabited helicopters and problems connected with the design of microhelicopters.	
Jankevich Ju.I., Berkin Ju. V. <i>Microaircraft State and Development Perspectives</i>	37
The main singularities of distant-piloted aircrafts and the history of their development are described. The requirements of AF USA to microaircrafts and also to the problems which microaircrafts have been solved and short results of works by creation of microaircrafts experimental model are represented.	
Shchepin N.A. <i>Silicon Microsensors and Microsystems from Consumer Techniques to Avionics</i>	40
The main trends and results of development of microsensors and microsystems of the State scientific center of Russia Federation SMC "Technological Center" MSIEE for a period from 1994 to 1998 are presented. The main characteristics and designs of the named sensors are described. The new directions in design of complex microsensors systems held in SMS TC is discussed:	
• surface micromechanics technology;	
• multichip module technology;	
• development of a single-purpose integrated circuits of transformation of sensors signals.	

Подписку за рубежом принимает

АО "НАУКА ИНТЕРНЕЙШНЛ"

107076, Россия, Москва, Стромынский пер., 4

Тел. (095) 269-71-41

Факс (095) 269-48-97

Remittance may be wired to Bank:

COMMERCIAL BANK "ROSBANK" (SWIFT IRVT US3N)

(P.O. Box 208, 11, Masha Poryvaeva Str., 107078, Moscow, Russia)

Ace. № 890-0372-508 with BANK OF NEW YORK, NEW YORK, USA,

In favour of Joint-Stock Company "Nauka International",

Ace №40702840100000014653/USD

The "NAUKA INTERNATIONAL" address is:

4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia

Tel. (095) 269-71-41

Fax (095) 269-48-97

Journal

"MICROSYSTEMS ENGINEERING" (MSE)

Editor in Chief Ph. D Petr P. Maltsev

Index 79493. Preis 96.00 \$

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia

Tel. (095) 269-55-10