

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 531.768:621.38

В. А. Паршин, канд. техн. наук, **В. В. Петрашко**,
А. К. Саломатин, **В. М. Соловьев**, канд. техн. наук,
В. И. Харитонов

ФНПЦ Раменское приборостроительное
конструкторское бюро, г. Раменское,
Московская область

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Приведены результаты работ, проводимых ФНПЦ РПКБ в области разработки технологии изготовления кремниевых акселерометров, чувствительными элементами которых являются кремниевые маятники с упругими перемычками. Перемычки должны иметь толщину порядка 10 мкм и минимальные остаточные механические напряжения. Рассмотрены два способа изготовления маятников. Первый способ основан на использовании диффузии примеси (бора) на заданную глубину для образования "скин-слоя" и последующем травлении. При втором способе упругий подвес формируется без легирования, методом размерного травления исходной кремниевой пластины. Показаны преимущества и недостатки каждого способа.

В настоящее время идет процесс широкого внедрения достижений кремниевой микроэлектронной технологии в разработку датчиков различного применения. Кремниевая микромеханика становится практически отдельной областью исследования и разработок. В ФНПЦ РПКБ на основе подобных технологий была разработана целая серия маятниковых акселерометров со встроенной гибридной электроникой для авиационных систем инерциальной навигации и управления различного назначения.

В своей работе в данной области мы в первую очередь исходили из возможностей собственной микроэлектронной технологической базы, что во многом и определило конструкцию и технологию изготовления чувствительных кремниевых элементов акселерометров. Обычно чувствительные элементы подобных акселерометров представляют собой кремниевый маятник, который может поворачиваться на упругих перемычках.

Конструкции двух основных вариантов кремниевых маятников разработанных акселерометров представлены на рис. 1 (см. третью сторону обложки). Чувствительный элемент первого акселерометра

(рис. 1, а) представляет собой кремниевый маятник толщиной 0,38 мм и диаметром 18 мм. Внешняя часть маятника может поворачиваться относительно внутренней части на двух упругих перемычках размерами $1,3 \times 0,12 \times 0,008$ мм. В дальнейшем на маятник устанавливается обмотка датчика момента и напыляются электроды для емкостного датчика угла. Для подвода питания к обмотке датчика момента используются гибкие токоподводы. Кроме того, на маятнике установлена дополнительная масса для создания маятниковости. Зазор между маятником и статорными электродами составляет 0,021 мм. В акселерометре используется датчик момента магнитоэлектрического типа. Акселерометр имеет встроенную электронику обратной связи, изготовленную на основе гибридно-пленочной технологии.

Чувствительный элемент акселерометра АЦ-1 (рис. 1, б) состоит из двух маятников размерами $5 \times 3,8 \times 0,38$ мм, каждый из которых подвешен на трех упругих перемычках, одна размерами $1,2 \times 0,7 \times 0,010$ мм, а две другие — размерами $0,6 \times 0,7 \times 0,010$ мм. Причем одна, широкая, перемычка расположена на одной стороне пластины, а две другие — на другой. Номинальный зазор между маятниками и статорными пластинами датчика угла составляет 0,030 мм. Емкости, образованные между маятниками и статорными пластинами, включены в состав задающих контуров двух генераторов. Разностная частота этих сигналов является выходным сигналом акселерометра.

Основной задачей при изготовлении чувствительных кремниевых элементов является получение упругих перемычек толщиной порядка 10 мкм, по возможности с минимальными остаточными механическими напряжениями в них. В соответствии с разработанной на предприятии технологией перемычки формировались способом диффузии примеси (легированием) на заданную глубину. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) приведена конструктивная схема упругой перемычки подвеса. Процесс изготовления такой перемычки состоит из двух основных стадий:

- формирование на поверхности полупроводниковой пластины (ППП) легированных бором слоев в местах элементов маятника;
- травление лишнего кремния до получения заданной формы чувствительного элемента.

Таким образом, задача сводилась к получению легированного слоя необходимой толщины с концентрацией примеси бора, устойчивого к растворению в органическом травителе. Конструкция и технология кремниевых датчиков с легирован-

ными слоями хорошо изучена и описана в литературе [1–3].

В нашем случае задача решалась с использованием минимального количества термодиффузионного оборудования, практически применялась только система типа СДОМ. В качестве источника примеси использовались или твердые планарные источники (ТПИ) — нитрид бора или жидкий источник типа композиции боросиликатной средней концентрации (КБСК), наносимый способом центрифугирования. Основной недостаток КБСК — невозможность равномерного нанесения бора центрифугированием на ППП с предварительно сформированным на ней рельефом. При использовании ТПИ неравномерность образования боросиликатного стекла (БСС) связана в первую очередь с неравномерностью потоков газов, обтекающих ППП и ТПИ в реакторе. Проблема равномерного образования БСС и загонки примеси решалась за счет изменения формы ТПИ и поворота ППП в процессе загонки. Так как не имелось в наличии оборудования для получения защитных пленок оксида кремния при низких температурах, то маскирование загрязненной примеси не применялось, в результате чего часть примеси диффундировала не в глубь ППП, а испарялась с поверхности на этапе разгонки. В результате для получения высокой концентрации примеси в перемычке приходилось получать на этапе загонки поверхностную концентрацию на несколько порядков выше оптимальной, что приводило к образованию "скин-слоя" на поверхности в процессе разгонки, который резко затруднял снятие БСС со свободных мест топологии. В то же время, если предупреждать образование "скин-слоя" разгонкой в окислительной атмосфере, резко уменьшается поверхностная концентрация примеси и, соответственно, концентрация примеси в глубине перемычки.

Для достижения концентрации $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ на глубине 10 мкм требуется время около 10 ч при температуре разгонки порядка 1150 °С. При использовании в качестве защитной маски оксида кремния его толщина должна составлять 1,5–2 мкм для того, чтобы он не потерял своих защитных свойств. Практически получить такую толщину качественного бездефектного оксида термическим окислением весьма проблематично. В результате исследовательских и опытных работ была предложена следующая технология получения высоколегированных перемычек:

- 1) получение оксида толщиной 1 мкм (окисление три часа во влажном кислороде и один час в сухом);
- 2) фотолитография для вскрытия окон для формирования перемычек;
- 3) загонка примеси (формирование БСС);
- 4) первая разгонка (три часа при 1150 °С, начинается в среде аргона, заканчивается в окислительной среде);

5) фотолитография, аналогичная 2-му этапу (удаляется БСС в окнах);

6) загонка примеси (аналогично 3-му этапу);

7) вторая разгонка (аналогично 4-му этапу);

8) удаление оксида и БСС плавиковой кислотой со всей пластины;

9) окисление и одновременная разгонка при 1150 °С в течение двух часов (толщина оксида 0,6 мкм);

10) фотолитография, аналогичная 2-му этапу;

11) загонка примеси (аналогично 3-му этапу);

12) разгонка в окислительной среде в течение двух часов;

13) фотолитография для травления контура изделия;

14) травление контура, снятие остатков оксида и БСС.

Конечным результатом являются чувствительные кремниевые элементы с перемычками толщиной 10 мкм. На готовых изделиях не наблюдалось следов образования "скин-слоя", разброс толщины перемычек на пластине находился в пределах 5 %.

На рис. 3 представлено распределение примеси в перемычке на разных этапах разгонки.

По данной технологии разработана целая серия авиационных акселерометров [4]. Преимущество подобной технологии — простота реализации. Однако у нее имеется существенный недостаток: напряженность структуры упругого подвеса, вызванная легированием (в данном случае — диффузией атомов бора). В отдельных случаях это приводило к деформации перемычек, причем во внешнюю сторону от пластины маятника. А так как перемычка находится на поверхности маятника, этот дефект не позволяет уменьшить зазор между маятником и статорными пластинами для обеспечения заданной перегрузочной способности электростатического акселерометра. Напряженность структуры приводила также к хрупкости перемычек упругого подвеса и к завышенным значениям параметров тяжения акселерометра. Кроме того, замер остаточных напряжений перемычек представляет сложную задачу, поэтому такие измерения проводятся в соб-

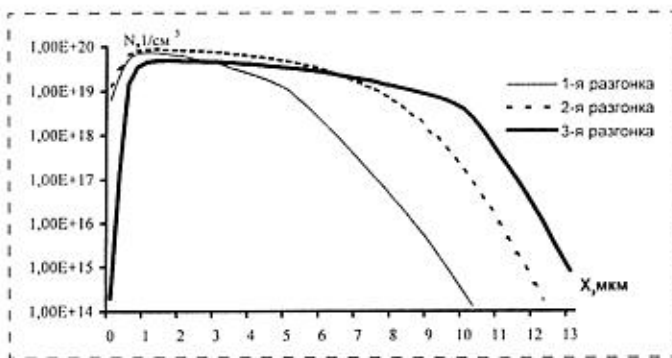


Рис. 3. Распределение примесей в перемычке на разных этапах разгонки

ранном приборе, что приводит к необходимости его повторной переборки.

Для исключения данного дефекта и уменьшения разницы температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) было предложено в качестве маятника и статорных пластин использовать систему кремний—окись кремния, а упругий подвес формировать без легирования методом размерного травления в центре (по толщине) исходной кремниевой пластины.

Такой способ отличается от способа получения легированных перемычек относительной простотой, но предъявляет высокие требования к исходным ППП. Разброс по толщине пластины не должен превышать допуски на толщину готовой перемычки. Только в этом случае возможно получение готовых изделий одновременно на всей пластине.

Сформировать перемычку в середине пластины можно двумя способами:

- протравить пластину до середины, провести фотолитографию топологии перемычки на ее толщину и дотравить с противоположной стороны;
- сделать "затравку" с двух сторон пластины на половину толщины перемычки и протравить с двух сторон до формирования перемычки.

Первый способ требует оборудования для проведения фотолитографии в глубине вытравленной пластины (а это 150 или 250 мкм), и здесь имеются определенные проблемы. Второй способ относительно проще, поэтому он и был выбран для изготовления чувствительного элемента электростатического акселерометра.

Общий вид чувствительного элемента электростатического акселерометра приведен на рис. 4 (см. третью сторону обложки). Маятник электростатического акселерометра имеет размеры $4 \times 4 \times 0,38$ мм, а упругие перемычки $1 \times 0,5 \times 0,01$ мм. Статорные пластины в этом акселерометре были также сделаны из кремния для обеспечения одинаковых ТКЛР. Поэтому для изоляции чувствительного элемента от его статорных обкладок маятник окисляется для получения слоя окисла толщиной около 1 мкм.

Из рис. 5 (см. третью сторону обложки) ясна сущность способа получения перемычек с помощью предварительной затравки. Предварительно каждая сторона маятника протравливается на половину толщины маятника h , а затем осуществляется травление всей пластины до получения перемычки.

Травление затравки и окончательное травление проводили в горячем растворе КОН. К недостаткам перемычек, сформированным таким способом, следует отнести клиновидность, появляющуюся на боковых гранях в результате бокового подтравливания. При использовании пластин кремния различной толщиной около 1 мкм формирование всех чувствительных элементов на пластине происходит практически одновременно. Готовые элементы

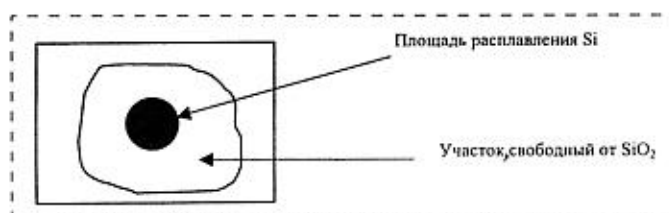


Рис. 6. Вид перфорированной контактной площадки

удерживаются в пластине на технологических перемычках, формируемых аналогично рабочим.

Одной из проблем при изготовлении данного маятника явилось создание контактной площадки на окисленном чувствительном элементе. Сложность заключается в невозможности проведения фотолитографии на готовом чувствительном элементе из-за малых размеров и наличия готовых перемычек. Удовлетворительные результаты дало применение сфокусированного лазерного излучения. Так как оксид кремния прозрачен для лазерного излучения, то испарение кремния происходит под слоем оксида, в результате чего происходит отрыв оксида под воздействием "взрыва" испаряющегося кремния. Подбирая мощность импульса, можно получить срыв оксида на площади, в несколько раз превышающей площадь сфокусированного излучения (рис. 6). В дальнейшем контактная площадка напыляется с использованием металлической маски.

Получение перемычек по середине толщины чувствительного элемента описанным способом требует применение исходной ППП со строгими допусками по толщине, непараллельности, разнотолщинности и т. д., так как все линейные размеры перемычки связаны с исходной заготовкой.

Реализация данной технологии позволила разработать новый кремниевый компенсационный акселерометр с электростатической обратной связью [4] с зазором между маятником и статорными пластинами 5–6 мкм, что обеспечило заданную перегрузочную способность не менее $\pm 10g$ и существенно уменьшило остаточные напряжения в упругих перемычках. Датчик этого акселерометра, маятник, сваренный со статорными пластинами, имеет размеры $9 \times 9 \times 2,5$ мм.

Список литературы

1. Стучебников В. М. Микроэлектронные датчики за рубежом // Приборы и системы управления. 1993. № 1. С. 18–21.
2. Концевой Ю. А., Литвинов Ю. М., Фаттахов Э. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов структур. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
3. Brotherton S. D., Read T. G., Willoughby A. F., Lamb D. R. An investigation of surface charge and stress in the Si/SiO₂ system // Semiconductor Silicon, 1973 / Ed. by M. R. Huff and R. R. Burgess-Princeton. N.-Y., 1973. P. 385–394.
4. Будзин В. Л., Паршин В. А., Прозоров С. В., Саломатин А. К., Соловьев В. М. Инерциальные датчики для систем навигации и ориентации // Микроинтегральная техника. 2000. № 2. С. 31–34.

УДК 535.417.2:62-752.4

Ю. А. Яценко, С. Ф. Петренко, В. В. Чиковани,
МНПП "Лилея", Киев,
В. В. Вовк,
ГП завод "Арсенал", Киев

СОСТАВНОЙ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ГИРОСКОПОВ КОММЕРЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Приводятся результаты испытания нескольких серий составных полусферических резонаторов с внутренней ножкой, разработанных МНПП "Лилея" и ГП завод "Арсенал" совместно с фирмой Litton Guidance & Control System (США) в рамках проекта № 558 УНТЦ.

Основные проблемы современного гироскопического приборостроения связаны с разработкой дешевых и в то же время надежных и точных инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ), что особенно актуально при разработке дешевых и компактных навигационных систем гражданского применения. Обусловлено это областями применения таких приборов: от навигационных систем малой авиации до систем управления автомобилем.

Для решения этой задачи были разработаны миниатюрные ЧЭ для полусферических резонаторных гироскопов диаметром 30 и 15 мм [1] и диаметром 20 мм [2]. Создан беззубцовый полусферический резонатор и предложена технология его балансировки [3], а также разработан составной полусферический резонатор [4]. Поскольку наиболее дорогостоящей частью волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) является полусферический резонатор, то снижение его стоимости и повышение технологичности являются важнейшей проблемой современной твердотельной гироскопии. Концепция составного резонатора состоит в изготовлении элементов резонатора (ножки и полусферы) с применением технологий сферической и цилиндрической оптики и соединения их с помощью глубокого оптического контакта. Это позволяет не только повысить технологичность и уменьшить стоимость ЧЭ, но и обеспечить необходимые геометрические и динамические характеристики, отвечающие приборам среднего и даже высокого классов точности.

Характеристики составных резонаторов

При выполнении проекта были разработаны конструкция и технология изготовления составно-

го полусферического резонатора из кварцевого стекла. Как показывают результаты измерения геометрии и динамических характеристик нескольких серий резонаторов, применяемые технологические процессы обработки и контроля поверхностей полусферического мениска и ножки позволяют обеспечить отклонения основных геометрических параметров на уровне требований на ЧЭ приборов среднего класса:

Диаметр, мм	30
Отклонение от сферичности N	< 1
Разнотолщинность мениска Δ , мм	$< 0,001$
Шероховатость поверхности Rz , мкм	$< 0,032$
Заклон оси ножки относительно оси мениска, угл. мин	1—5
Радиальные биения мениска, относительно оси ножки, мм	1—4
Частота колебаний моды $l = 2$, Гц	5200—5600
Разночастотность по 2-й форме Δf_2 , Гц	0,1—0,6
Добротность $Q_2 \cdot 10^{-6}$	1—3
Частота колебаний моды $l = 3$, Гц	13000—16000
Разночастотность по 3-й форме Δf_3 , Гц	0,04—0,4
Добротность $Q_3 \cdot 10^{-6}$	2—5

Разработанные технологические приспособления, а также методы и средства контроля процесса сборки ЧЭ и технологии финишной доводки химическим травлением позволяют автоматизировать его и получить (потенциально) высокую точность сборки, отвечающую точностям ЧЭ высокого класса.

Из результатов испытаний резонаторов видно, что основной погрешностью изготовления составных резонаторов являются угловые заклоны оси ножки относительно оси симметрии мениска, которые приводят к дефекту типа эксцентрисности. В этом случае функция, учитывающая распределение несбалансированной массы, представляется как

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta h_{\max}}{h} |\sin \varphi| \sin \theta, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2,$$

где Δh_{\max} и h — максимальное значение эксцентрисности (эквивалентно значению разнотолщинности) и толщина мениска; φ — координата по окружности; θ — координата по образующей. Разложение этой функции в ряд Фурье имеет только четные гармоники, поэтому в результате такого дефекта происходит расщепление частот собственных форм колебаний, которое оценивается выражениями: $\Delta f_2 = \frac{2\delta\theta}{15\pi} f_2$ для 2-й и $\Delta f_3 = \frac{2\delta\theta}{35\pi} f_3$ для 3-й формы колебаний (здесь $\delta\theta$ — угловой заклон ножки относительно оси мениска).

Анализ результатов испытаний динамических характеристик составных резонаторов показывает, что одной из основных причин диссипации энергии на 2-й форме колебаний являются потери в местах контакта элементов из-за нарушения монолитности соединения. В этих местах силы взаимо-

действия между смежными поверхностями определяются двумя компонентами: упругой и неупругой. Причем с ростом амплитуды взаимного смещения значение неупругой компоненты возрастает. Из опытов [5] следует, что силы трения между взаимодействующими поверхностями имеют консервативный характер при взаимных смещениях, примерно равных $(2-10)10^{-3}$ мкм.

Проведенные оценки для возможных взаимных смещений в области соединения ножки с мениском дают величины $W_2(\theta = \frac{r}{2R}) \approx (3-6)10^{-2}$ мкм

для 2-й формы колебаний и $W_3(\theta = \frac{r}{2R}) \approx$

$\approx (2-5)10^{-3}$ мкм для 3-й формы колебаний. Таким образом, в местах нарушения монолитности соединения на 2-й форме колебаний возникают взаимные смещения, приводящие к потере энергии. Отметим, что потери в местах соединения элементов определяются потерями в поверхностном слое и силами молекулярного притяжения, обусловленного флюктуационным электромагнитным полем в пространстве между поверхностями. Поскольку поверхности в местах соединения обработаны таким образом, что потери в поверхностном слое должны быть ниже уровня внутренних потерь [6], то основной причиной диссипации энергии в местах нарушения монолита можно считать молекулярное притяжение. При этом имеют место термодинамические необратимые процессы, связанные с непрерывным превращением энергии колебания в тепловую энергию.

Из приведенных оценок видно, что эти потери существенны на основной форме колебаний ($n = 2$) и значительно ниже для более высоких мод. Это подтверждается и экспериментом, где обнаружено, что добротность 3-й моды ($n = 3$) в большинстве случаев выше, чем основной, хотя с повышением номера моды (частоты колебаний) добротность колебательной системы (без учета перекрестных связей с "маятниковой" модой) должна падать обратно пропорционально частоте.

Все это подтверждает правильность наших предположений о возникновении дополнительных потерь на 2-й форме колебаний в местах нарушения монолитности. Кроме того, известно [7], что погрешность измерения полезного сигнала ВТГ обратно пропорциональна квадрату собственной частоты и что с повышением собственной частоты снижается влияние неоднородностей систем возбуждения и съема информации, уменьшается влияние внешних динамических факторов: угловой и линейной вибраций, ударного воздействия и пр.

В связи с изложенным, по нашему мнению, целесообразно перейти к созданию ЧЭ с составным резонатором, работающих на 3-й собственной форме колебаний. Возникающие при этом конструктивные проблемы, связанные с увеличением числа элементов датчиков перемещения по окружной координате, могут быть преодолены путем упрощения функциональной схемы ЧЭ (например, за счет использования только четырех основных элементов съема информации, расположенных через 90° , сигналы с которых пропорциональны: $\cos 3\varphi$, $\sin 3\varphi$, $-\cos 3\varphi$ и $-\sin 3\varphi$).

Таким образом, концепция составного резонатора позволяет в 5-7 раз уменьшить стоимость изготовления ЧЭ за счет повышения производительности благодаря использованию машинных методов обработки и доводки поверхностей резонаторов. Разработанная технология, возможно, позволит в дальнейшем отказаться от дорогостоящей процедуры механической балансировки резонаторов (особенно при реализации ЧЭ на 3-й форме колебаний). Финишная химическая доводка вращающихся резонаторов обеспечивает необходимые динамические характеристики и круговую симметрию резонаторов.

Список литературы

1. Stripling W. W., Lynch D. D., J. Baskett J. R. Hemispherical Resonator Gyro: Principle, Design and Performance // Symposium Gyro Technology 1992, Stuttgart, Germany.
2. Izmailov E. A., Kolesnik M. M., Osipov A. M., Akimov A. V. Hemispherical Resonator Gyro Technology. Problems and Possible Ways of their Solutions // 6-th S.-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 1999.
3. Bodunov B. P., Lopatin V. M., Lunin B. S. Development of timeless fused quartz hemispherical resonator // 2-th S.-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 1995.
4. Yatsenko Yu. A., Petrenko S. F., Chikovani V. V., Vovk V. V. Comparative Investigation of Design Particularities of Resonators Vibratory Gyros // 4-th S.-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 1997.
5. Смагин А. И., Ярославский М. И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М.: Энергия, 1970.
6. Yatsenko Yu. A., Petrenko S. F., Vovk V. V., Chikovani V. V. Technological Aspects of Manufacturing of Compound Hemispherical Resonators for Small-sized Vibratory Gyroscopes // 6-th S.-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 1999.
7. Збруцкий А. В., Минаев Ю. К. Влияние неперпендикулярности оси полусферического резонатора к плоскости закрепления на точностные характеристики ВТГ // Гироскопия и навигация. 1999. № 1 (24). С. 106-111.
8. Яценко Ю. А., Петренко С. Ф., Чиковани В. В. Составной полусферический резонатор для малагабаритных гироскопов коммерческих навигационных систем // Мат-лы VII Санкт-Петербургской международной конф. по интегрированным навигационным системам (29-31 мая, 2000, Санкт-Петербург). 2000. С. 110-112.

УДК 629.7.058.82-752.4.58.084.2

В. М. Ачильдиев, канд. техн. наук, **В. Н. Дрофа**,
В. М. Рублев, канд. техн. наук,
НПП "Регуста", г. Москва

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ВИБРАЦИОННЫЙ ГИРОСКОП-АКСЕЛЕРОМЕТР

Рассматривается конструкция микромеханического вибрационного гироскопа-акселерометра, конструктивно выполненного в виде маятника с емкостным датчиком угла и электростатическим датчиком момента.

Показывается, что выходной сигнал прибора будет содержать составляющие, пропорциональные входной угловой скорости и линейному ускорению.

Микромеханические гироскопы и акселерометры, изготавливаемые групповым методом на основе интегральной технологии, в силу малых энерго-массовых характеристик (масса — доли грамма, энергопотребление — доли ватта) и низкой стоимости представляют большой интерес для различных областей техники [1—5].

В настоящее время (прежде всего — за рубежом) разработкой этих приборов занимается большое число фирм, при этом финансирование разработок идет как со стороны государственных организаций, так и частных предприятий.

В России созданием таких приборов занимается ряд гироскопических фирм в интересах различных ведомств. При этом каждое предприятие разрабатывает свою схему прибора с учетом возможностей производства того или иного предприятия.

Микромеханический гироскоп-акселерометр, разрабатываемый фирмой НПП "Регуста" (рис. 1), содержит плату 1 из кристалла на основе диэлектрика 3 (стекло, ситалл, сапфир, кремний), на которой размещены элементы электроники и сборки узла чувствительного элемента 2.

Инерционный узел чувствительного элемента консольного типа состоит из пластины 5 в форме квадрата (на основе кремния или металла), на поверхности которого равномерно распределены сквозные отверстия 6, выполненные в форме многоугольника с числом граней не менее четырех, и элементов подвеса. Размер стороны каждого отверстия (квадрата или наибольшей из диагоналей многоугольника) в плане таков, что он не менее чем в 2 раза превышает начальный зазор между пластиной 5 и электродами платы 1. Максимальный размер этой стороны определяется конструктивными соображениями и характеристиками системы из-

меряемой емкости. Боковые стороны пластины 5 выполнены в виде гребенчатых зубцов 7.

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

На плате 1 сформированы электроды 4 датчика угла и момента и пять контактных площадок 13—17, соединенных с помощью пяти токопроводящих дорожек 18—22 с электродом датчика угла и датчика момента, электродами электростатической системы возбуждения 11 и 12 и электродами инерционной массы 5. Размеры кристалла одного из вариантов исполнения платы составляют $1,8 \times 1,8 \times 1,15$ мм,

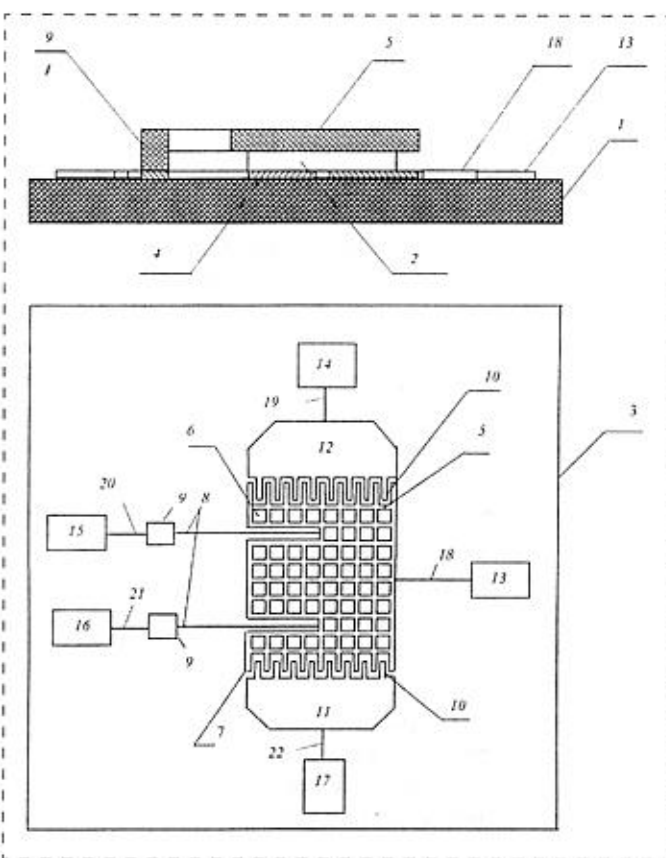


Рис. 1. Общий вид чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа-акселерометра

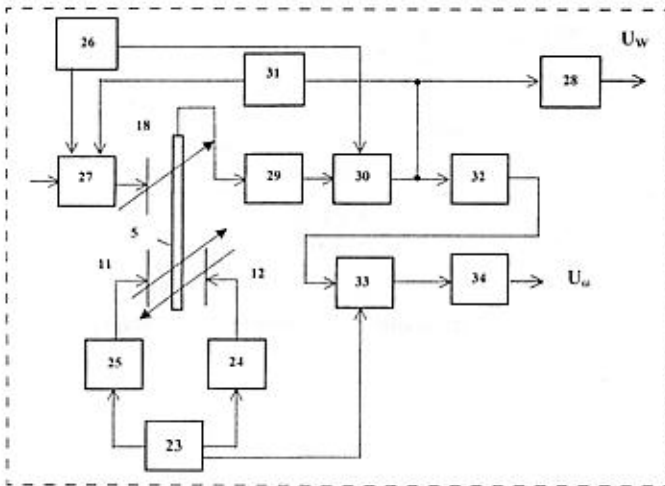


Рис. 2. Структурная схема микромеханического вибрационного гироскопа-акселерометра

пластины инерционной массы — $0,308 \times 0,308$ мм при зазоре между пластиной и платой от 2 до 5 мкм.

Питание прибора осуществляется (рис. 2) от генератора системы электростатического возбуждения 23, который через регуляторы напряжения 24, 25 запитывает электроды 11 и 12 системы возбуждения и один из двух фазочувствительных выпрямителей 33. Электронная схема обработки сигнала включает в себя также генератор питания для датчика угла 26, регулятор напряжения 27 датчика угла и датчика момента, сигнал с которого подается на электроды датчика угла и датчика момента, фильтр канала акселерометра 28, предварительный усилитель 29, первый фазочувствительный выпрямитель 30, корректирующий контур 31, разделительный фильтр 32, второй фазочувствительный выпрямитель 33 и фильтр канала гироскопа 34.

Микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр работает следующим образом.

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

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

При вынужденных колебаниях маятника $\dot{\Theta}_z$ под действием электростатических сил уравнение движения чувствительного элемента (ЧЭ) по оси съема информации с точностью до членов первого порядка малости без учета погрешностей конструктивного исполнения можно представить в следующем виде:

$$\ddot{\Theta}_x + 2\lambda\omega_0\dot{\Theta}_x + \omega_0^2\Theta_x = -K_0\dot{\Theta}_z\omega_\eta + \frac{mL}{I_x}\omega_z,$$

где Θ_x — угол отклонения пластины ЧЭ; I_x — осевой момент инерции пластины; λ — относительный коэффициент демпфирования; $K_0 = (I_x + I_y + I_z)/I_x$ — масштабный коэффициент; m , L — масса пластины и плечо маятника; ω_0 — частота собственных колебаний; ω_η — входная угловая скорость основания; ω_z — линейное ускорение по оси z .

Для установившегося движения

$$\Theta_x = -\frac{K_0}{\omega_0^2}\dot{\Theta}_z\omega_\eta + \frac{mL}{I_x\omega_0^2}\omega_z.$$

Из представленного выражения видно, что выходной сигнал прибора будет содержать периодическую составляющую, амплитуда которой про-

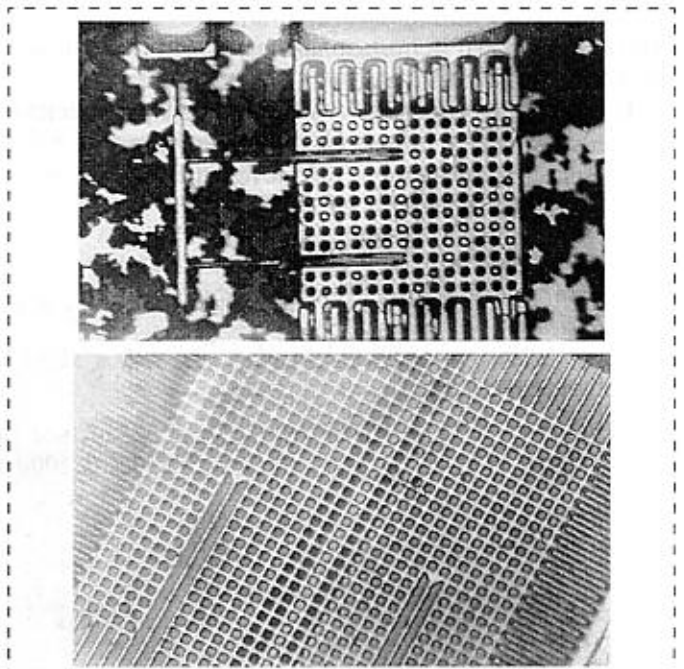


Рис. 3. Фотографии фрагментов ЧЭ ГАМ-10КЕОБ на основе многослойной структуры кремний—стекло и на основе многослойной пленочной структуры металл—сulfur

Характеристика	Год разработки			
	1997	1998	1999	2000
	Тип прибора			
	ГАМ-10КЕОБ	ГАМ-10ПЕОБ		
Габаритные размеры ЧЭ, мм	1,8 × 0,6 × 0,01	0,3 × 0,3 × 0,002	0,3 × 0,3 × 0,002	0,29 × 0,29 × 0,0015
Габаритные размеры кристалла, мм	2,0 × 2,0 × 0,35	1,8 × 1,8 × 0,35	1,8 × 1,8 × 0,35	2,0 × 2,0 × 0,35
Технология изготовления	Сварка кремний + стекло	Пленочная		
Материал ЧЭ	Кремний	Металл		
Материал платы	Стекло	Полиамид + ситалл	Полиамид + сапфир	Сапфир
Потребность в вакуумировании	+	—	—	—
Число фотолитографий	5	4	3	2
Трудозатраты на один кристалл, чел/ч	29,7	3,5	2,7	1,1
Процент выхода годных, %	<0,1	0,1—0,3	1—3	10

порциональна входной угловой скорости ω_n основания, и постоянную составляющую, пропорциональную его линейному ускорению. Это позволяет обеспечивать одновременно измерение угловой скорости и линейного ускорения с помощью одного прибора. Разделение сигналов по каналам гироскопа и акселерометра проводится по частотному признаку с использованием фильтрации (фильтры 28, 34 на рис. 2).

Фотографии фрагментов чувствительного элемента (инерциального узла) гироскопа-акселерометра на основе структуры стекло—кремний (верхняя фотография) и металл—сапфир (нижняя фотография) приведены на рис. 3. Фотографии сделаны с увеличением порядка 150 крат.

В таблице приведены некоторые характеристики четырех ЧЭ консольного типа, изготавливаемых НПП "Регуста" с использованием различных материалов и технологий.

Из таблицы следует, что наиболее прогрессивной технологией с точки зрения трудозатрат, а следовательно, и стоимости является пленочная тех-

нология. Изготовление ЧЭ может быть проведено с использованием двух фотолитографий при выходе годных приборов до 10 %.

Список литературы

1. Bokenhorn В. Planar Inertial Sensor. US Patent, 4.598 (08.07.86).
2. Elvel J. Progress on Micromechanical Inertial Instruments // AIAA. 1991. V. 2705, P. 1482—1485.
3. Ачильдиев В. М., Дрофа В. Н. Комбинированный микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр для инерциальных измерительных систем // Космонавтика и ракетостроение. 1995. № 5. С. 79—83.
4. Лестев А. М., Попова И. В. Микромеханические гироскопы. Современное состояние теории и практических результатов разработки микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 1998. № 1.
5. Мезенцев А. П., Доронин В. П., Новиков Л. З., Харламов С. В. Основные проблемы создания инерциальных измерительных блоков на базе микромеханических гироскопов и акселерометров // Гироскопия и навигация. 1997. № 1. С. 7—14.
6. Почалов А. И., Тимошенко В. П., Тимошенко С. П., Чаплыгин Ю. А. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999 № 1. С. 36—41.

ОТКРЫТА НОВАЯ СПЕЦИАЛЬНОСТЬ "201900 Микросистемная техника"

В соответствии с утвержденным приказом Министерства образования Российской Федерации от 02.03.2000 г. № 686 "Об утверждении государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования" и утвержденным 10.03.2000 г. "Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования. Направление подготовки дипломированного специалиста 654100 Электроника и микроэлектроника" открыта новая специальность "201900 Микросистемная техника" (регистрационный номер 23тех/дс).

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.3.049.77.002.5

В. А. Телец, д-р техн. наук,
22 ЦНИИ Минобороны России,
В. С. Серегин, канд. техн. наук, **А. И. Василевич**,
АО «Научно-производственное объединение
«НИТАЛ»»

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ МИКРОМИНИАТЮРНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ОБЪЕМНО-ПЛАНАРНОГО МОНТАЖА

Описан один из методов трехмерного конструктивно-технологического исполнения (объемно-планарного монтажа) многокристальных модулей для построения унифицированных микроминиатюрных электронных блоков робототехнических и информационных систем и их составных частей.

Достижения в области микроэлектроники и ее нового перспективного направления — микросистемотехники — вступают в XXI век на уровне шестого поколения по условно принятой классификации, позволяющей идентифицировать микроминиатюрные роботизированные, информационно-измерительные и управляющие системы, составные части которых в виде изделий электронной техники (ИЭТ) выполнены на основе субмикронных технологических процессов (табл. 1).

Проводимые в России исследования в этой области обеспечивают пока относительный паритет с развитыми странами [1].

Намного сложнее складывается ситуация с поддержанием и развитием производственно-технологического базиса микроэлектроники субмикронного диапазона, элементная база которой представлена изделиями 4-го и 5-го поколений и составляет функциональную основу мини- и микросистем.

В этот вынужденный "переходный период" большого внимания вновь заслуживают достижения в области гибридной интегральной техники, к которым, в частности, относятся многокристаль-

ные модули (МКМ) [2]. Конструктивно-технологический базис МКМ можно рассматривать в качестве своеобразного "полигона" для отработки архитектурных, алгоритмических, схемотехнических и других видов задач построения мини- и микросистем.

Конструкция МКМ может объединять от двух единиц до нескольких сотен кристаллов полупроводниковых приборов и/или интегральных микросхем (ИС), размещаемых на многослойных подложках и использующих для соединений одно- или многоуровневую разводку металлизации.

Примером тому являются микроэлектронные преобразователи физических величин и компоненты датчиков (ПФВ и КД) — один из наиболее ярких и динамично развивающихся классов изделий микроэлектроники и микросистемотехники [3].

Структурная схема ПФВ и КД является, по сути, моделью информационно-измерительного канала и содержит все его основные узлы [4]:

- чувствительные элементы (ЧЭ), или первичные преобразователи информации;
- устройства коммутации и нормализации сигналов;
- вторичные преобразователи сигналов (аналогоцифровые и цифроаналоговые преобразователи);
- микропроцессорные средства цифровой обработки сигналов, запоминающие устройства и схемы обрамления;
- устройства вывода и распределения информации;
- исполнительные устройства (актюаторы).

В ряде случаев технология МКМ выглядит даже более предпочтительной для реализации функционально сложных ПФВ и КД, чем, например, технология больших и сверхбольших интегральных микросхем (БИС, СБИС).

Технология МКМ обеспечивает полную ориентацию на измеряемую (преобразуемую) входную физическую величину путем конструктивно-технологического совмещения в ПФВ и КД его ЧЭ (давления, влажности, излучений и др.), непосредственно взаимодействующих с внешней средой, со встроенными схемами обработки информации.

Так, ПФВ и КД давления, влажности, газов, состава среды предполагают наличие функционального отверстия в корпусе для обеспечения воздействия на ЧЭ. Очевидно, что при этом ЧЭ должны быть электрически связаны с основной схемой преобразователя, но герметично от нее отделены. Тогда интеграция ЧЭ в БИС, СБИС ПФВ и КД с

Влияние уровня миниатюризации ИЭТ и радиоэлектронной аппаратуры на развитие информационных технологий и технический облик систем управления (условно)

	Свойства	1-е поколение (1950—1960 гг.)	2-е поколение (1960—1980 гг.)	3-е поколение (1980—1990 гг.)	4-е поколение (1990—2000 гг.)	5-е поколение (2000—2005 гг.)	6-е поколение (2005—2010 гг.)
Системы объектоуказания (СОУ)	Характер функционирования	Неуправляемое	Управляемое (корректируемое)			С элементами искусственного интеллекта (ИИ)	Интеллектуальное
	Взаимодействие СОУ с СУ (оператором)	Обратная связь отсутствует	Объектоуказание без распознавания (непрерывное или дискретное)		Объектоуказание с элементами автономного обнаружения, распознавания, сопровождения	Автономное обнаружение, сопровождение и идентификация объекта, информирование об обстановке	Автономное обнаружение, сопровождение и идентификация объекта, адаптация к обстановке, элементы принятия решения
Системы управления (СУ)	Уровень автоматизации	Ручное	Автоматизированное	Автоматизированное с адаптацией к внешним воздействиям	Гибко программируемые многофункциональные системы	Самообучающиеся системы с признаками ИИ	Самообучающиеся системы с элементами ИИ
	Уровень автоматизации в СУ	—	—	Автоматизированная система управления (АСУ)	АСУ на основе экспертных систем	АСУ на основе поддержки принятия решения в едином информационном пространстве	АСУ на основе принятия решений в едином информационном пространстве
	Соотношение программных и аппаратных средств, %	0/100	0/100	15/85	50/50	70/30	80/20
ИЭТ	Интеграция (эл./крист.)	Электривакуумные приборы	Транзисторы 10^2-10^3	Интегральные микросхемы (ИС), 10^4	Сверхбольшие ИС (СБИС), 10^5-10^6	Интегрированные системы, $10^{10}-10^{12}$	Микросистемная техника, до 10^{14}
	Проектные технологические нормы	—	—	> 1 мкм	0,8—0,3 мкм	0,2—0,1 мкм, комплексированные технологии	$< 0,1$ мкм, нано- и молекулярные технологии

применением стандартных корпусов для размещения кристаллов становится затруднительной.

В то же время ужесточающиеся требования к микроминиатюризации электронной аппаратуры приводят к необходимости создания мультитачковых систем, совмещающих в устройствах преобразования (измерения) и обработки информации в реальном масштабе времени нескольких ЧЭ для работы с различными физическими (химическими) величинами.

В этом смысле перспективно размещать в МКМ ПФВ и КД несколько комбинированных ЧЭ совместно со схемами обработки информации. Описание нескольких таких отечественных изделий с трехуровневой алюминиевой металлизацией представлено в [5]. Следует отметить, что в этих гибридных микросистемах для обеспечения высокой плотности трассировки межсоединений и их высокого качества подложки носители изготавливаются по технологии БИС, СБИС.

Просматриваются перспективы размещения в МКМ ПФВ и КД исполнительных устройств ИС в микроисполнении (сопел, поршней, роторов, акселерометров и др.).

Технической проблемой для функционально сложных устройств, по-прежнему, является отвод теплоты. Для этого в МКМ используются встроенные теплоотводы, непосредственно контактирующие с кристаллами размещенных в них полупроводниковых приборов и/или микроэлектронных устройств.

Технология МКМ объединяет несколько вариантов реализации электронных устройств: от традиционной — в виде гибридных интегральных микросхем до МКМ на основе многослойных структур — типов *L* (печатные платы), *C* (керамика), *D* (тонкопленочные структуры на керамическом или эмалированном металлическом носителях), *Si* (тонкопленочные структуры на пластине кремния) [2].

Следует отметить, что МКМ внедряются в микросистемотехнику, являясь уже сформировавшимся конструктивно-технологическим направлением микроэлектроники.

За последние 8—10 лет в мире число фирм-разработчиков и производителей МКМ увеличилось с десятков до сотен. Если в 1992 г. объем продаж МКМ составлял 10 млн долл., то в 2000 г. он превысил 20 млрд долл.

По способу размещения кристаллов различают МКМ:

- планарные (одноуровневые);
- с установкой на ребро;
- трехмерные (многоуровневые).

Наиболее перспективной для применения в технике микросистем представляется трехмерная реализация МКМ. Такие МКМ занимают объемы, в 6 раз меньшие объемов аналогичных устройств в корпусах с вертикальным размещением выводов (типа DIP), при этом они в 3—5 раз дешевле. Плотность упаковки электронных устройств с использованием МКМ в 10—15 раз выше, чем на основе обычных печатных плат, а потребляемая мощность, масса и размеры — в 2—3 раза ниже. Короткие межсоединения МКМ значительно снижают уровни паразитных емкостей и индуктивностей, что обеспечивает повышенное быстродействие схем.

Методы формирования трехмерных электронных устройств

Методы формирования трехмерных электронных устройств известны более 20 лет и в 80-е годы активно воплощались в реальные конструкции.

Простейший вариант трехмерного МКМ в керамическом корпусе запатентован фирмой *Texas Instruments* (США). Кристаллы в нем монтируются в двух уровнях с разваркой ленточных проводников на траверсы корпуса.

В другом конструктивном варианте на кремневой подложке по одной из базовых планарных технологий изготавливали "рабочий" слой, содержащий активные и пассивные элементы схемы. Затем на него наносился изоляционный слой со вскрытыми окнами для формирования межсоединений, а поверх — второй полупроводниковый слой, электрически соединенный с первым слоем и т. д. Получаемая неразборная и неремонтируемая конструкция обладала большой плотностью упаковки. Однако выход из строя одного из элементов в любом из слоев приводил к отказу всего устройства.

Еще одна известная трехмерная конструкция предполагала сборку из нескольких кремневых подложек, собранных в "этажерку". "Рабочие" слои содержали преимущественно пассивные элементы, а кристаллы ИС устанавливались непосредственно на подложки. Плотность упаковки такой конструкции ниже, чем у предыдущей, а ее стоимость за счет сложности монтажа в 5—10 раз превышала стоимость гибридных ИС с применением бескорпусных элементов и многослойных полиимидных или керамических коммутационных плат.

Высокая плотность упаковки трехмерных структур была получена в начале 90-х годов в конструкции, у которой контактные площадки кри-

сталлов соединялись на подложке со слоем металлизации. Все межсоединения выполнялись с одной стороны кристалла, и на их оконечностях создавались шариковые выводы, благодаря которым кристалл монтировался на выводную рамку ленты-носителя. Затем эти промежуточные конструкции склеивались друг с другом, образуя модуль-параллелепипед, который монтировался на плату. Практически все технологические операции такой конструкции являлись специализированными.

Все упомянутые выше конструкции обладали одним серьезным недостатком, связанным с организацией теплоотвода, что делало их практически непригодными для реализации функционально сложных и производительных электронных устройств.

Более совершенной представляется конструкция фирмы *Cubic Memory* (США), состоящая из собранных "в пакет" и соединенных по вертикали микроплат на основе полупроводниковых пластин, содержащих по четыре структуры динамических оперативных запоминающих устройств (ДОЗУ), каждая информационной емкостью 8 Мбит.

Перед структурным разделением на четыре функциональные части каждая полупроводниковая пластина шлифуется по толщине до 0,2 мм.

Верхний слой пластины покрывается слоем полиимида, в котором вскрываются окна в местах расположения контактных площадок кристаллов-структур и переходов на другие слои разводки. Обратная сторона пластин изолируется слоем нитрида кремния.

Объемная конструкция каждой микроплаты образуется "пирогом" из подложки на нитриде кремния, двух золотосодержащих слоев межсоединений, трех полиимидных изолирующих слоев, компаунда в пространстве между микроплатами.

Первый полиимидный слой изолирует между собой исходные четыре полупроводниковые структуры ДОЗУ. Последующий слой металлизации (золото) обеспечивает горизонтальные межсоединения (между кристаллами ДОЗУ). Второй полиимидный слой изолирует сформированные горизонтальные межсоединения. В нем вскрываются "окна" для последующих соединений между микроплатами (вертикальные межсоединения). В этих окнах формируются контакты для вертикальных межсоединений путем золочения поверхностей. Последний третий слой полиимида изолирует конечную конструкцию микроплаты памяти.

Соединения между микроплатами — пластинами осуществляется также и по периметру вертикальными золочеными объемными проводниками. Нижняя плата имеет планарные выводы для соединения с внешними разъемами и коммутационными платами.

Плотность упаковки такой объемной конструкции очень высока (заполнение объема кремнием до 70 %), однако высока и стоимость ее изготовления (по оценкам она сопоставима со стоимостью узлов и блоков бортовой аппаратуры).

Метод объемно-планарного монтажа

В России (АО «НПО "НИТАЛ"», г. Москва) получил развитие конструктивно-технологический метод трехмерной сборки МКМ, названный методом *объемно-планарного монтажа* (ОПМ). Метод ОПМ защищен отечественными патентами [6, 7].

В качестве элементной базы электронных устройств, построенных методом ОПМ, используются бескорпусные диоды, транзисторы, кристаллы ИС любой степени интеграции, навесные конденсаторы и резисторы.

Микроминиатюрные узлы электронной аппаратуры, создаваемые на основе метода ОПМ, строят по иерархическому принципу "элемент—микрочип—блок—узел—устройство".

Микрочип представляет собой двустороннюю печатную плату с возможностью коммутации элементов с двух сторон через торцевые контакты. При необходимости на одной из сторон выполняется многослойная разводка.

Типовой технологический маршрут изготовления МКМ с применением ОПМ содержит следующие операции:

- подготовку элементов к сборке;
- изготовление рамок;
- ориентированную посадку элементов;
- опрессовку элементов полимером;
- очистку плазмой и "закрытие" стыка между элементами и полимером;
- изготовление масок-шаблонов;
- создание проводников межсоединений путем вакуумной металлизации;
- резку микрочипов;
- контроль и электротермотренировка микрочипов;
- сборку микрочипов (пайка, герметизация в корпусе);
- контроль функционирования МКМ;
- упаковку.

Кроме того, может использоваться ряд вспомогательных технологических операций по изготовлению рамок и ферромагнитных масок, приготовлению проявителей, травителей, смесей для химической обработки.

Очевидно, что технологический маршрут изготовления микрочипов и МКМ во многом идентичен маршруту изготовления ИС и ГИС (фотолитография, химическое травление, вакуумное напыление и плазмохимическая обработка, подготовка и ориентированная приклейка элементов, опрессовка,

заливка и термообработка, сборка, корпусирование, тренировка, испытания и др.), а значит, предполагает задание сопутствующих требований по электронной гигиене.

На рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) показан один из вариантов выполнения микрочипа с жесткими внешними выводами (рамочный вариант). На микрочипе 1 закреплены: кристалл ИС 2, бескорпусные резисторы 3, спрессованные полимерным материалом 4, с жесткими выводными контактами 5. Токпроводящие зоны кристалла ИС защищены изоляционным слоем 6 в виде напылов полимерного материала. На поверхности кристалла ИС, резисторов и самой микрочипа нанесены проводники 7 межсоединений элементов, выводов и микрочипов в блоке.

В конструкции на рис. 1 половина трудоемкости изготовления микрочипа приходится на операции с выводной рамкой, что сделало целесообразным разработку безрамочной конструкции, показанной на рис. 2. Помимо экономического эффекта такая конструкция позволила повысить плотность упаковки за счет исключения выступающих деталей.

Несколько изменилась технология изготовления и контроля микрочипов. В безрамочной микрочипе проводники напыляются как на лицевую, так и на торцевую и обратную стороны платы, образуя внешние контакты. Выемки по контуру платы облегчают процесс нанесения проводников и соединение плат между собой в блоке. Но возможны варианты выступающих и плоских выводов, как показано на фрагментах рис. 3.

В целом в блоке с "рамочными" микрочипами можно получить заполнение объема кремнием не более 25 %, тогда как "безрамочный" вариант позволяет повысить этот показатель до 30—35 % и более.

Микрочипы для увеличения плотности упаковки можно выполнять на основе соединений пай-

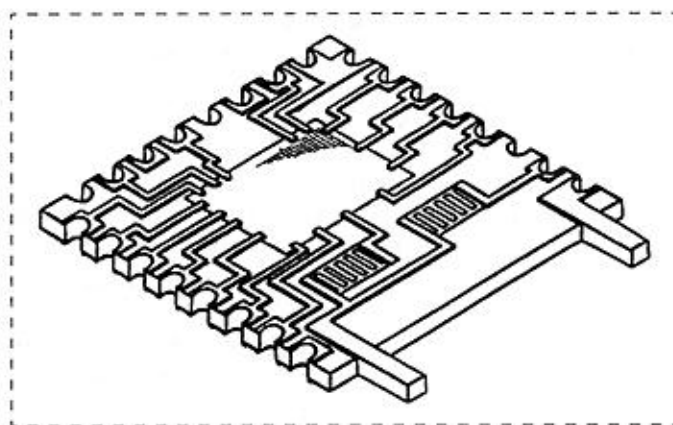


Рис. 2. Вариант конструкции безрамочного выполнения микрочипа

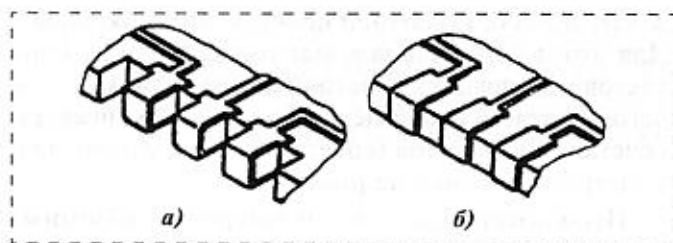


Рис. 3. Варианты выполнения выступающих (а) и плоских (б) внешних выводов микроплат (фрагменты)

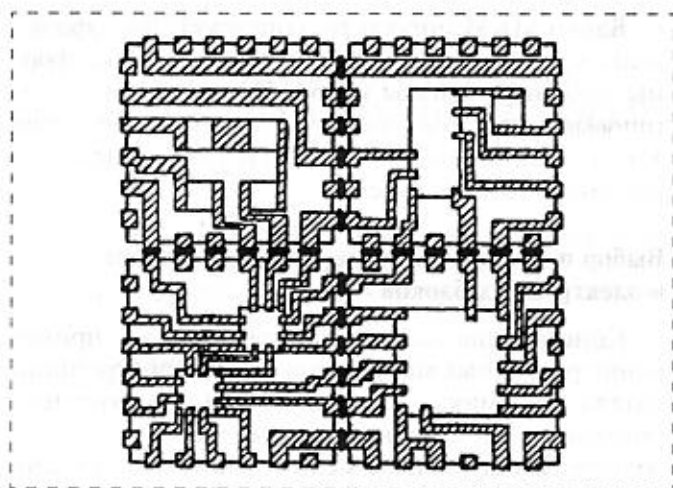


Рис. 4. Соединение пайкой безрамочных микроплат

кой их безрамочных фрагментов (рис. 4). Тогда каждая две стороны фрагментов образуют контактное поле составной микроплаты.

В случае, когда элементы поставляются напаянными на промежуточный носитель, микроплата принимает вид, показанный на рис. 5. Проводники носителя 2 микроплаты 1 образуют внешние выводы для соединения с другими микроплатами или их фрагментами, а контакты, запрессованные в рамку 3, образуют внешние выводы 4 блока.

Конструкция электронных блоков

Для достижения максимальной плотности упаковки, минимизации длины межсоединений и улучшения частотных характеристик МКМ микроплаты собираются "в пакет", причем три их торцевые стороны образуют грани блока, по которым

Рис. 5. Микроплата, напаянная на промежуточный гибкий носитель:

1 — микроплата; 2 — гибкий носитель; 3 — рамка; 4 — внешний вывод

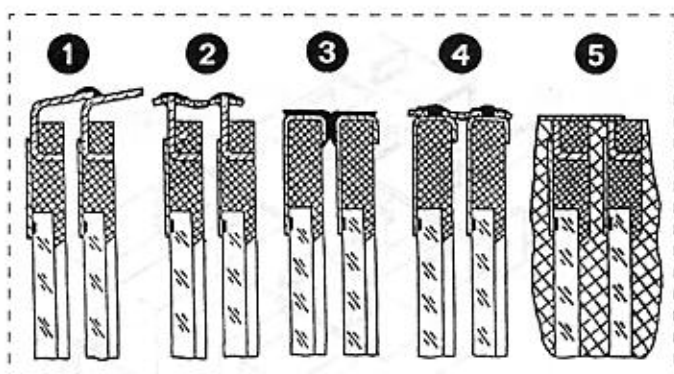
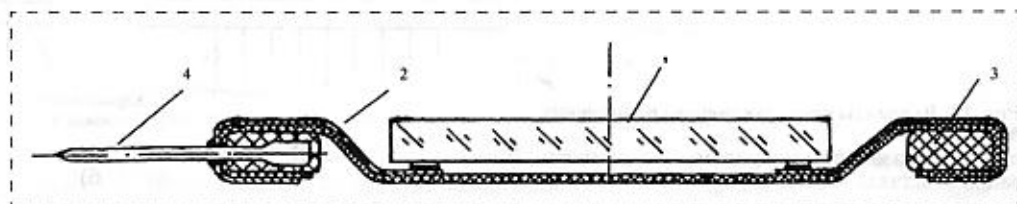


Рис. 7. Способы соединения микроплат в блоке:

1 — разборная конструкция с регулярной разводкой выводов; 2, 4 — конструкции с двусторонним монтажом и произвольной разводкой при использовании дополнительной микроплаты; 3 — разборная конструкция с регулярной разводкой и минимумом контактных паяных зон; 5 — неразборная конструкция с произвольной разводкой выводов

проходят межсоединения, а четвертая используется для теплоотвода и внешних выводов. Возможен вариант конструкции с использованием всех четырех граней блока для межсоединений.

Один из вариантов выполнения конструкции блока представлен на рис. 6 (см. четвертую сторону обложки). Микроплаты 1 с электронными элементами установлены "в пакет" параллельно друг другу. Их соединение между собой осуществлено с помощью выводов 2 и коммутационных плат 3 с печатными проводниками 4.

Для повышения надежности соединений блок покрывается полимерной оболочкой 5, через которую проходят выводы микроплат. Боковые и верхняя поверхности блока шлифуются до вскрытия контактов и на эти поверхности наносятся проводники 6, дублирующие разводку на платах. После этого блок покрывается полимером 7 для общей герметизации.

С другими блоками соединения осуществляются через контакты 8, запаянные во внешнюю коммутационную плату 9. Теплота отводится через ребра радиатора 10, 11 на внешнюю теплоотводящую систему 12.

Способы соединения микроплат в блоке могут быть различными (рис. 7). Варианты 1, 2 и 5 используют рамочные микроплаты, варианты 3 и 4 — безрамочные. Кроме того, вариант 5 можно реали-

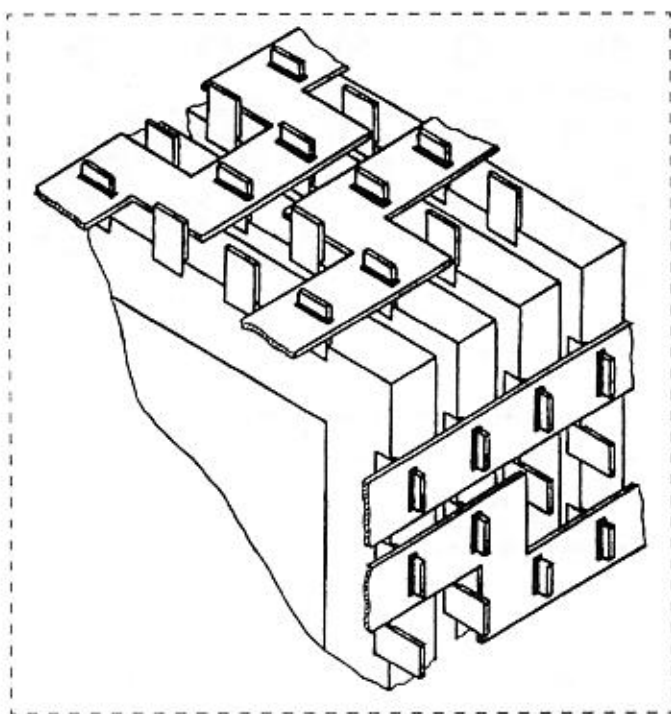


Рис. 8. Вариант соединения микроплат в блоке объемными проводниками (фрагмент)

зовать и для безрамочной конструкции микроплат. Для этого во время заливки торцевые зоны контактов изолируются эластичным прижимом, после чего наносятся внешние проводники. Возможны и сочетания вариантов (сочетание 2 и 5 вариантов в конструкции блока на рис. 6).

Используется соединение микроплат объемными проводниками (рис. 8) или подпружиненными выводами с дальнейшей перепайкой (рис. 9). В последнем случае контроль, замену или ремонт блока можно проводить до перепайки.

Блоки МКМ могут быть конструктивно оформлены в различные внешние геометрические формы (цилиндр, призмы и пр.). На рис. 10 показаны типовые варианты конструктивного исполнения МКМ с герметизацией компаундом и в металло-керамическом корпусе.

Выбор и применение материалов микроплат и электронных блоков

Конструкция микроплат предполагает применение различных материалов подложки (кремний, ситалл, керамика, арсенид галлия, феррогранат, германий и пр.), полимера пресс-материала и выводной рамки (сплавы меди и алюминия, ковар). Выбор материалов конструкции МКМ и их совместимость должны быть обоснованы, прежде

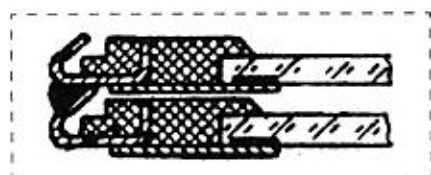


Рис. 9. Соединение микроплат с помощью подпружиненных выводов

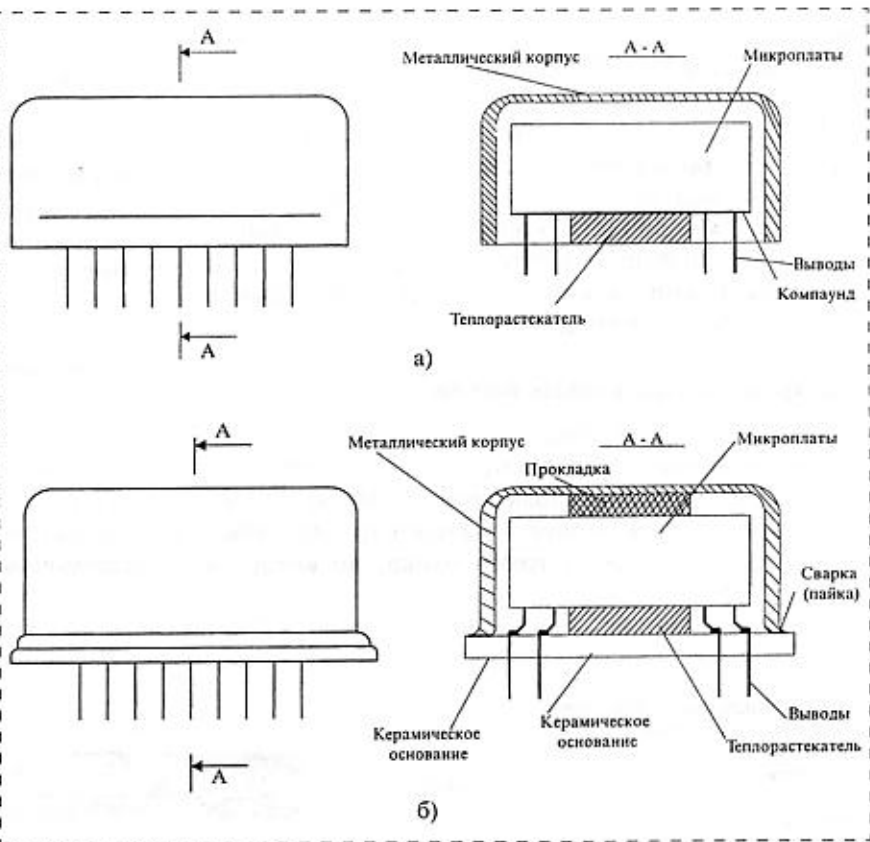


Рис. 10. Варианты конструктивного исполнения МКМ:
а — герметизация компаундом; б — герметизация в металло-керамическом корпусе

всего, с точки зрения механической прочности и температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов.

Проводник накрывает одновременно элемент, фрагмент пресс-материала и контакт внешнего вывода. Поэтому при проведении термоциклирования, например, в проводнике может возникнуть трещина и/или обрыв из-за недопустимых взаимных значений ТКЛР примененных материалов.

Давление опрессовки порядка 30 МПа обеспечивает надежный "зажим" элементов пресс-материалом. Однако стык между ними может "раскрыться" при температуре, превышающей температуру опрессовки. Тем самым устанавливается ограничение на верхнее предельное значение диапазона рабочих температур (350 °С). При температурах окружающей среды менее -55 ± -60 °С возможно сильное механическое давление на кристалл ИС, его прогиб и расслоение.

Важно, чтобы ТКЛР полимера микроплаты не превышал ТКЛР подложки элемента более чем на 1–1,5 порядка (для кремниевой подложки $3,6 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Коэффициенты усадки и водопоглощения полимера не должны превышать 0,4 %.

С помощью тензометрирования и применения оптических методов моделирования установлен характер напряженного состояния элемента после опрессовки. На рис. 11 показаны области наибольших напряжений в элементе в продольном и поперечном сечениях. Элемент испытывает сжимающие и изгибающие усилия. Характер прогиба показан на рис. 12 (см. четвертую сторону обложки) при соотношении масштабов в вертикальной и горизонтальной плоскостях 1000 : 1.

Поскольку абсолютное значение усилий напрямую зависит от площади элемента, в наиболее тяжелых условиях оказываются кристаллы БИС и СБИС. Для обеспечения механической разгрузки толщина микроплат выбирается равной не более 1,2 толщины элемента. Кроме того:

- частично или полностью открывается обратная сторона элемента, что значительно снижает сжимающие усилия и полностью исключает изгибающие;

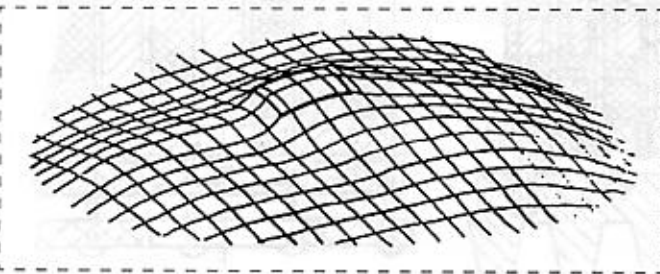


Рис. 11. Области наибольших напряжений в элементе микроплаты в продольном и поперечном сечениях после опрессовки

Таблица 2

Характеристики пресс-материала премикса

Характеристика	Ед. изм	Значение	Режим
Время выдержки в форме	мин	4–5	
Температура прессования	°С	160 ± 5	
Усадка	%	0,6	
Разрушающее напряжение при статическом изгибе	кПа	80	
Твердость по Бринеллю	кДж/м ²	300–350	
Давление прессования	МПа	15	
Теплостойкость по Мартенсу	°С	170	
Температурный коэффициент линейного расширения	$1/^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$	25	
Электрическая прочность	кВ/мм	20	25 ± 10 °С
Диэлектрическая проницаемость		5	10^6 Гц, 25 ± 10 °С
Тангенс угла диэлектрических потерь		0,025	10^6 Гц, 25 ± 10 °С
Удельное объемное электрическое сопротивление	Ом · м	$5 \cdot 10^{14}$	25 ± 10 °С

Таблица 3

Характеристики эпоксиполиэфирного пресс-материала

Характеристика	Ед. изм.	Значение	Режим
Время желатинизации	с	20–70	150 ± 2 °С
Текущность по спирали	м	0,25–0,6	150 ± 2 °С $P_{уд} = 30$ МПа
Плотность	кг/м ³	1700–1800	
Усадка	%	0,1–0,25	
Разрушающее напряжение при изгибе	МПа	90–120	
Твердость по Бринеллю	кДж/м ²	300–350	
Ударная вязкость	Дж/м ²	7	
Теплостойкость по Мартенсу	°С	105–115	
Температурный коэффициент линейного расширения	$1/^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$	25–30	
Водопоглощение	%	0,2	100 °С, 30 мин.
Диэлектрическая проницаемость		6	10^6 Гц
Тангенс угла диэлектрических потерь		0,01	10^6 Гц
Удельное электрическое сопротивление	Ом · м	10^{15}	
Удельное поверхностное электрическое сопротивление	Ом	10^{15}	

- в угловых зонах посадки элементов делаются сквозные или "глухие" отверстия (толщина стенки не более 0,15 мм) или пазы вдоль каждой стороны элемента, что в несколько раз снижает концентрацию механических напряжений.

В качестве опрессовочного материала в трехмерных МКМ может применяться премикс (табл. 2), используемый при изготовлении полимерных DIP-корпусов, или специально разработанный эпоксиполиэфирный опрессовочный материал марки СП-30 (табл. 3).

Некоторые свойства материала СП-30 оказались необычными (например, 30-суточная выдержка

в жидком гелии при $T = 4$ К без изменения характеристик).

Представляют интерес и полимерные материалы, близкие по ТКЛР к кремнию, применение которых позволяет значительно снизить механические нагрузки на кристалл ИС при термоциклировании и работе при низких температурах окружающей среды.

Герметизация микроплат в блоке выполняется вакуумной заливкой компаундом с температурой отвердевания порядка 120 °С. Очевидно, что ТКЛР компаунда не должен значительно отличаться от ТКЛР полимера, из которого изготовлена микроплата.

У полимерных материалов без наполнителей ТКЛР в 10 раз выше, чем при наполнении стеклом, кварцем, корундом. Хорошие практические результаты можно получить, используя эпоксидный заливочный компаунд марки ЭЗК-6.

Жесткие условия эксплуатации электронных блоков на основе ОПМ в составе аппаратуры специального назначения требуют применения в них специальных материалов конструкций. Так, например, на рис. 13 (см. четвертую сторону обложки) представлена конструкция блока для работы в условиях воздействия повышенных уровней радиационного излучения ("атомные котлы", роботы-ликвидаторы последствий на АЭС и др.).

Для минимизации последствий воздействия сверхжесткого рентгеновского излучения в конструкции микроплаты применен алюминий и практически исключены полимеры. При такой конст-

рукции блоков уменьшение объемов в 5 раз влечет за собой уменьшение объемов и массы требуемой защитной оболочки в 2 раза.

Теплоотвод

Теплоотвод в трехмерных МКМ, построенных методом ОПМ, осуществляется в основном за счет свойств теплопроводности конструкции. Тепловой расчет должен учитывать, что от нагревающегося элемента до теплосъемника создается целая цепочка термических сопротивлений, соединенных последовательно.

Для нормальных условий эксплуатации и небольших перепадов температур (20 — 40 °С), а также для малых площадей рассеивания теплоты теплоотвод излучением можно не учитывать.

При расчете тепловых режимов работы устройств необходимо учитывать, что элементы конструкции МКМ и аппаратуры могут быть выполнены из разных материалов (меди, титана, стали и др.). На рис. 14 показаны способы отвода теплоты от элементов, расположенных в микроплатах МКМ, даны их краткие теплоэнергетические характеристики.

Теплоотвод может осуществляться через теплоотводящие гребенки и ребра корпуса МКМ. Они же могут размещаться и на микроплатах (например, не на каждой, а через несколько микроплат).

Возможен вариант отвода теплоты, при котором в качестве теплоотводящих ребер используются кристаллы элементов (рис. 15). При этом контакт с теплоотводом осуществляется через один из тор-

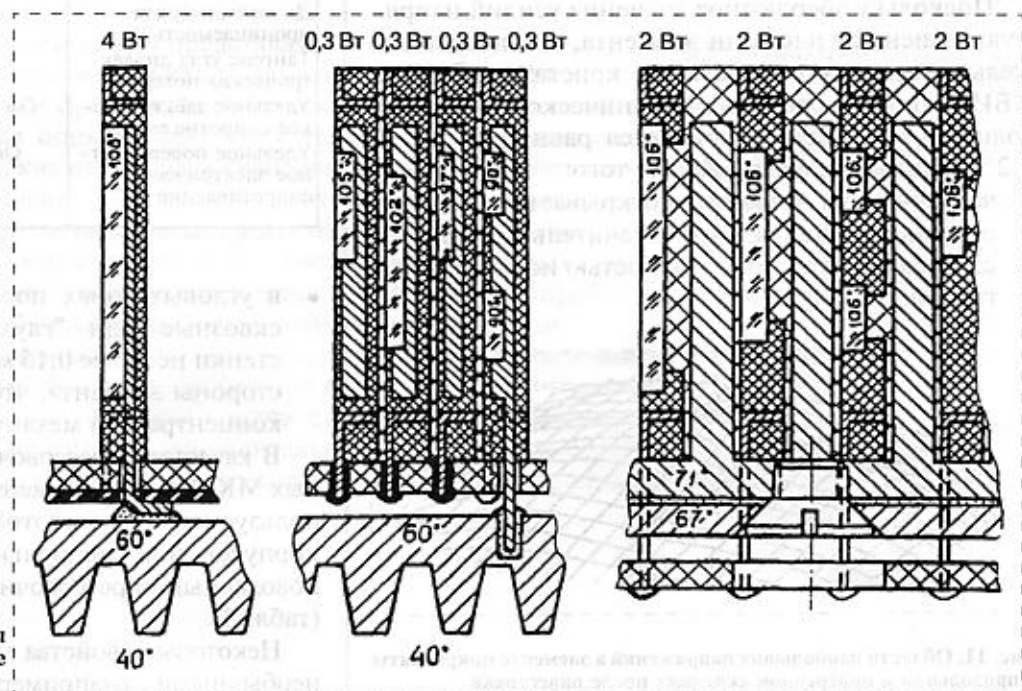


Рис. 14. Способы отвода теплоты от элементов микроплат на основе сборки методом ОПМ

Таблица 4

Типовые характеристики алюминитридной керамики

Характеристика	Ед. изм	Значение
Объемная плотность	г/см ³	3,9
Пористость	%	0—0,6
Разрушающее напряжение при статическом изгибе	МПа	250—300
Температурный коэффициент линейного расширения	1/°С · 10 ⁻⁶	4,6
Диэлектрическая постоянная		8—10
Тангенс угла диэлектрических потерь (на частоте 1 МГц)		(1—5)10 ⁻⁴
Удельное электрическое сопротивление	Ом · см	10 ¹³ —10 ¹⁴
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м · К)	130—180

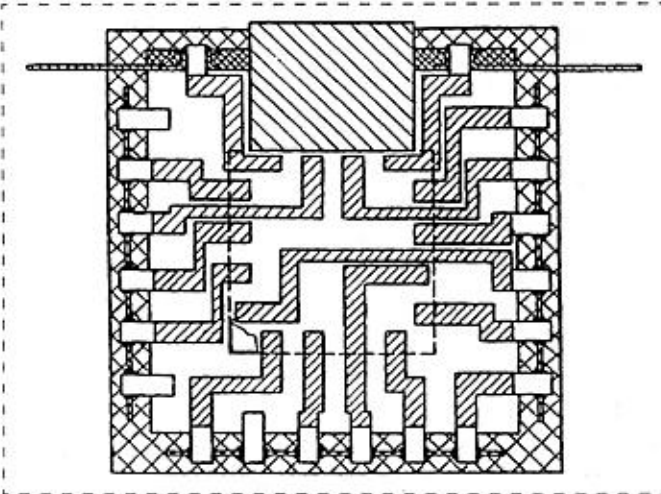


Рис. 15. Вариант отвода теплоты от микролат МКМ путем использования теплопроводящих ребер кристаллов элементов

цев элемента. Тогда часть соединений от контактных площадок кристалла, находящихся со стороны теплоотвода, приходится выводить через его изолированную лицевую сторону, что не всегда возможно. Но плотность упаковки при этом не уменьшается.

В целом изложенные варианты теплоотвода существенно усложняют технологию изготовления МКМ и ухудшают их эксплуатационные характеристики.

Более перспективными представляются конструкции МКМ по методу ОПМ с применением микролат на основе алюминитридной керамики.

Перспективная конструкция блоков МКМ с применением микролат на основе алюминитридной керамики

На рис. 16 показана перспективная конструкция блока МКМ, выполненного по технологии ОПМ с применением микролат из алюминитридной керамики AlN, основные характеристики которой представлены в табл. 4.

Данная конструкция обладает повышенной плотностью упаковки. Коэффициент заполнения кремнием при условии использования идентичных кристаллов БИС достигает 75 %.

На кристалл БИС (передний план на рис. 16) после нанесения изоляционного слоя (с лицевой, торцевой и обратной сторон) и вскрытия контактных площадок наносятся проводники, выводящие контактные площадки на обратную сторону кристалла.

Контакты формируются также в зонах, свободных от контактных площадок кристалла, и используются для разводки внутри блока МКМ. Формирование проводников возможно и по лицевой части кристалла.

В случае, когда необходимо разместить в МКМ кристаллы с малыми площадями, из алюминитридной керамики изготавливается держатель, показанный в разрезе на втором плане рис. 16 (с отверстиями под кристаллы ИС или другие объемные элементы). Элементы размещаются в окнах держателя и закрепляются полимером.

Вместо опрессовки можно применять вакуумную заливку. Некоторые пассивные элементы выполняют на держателе методом тонкопленочной, толстопленочной или полупроводниковой технологий. Далее, как и на первом кристалле, формируются проводники и т. д.

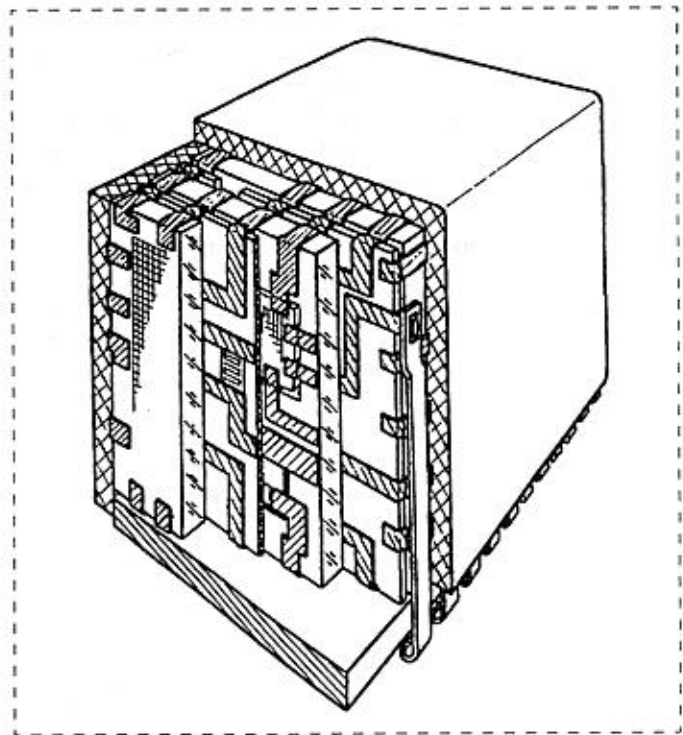


Рис. 16. Конструкция электронного блока на основе сборки методом ОПМ

Между кристаллами и держателями располагаются тонкие (0,1 мм) изоляционные микроплаты, также имеющие разводку. Проводники проходят через торцы микроплат в местах, где необходимо осуществить коммутацию.

Микроплаты имеют металлизированные выступы, на которые монтируются внешние выводы блока. Они могут иметь и не металлизированные пазы, в которых шинная разводка разрывается.

Блок запаивается по граням групповым методом и герметизируется тонкой (0,5 мм) оболочкой компаунда. В нижней части блока расположен радиатор, также выполненный из алюмонитридной керамики и имеющий тепловой контакт с кристаллами и держателями через теплопроводящую смазку.

Если элементы, расположенные в держателе, практически не выделяют теплоты, его можно изготавливать по технологии ОПМ на основе "безрабочей" микроплаты. Такой вариант возможен и в отдельных случаях значительного тепловыделения схемой. Но при этом коммутирующую микроплату с лицевой стороны элементов не ставят, а соседний кристалл используют в качестве ребра теплоотвода.

Применение микроплат из алюмонитридной керамики позволяет решить проблему согласования ТКЛР монтажных носителей и корпусов ИС и ГИС, используемых и в технике СВЧ.

Помимо нитрида алюминия представляется перспективным применение и других видов керамики из оксида алюминия, нитрида бора, карбида кремния, наконец, бериллиевой и стеклокерамики (табл. 5).

Многообразие применяемых видов керамики продиктовано усложнением бескорпусной элементной базы БИС и СБИС, а теперь также ультра- и сверхскоростных БИС (УБИС, ССИС) с размерами кристаллов до 10 мм² и более, числом выводов 250—300 и более, мощностью рассеивания до 5—10 Вт, рабочими и тактовыми частотами от единиц до десятка гигагерц. Так, например, алюмонитридная керамика позволяет создавать устройства, устойчивые к воздействию внешних тепловых ударов и термоциклированию.

Создание трехмерных МКМ методом ОПМ на основе алюмонитридной керамики

В АО «НПО "НИТАЛ"» (г. Москва) методом ОПМ по требованиям заказчика выполнен экспериментальный МКМ блока оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) емкостью 4 Мбит с организацией памяти 16 × 32 К, состоящий из 32 кристаллов ИС: ОЗУ типа 134РУ10 емкостью 16 К с организацией 1 × 16 К, ИС выходных формирователей с байтовой организацией на кристаллах ИС типа 170АП5, схем выбора блока памяти на основе кристаллов ИС 533ЛН2.

Конструкция экспериментального МКМ содержит 24 неразъемные микроплаты — носителей элементов, теплоотвод и выводы. На рис. 17 показана конструкция одной из таких микроплат для посадки кристаллов ИС 134РУ10.

Микроплата состоит из рамки 1, подложки для посадки кристаллов 3, опрессовочного полимерного материала 2. На полимерный материал между контактными площадками кристалла ИС и контактами рамки нанесены металлические проводники 4 для коммутации элементов в соответствии с принципиальной электрической схемой устройства. Проводники напыляются на обе стороны микроплаты.

В конструкции блока применено четыре вида рамок (различные — для активных и пассивных элементов). Рамки изготовлены из латуни и при подготовке к сборке покрываются сплавом олово — висмут толщиной 4—7 мкм. Они обеспечивают механическую ориентацию микроплат при сборке и прочность конструкции микроблока, соединение микроплат между собой и внешними выводами, подведения питания и электрических сигналов.

В конструкции микроблока применены бескорпусные конденсаторы К1-17, которые припаиваются непосредственно на рамку.

Металлизация наносится на поверхность микроплат методом вакуумного распыления меди на подслое ванадия. Толщина проводников 4—6 мкм.

Таблица 5

Типовые характеристики керамических материалов, используемых для производства подложек и корпусов микросхем, микроплат МКМ

Характеристика, ед. изм.	Основной компонент					
	Al ₂ O ₃	AlN	BN	SiC	BeO	Стекло-керамика
Объемная плотность, г/см ³	3,9	3,3	2,3	3,1	2,9	—
ТКЛР, 10 ⁻⁶ К ⁻¹ (при 293—673 К)	6,7—7,3	4,3—4,5	1,2	4,2	7,2—8,0	3,0—4,2
Прочность на изгиб, МПа	300	350—400	—	450	230—250	150
Удельное сопротивление, Ом · см	10 ¹⁴	10 ¹³ —10 ¹⁴	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹⁴	10 ¹² —10 ¹³
Коэффициент теплопроводности, Вт/м · К	20	100—200	55	70—220	200—220	5
Диэлектрическая постоянная (на частоте 1 МГц)	8,5—9,7	8,8—8,9	4,2	40	6,5—7,0	3,9—7,8

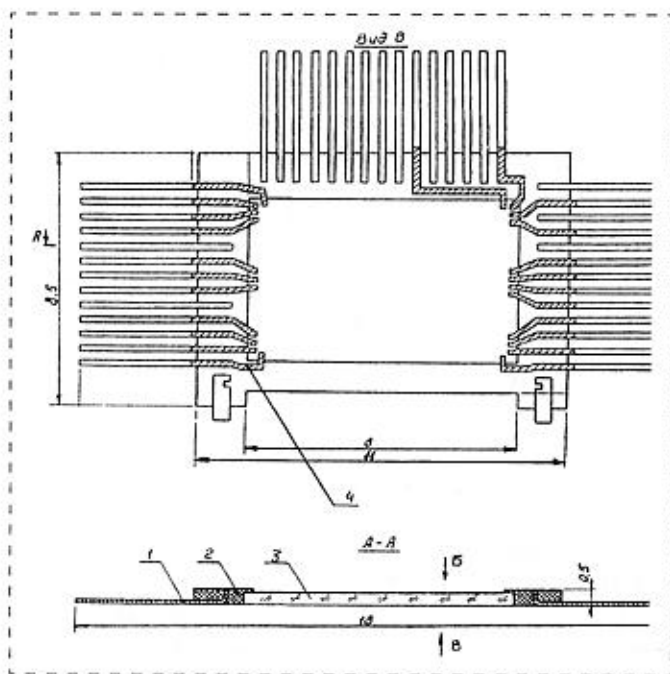


Рис. 17. Конструкция микроплат для посадки кристаллов ИС 134РУ10

Смещение металлизации относительно контактных площадок кристаллов не превышает ± 15 мкм.

Лицевая и реверсная поверхности микроплат после нанесения проводников покрываются фоторезистом ФП-303. Полости между микроплатами, а также между микроплатами и ребрами теплоотвода заполняются теплопроводной пастой КТП-8 так, что после сборки микроплат единая конструкция микроблока не имеет полостей.

Высокая механическая прочность микроблока определяется соединением микроплат методом пайки выступающих по граням блока выводов и конструкцией теплоотвода. Технология ОПМ предполагает и заливку внешней поверхности микроблока компаундом (за исключением поверхности теплоотвода). Это обеспечивает его надежную работу в блоках герметизируемой аппаратуры, эксплуатируемой в диапазоне температур внешней среды от -60 до $+85$ °С.

В экспериментальном образце блока МКМ получена плотность упаковки свыше 20 крист./см³. Технические характеристики микроблока определялись выбранной элементной базой.

В случае технической необходимости (например, при эксплуатации изготовленных по технологии ОПМ в негерметизируемой аппаратуре) МКМ защищают компаундом или помещают в герметичный корпус:

- металлический — с последующей заливкой места выхода внешних выводов герметизирующим

компаундом до уровня теплоотвода (диапазон рабочих температур от -10 до $+70$ °С);

- металлокерамический — со сквозным прохождением через керамическое основание внешних выводов микроблока и последующей герметизацией путем сварки металлической крышки с основанием в инертной осушенной среде (диапазон рабочих температур от -60 до $+85$ °С).

Одним из недостатков МКМ, собранных методом ОПМ, является то, что для каждого нового типа МКМ требует изготовления индивидуальной оснастки для проведения испытаний. Впрочем, это достаточно простые и недорогие приспособления для контроля электрических параметров МКМ и обеспечения передачи механических и других видов нагрузок.

Сборка МКМ методом ОПМ достаточно технологична, универсальна, экономична, не предъявляет высоких требований к производственным помещениям, оборудованию, квалификации персонала и не имеет принципиальных ограничений в реализации на основе алюмонитридных или других видов микроплат функционально сложных электронных устройств, например, таких, как ПФВ и КД с мультывходовой организацией, центральными или распараллеленными средствами обработки информации и т. п., применяемых в технике мини- и микросистем.

Авторы благодарят Казакова А. А., Посысаеву Т. Т., Сасова Ю. Д. и Чернышова А. А. за их вклад в проводимые исследования по тематике статьи и помощь в ее подготовке.

Список литературы

1. Критенко М. И., Малюдин С. А., Телец В. А. Состояние и концептуальные задачи развития специальной микроэлектроники // Сб. трудов Научной сессии МИФИ-99. Т. 6. М.: МИФИ, 1999.
2. Телец В. А. Многокристалльные модули — новое конструктивно-технологическое направление развития микроэлектронных преобразователей физических величин и компонентов датчиков // Петербургский журнал электроники. 2000. № 3.
3. Телец В. А., Никифоров А. Ю. Микроэлектронные преобразователи физических величин и компоненты датчиков как основа элементной базы микросистемной техники // Сб. тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Сенсоры и микросистемы". г. Санкт-Петербург, 2000.
4. Телец В. А., Никифоров А. Ю. Микроэлектронные преобразователи физических величин и компоненты датчиков — перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 6—12.
5. Шеленин Н. А. Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных систем // Микросистемная техника. 2000. № 1.
6. Патент России № 1753968 А.
7. Патент ЕР 0476136 (международная заявка РСТ/SU90/00022).

И. В. Попова, д-р наук, Н. В. Моисеев,
Я. А. Некрасов, А. А. Семенов,
АОЗТ "ГИРООПТИКА", Санкт-Петербург
(E-mail: gyro@neva.spb.su)

ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Рассмотрено термостатирование микромеханических инерциальных датчиков. Дана схема системы стабилизации температуры акселерометра. Приведены результаты испытаний этой системы и датчика угловой скорости.

Введение

Микромеханические акселерометры и гироскопы имеют высокую чувствительность к изменениям температуры окружающей среды. Например, у акселерометров ADXL105 (последняя разработка фирмы *Analog Devices*) дрейф напряжения в диапазоне температур от 0 до 70 °С составляет 60 мВ или 0,25 g (4 % диапазона измеряемых сигналов) [1]. Температурный дрейф микромеханического датчика угловой скорости ENV-05D фирмы *Murata* при изменении температуры окружающей среды от -30 до +80 °С может достигать до 20 мВ (более 10 % диапазона измеряемых сигналов) [2]. Необходимо отметить, что помимо дрейфа выходного напряжения температурное влияние проявляется и в изменении крутизны датчиков. Для акселерометра ADXL105 это изменение доходит до 2 %, а для ENV-05D — до 10 %.

Для уменьшения температурной погрешности инерциальных датчиков применяют термокомпенсацию или термостатирование [3]. Эти методы уменьшения температурной погрешности имеют свои достоинства и недостатки. Так, для термокомпенсации необходимо, чтобы зависимость смещения нуля и крутизны датчика от температуры не менялась за время срока службы. И хотя в

[3] утверждается, что у акселерометров эта зависимость остается постоянной, изготовитель не гарантирует стабильность этих характеристик. Поэтому представляется, что самым надежным способом уменьшения температурной погрешности является термостатирование.

Недостатки, присущие этому способу, — увеличение габаритных размеров, потребляемой мощности и усложнение устройства — мы постарались свести к минимуму при проектировании систем стабилизации температуры для датчиков ADXL105 и ENV-05D.

Выбор структуры систем стабилизации температуры

Система стабилизации температуры (ССТ) включает в себя датчик температуры (ДТ), корректирующее звено (КЗ), нагревательный элемент (НЭ) и собственно объект регулирования (ОР). При создании ССТ выбор типа и места

установки ДТ и НЭ является, как правило, самой сложной задачей. ДТ в акселерометре ADXL105 встроен, а для НЭ имеется только одна верхняя поверхность. Поэтому расположение этих элементов ССТ было выбрано таким же, как и в работе [3]. Однако мы отказались от использования резистивного НЭ, который применен в [3], поскольку при линейном изменении силы тока с помощью резистивного НЭ рассеиваемая на нем мощность изменяется по квадратичному закону. Наличие в замкнутом контуре системы регулирования такого нелинейного элемента существенно снижает как статические, так и динамические характеристики системы. В качестве НЭ был выбран транзистор, так как при питании постоянным напряжением рассеиваемая полевым или биполярным транзистором мощность пропорциональна входному сигналу (соответственно напряжению на затворе или току базы).

Передаточная функция объекта регулирования ($W_o(p)$) ССТ была определена на основе анализа выходного напряжения ДТ при скачке мощности НЭ:

$$W_o(p) = \frac{30}{1 + 70p} e^{-3p}. \quad (1)$$

Наличие звена чистого запаздывания ограничивает частоту среза системы регулирования и делает целесообразным использование только ПИ-регулятора для получения нулевой статической ошибки.

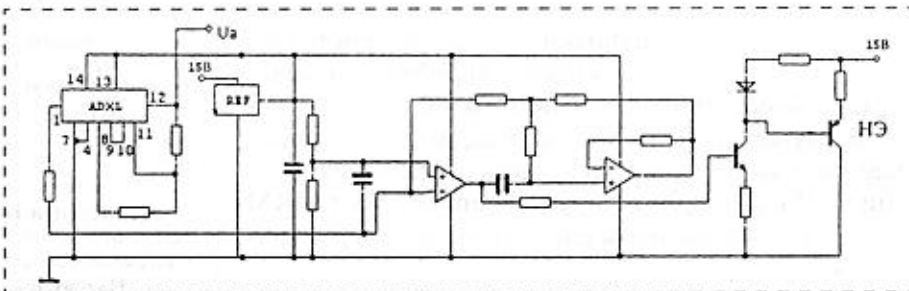


Рис. 1. Схема ССТ акселерометра ADXL105

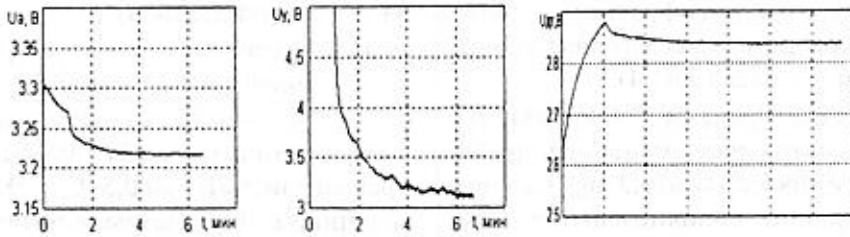


Рис. 2. Осциллограммы сигналов ССТ

На рис. 1 приведена схема ССТ с НЭ, выполненная на биполярном транзисторе и КЗ на двух операционных усилителях.

Корректирующее звено реализует передаточную функцию $W_{кз}(p)$:

$$W_{кз}(p) = \frac{1 + T_1 p}{T_2 p} \quad (2)$$

Постоянные времени T_1, T_2 определяют динамические характеристики ССТ.

Для уменьшения потребляемой ССТ мощности акселерометр был установлен в кожух из пенопласта с тепловым сопротивлением $100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

По аналогичной схеме построена и ССТ для гироскопа ENV-05D. Различие заключается в типе ДТ (применен терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом К-1-17) и числе НЭ (используются два транзистора).

Результаты испытаний ССТ акселерометра

При испытаниях ССТ измерялись выходное напряжение акселерометра (U_a), сигнал управления нагревателем (U_y) и напряжение на выходе ДТ ($U_{дт}$).

На рис. 2 приведены осциллограммы этих напряжений, снятые при включении напряжения питания при температуре окружающей среды $30 \text{ }^\circ\text{C}$ и температуре статирования $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Выход на температуру статирования происходит примерно с перегревом $5 \text{ }^\circ\text{C}$ и заканчивается через 3–4 мин. Здесь необходимо отметить, что более 1 мин ССТ находится в режиме насыщения из-за введенного ограничения по максимальному значению потребляемой мощности на уровне 1,3 Вт.

На рис. 3 приведены осциллограммы этих напряжений, снятые при изменении температуры окружающей среды на $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (на уча-

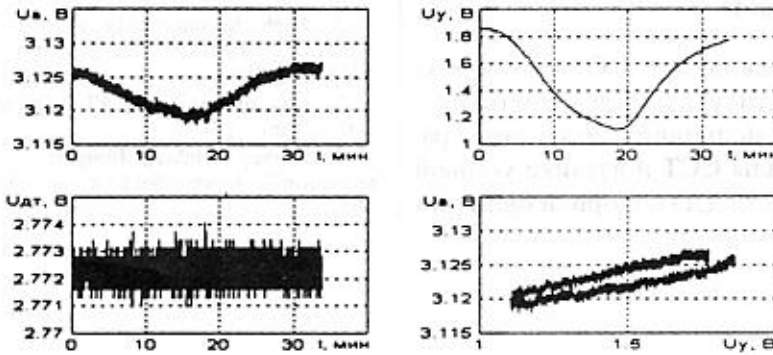


Рис. 3. Осциллограммы сигналов ССТ при изменении температуры окружающей среды

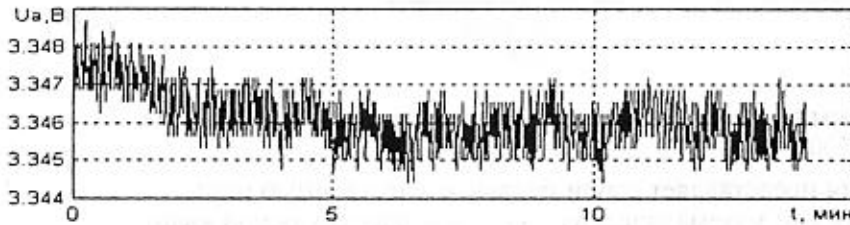


Рис. 4. Скомпенсированный сигнал акселерометра

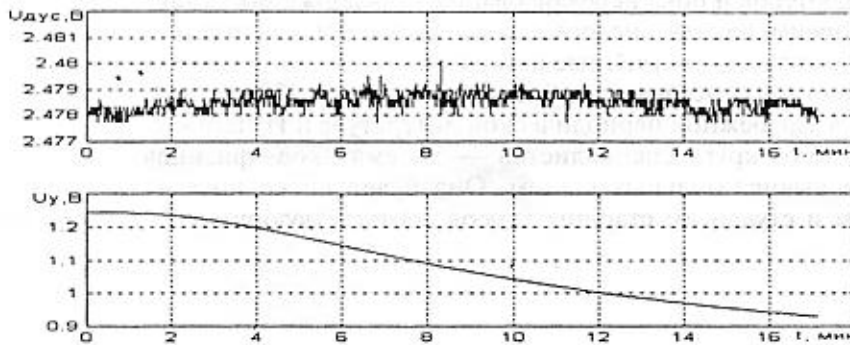


Рис. 5. Выходные сигналы ENV-05D ($U_{дт}$) и ССТ (U_y)

стке 0—18 мин — нагревание, 18—35 мин — остывание).

Напряжение на выходе ДТ $U_{ДТ}$ практически не меняется. Это обусловлено тем, что в контур ССТ введен интегральный закон регулирования, обеспечивающий нулевую ошибку по сигналу ДТ. Зависимости выходного сигнала акселерометра (U_a) от сигнала управления НЭ (U_y) при нагревании и остывании близки к линейным и практически совпадают между собой. На основании этого была проведена коррекция выходного сигнала акселерометра (введена аддитивная поправка со входа НЭ).

При том же изменении температуры (на 35 °С) такая коррек-

ция позволила уменьшить температурный дрейф термостабилизированного акселерометра более чем в 2 раза (рис. 4).

Результаты ССТ показали, что она позволяет уменьшить дрейф акселерометра до 0,3 мг/°С, а при введении дополнительной корректировки — до 0,1 мг/°С.

Результаты испытаний ССТ датчика угловой скорости ENV-05D

Испытания ССТ ENV-05D проводились по той же методике, что и испытания акселерометра. Сигналы ССТ и датчика угловой скорости (ДУС) при изменении

температуры окружающей среды на 35 °С приведены на рис. 5.

При изменении температуры окружающей среды в диапазоне от -30 °С до +75 °С изменения выходного сигнала ENV-05D не превышали 4 мВ или 0,5 °С/с. Эта величина в 50 раз меньше температурного дрейфа этого датчика без ССТ.

Список литературы

1. High Accuracy 61g to 65g Single Axis Accelerometer with Analog Input. ADXL105_0.pdf.
2. www.murata.com/CATALOG/show-catalog.htm.
3. Harvey Weinberg. Temperature Compensation Techniques for Low g Accelerometers.

НОВАЯ *книга*

Валиев К. А., Кокин А. А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. — Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. 352 с.

Предлагаемая монография представляет собой первую отечественную попытку систематического изложения как математических, так и физических основ квантовых вычислений и принципов работы квантовых компьютеров. В ней определены необходимые понятия квантовой теории информации, описаны основные квантовые логические операции и квантовые алгоритмы; обсуждены ограничения, препятствующие полномасштабным квантовым вычислениям, и возможные пути их преодоления; детально рассмотрены отдельные варианты уже реализованных прототипов квантовых компьютеров и пока нереализованных предложений, а также проанализированы их преимущества, недостатки и проблемы реализации. Представлены некоторые результаты, полученные авторами.

Содержание книги отражает опыт исследований, накопленный на 2000 г. и отраженный главным образом в зарубежной периодической литературе и Интернете.

Предназначена для широкого круга специалистов — математиков, физиков и инженеров-разработчиков вычислительных систем. Она будет также полезна преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 539.2;539.216.2;621.385.833.28

Д. В. Соколов,

Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург

ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ НАНООКСИДИРОВАНИЯ $n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

Описано изготовление оксидных наноточек и линий методом оксидирования с помощью атомно-силового микроскопа на поверхностях $n\text{-InGaAs}$ на InP с согласованным параметром решетки. Облучение светом в процессе оксидирования улучшило однородность геометрии оксидных точек и линий по сравнению с изготовленными в темноте, однако увеличение времени оксидирования при формировании точек увеличило неоднородность точек.

Введение

До настоящего времени значительные усилия исследователей были направлены на применение атомно-силового микроскопа (АСМ) для нанooksидирования различных материалов [1–6]. Перспективным направлением формирования квантовых приборов и одноэлектронных транзисторов (ОЭТ) является АСМ-оксидирование металлов и полупроводников. Несмотря на множество публикаций по АСМ-оксидированию, до настоящего времени проблема воспроизводимости процесса нанooksидирования с помощью АСМ не была рассмотрена детально.

Цель данной статьи — показать значимые факторы воспроизводимости процесса АСМ-оксидирования и применимость данного процесса для производства квантовых и одноэлектронных приборов.

Описание эксперимента

АСМ-нанooksидирование проводилось на слое $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -

типа (концентрация носителей $n = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 100 нм, выращенном методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на полуизоляторной подложке InP . Для нанooksидирования был использован АСМ с сильно легированным p^+ -Si зондом, покрытым Pt пленкой толщиной 10–30 нм. Вся система АСМ была помещена в пластиковую камеру, наполненную влажным газообразным азотом (чтобы установить влажность окружающей среды около 40%), и к зонду АСМ было приложено отрицательное напряжение U_{tip} . Оксидирование было проведено как при освещении, так и без него. Для подвода света аргонного лазера (488 нм) к зонду было подведено оптическое волокно на расстояние около 0,5 мкм, наклоненное под углом около 20° во избежание затенения места модификации пластиной зонда [7].

Оксидные точки были сформированы при $U_{\text{tip}} = -1 \div -5$ В при неподвижном на время оксидирования ($t_{\text{ox}} = 1 \div 60$ с) зонде. От 10 до 30 точек было сформировано

для каждого набора параметров. Оксидные линии были сформированы 15-кратным сканированием линий со скоростью сканирования зонда $v_{\text{tip}} = 26 \div 260$ нм/с. Однократно сканированные в темноте линии были получены при подаче напряжения 20 В и с изменением скорости сканирования зонда в диапазоне 10–100 нм/с.

Результаты и обсуждение

Геометрические параметры оксидных точек и линий. Оксидные точки могут быть сформированы на поверхности InGaAs при $|U_{\text{tip}}| > 1$ В как при облучении светом, так и без него [7]. Несмотря на то, что оксидирование с освещением при $U_{\text{tip}} = -5$ В и $t_{\text{ox}} = 1$ с привело к формированию однородного массива точек (рис. 1, а), оказалось, что однородность точек в сильной степени зависит от конкретных условий проведения процесса оксидирования. На рис. 1, б представлены отношения высоты и ширины оксидных точек, сформированных в темноте и при освещении ($U_{\text{tip}} = -5$ В и $t_{\text{ox}} = 1$ с). Меньший разброс по высоте и ширине был получен при освещении образца при меньшем времени оксидирования, причем освещение практически не повлияло на изменение высоты оксидных точек. Для точек, полученных при освещении и $U_{\text{tip}} = -5$ В и $t_{\text{ox}} = 1$ с, средняя высота и ширина составили соответственно 1,7 и 31,8 нм при среднеквадратичном отклонении 0,39 и 8,1 нм. Большой разброс данных для точек, сформированных в темноте, отчасти обусловлен формированием точек с необычно большими высотой и шириной или об-

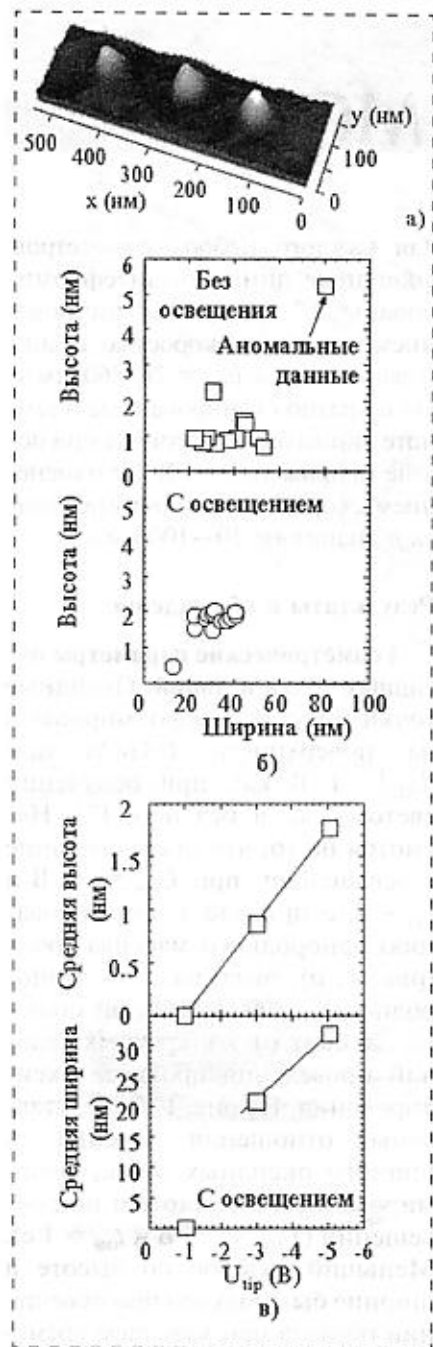


Рис. 1. АСМ-изображение оксидных точек, сформированных при освещении, $U_{tip} = -5$ В и $t_{ox} = 1$ с (а); распределение высоты и ширины оксидных точек (б); зависимость средней высоты и ширины точек от U_{tip} (в)

разованием кратеров, как показано на рис. 2, а.

На рис. 2, б, в представлены средние значения и среднеквадратичные отклонения высоты \bar{H} и ширины \bar{W} оксидных точек,

сформированных в темноте и при освещении, как функции приложенного к зонду потенциала при $t_{ox} = 1$ с.

Облучение светом улучшило однородность также и оксидных линий. На рис. 3, а представлено АСМ-изображение четырех оксидных линий *a—d*, сформированных 15-кратным сканированием при освещении под напряжением $U_{tip} = -5$ В со скоростью сканирования зонда $v_{tip} = 26; 64; 130$ и 260 нм/с соответственно. Профили оксидных линий (*a—d*), полученные с помощью АСМ, показаны на рис. 3, б. Базовые профили поверхности у подножья оксидных образований показаны линиями *a', b', c'* и *d'* соответственно. Как видно из продольных сечений линий (рис. 3, б), с уменьшением рабочей скорости сканирования от 260 до 26 нм/с высота оксидных линий возросла с 1,2 до 4,6 нм при постепенном увеличении ширины линий от 65 до 100 нм. При прочих равных условиях формирования оксида высота оксидной линии превысила высоту оксидных точек (1,77 нм) благодаря, по-видимому, многократному сканированию при формировании оксидной линии. 15-кратное сканирование можно рассматривать как применение 15 импульсов напряжения к каждому элементарному участку линии, что приводит к эквивалентному росту высоты оксида в АСМ-нанооксидировании в импульсном режиме. Более того, рост высоты и ширины оксидных линий сильно замедляется при скорости сканирования 65 нм/с. Каждая линия показала практически постоянную высоту и ширину вдоль всей длины сканирования (рис. 3, б). Флуктуация высот линий находится в полном соответствии с флуктуацией высот базовых линий поверхности, что видно из сравнения профилей оксидных линий и соответствующих базовых линий поверхности.

На рис. 4, а представлены АСМ-изображения линии, сформированной при напряжении на зонде 20 В и скорости сканирования 30 нм/с, и канавки, образовавшейся на месте оксидной линии после погружения образца в раствор HF на 10 с. Поперечные разрезы оксидной линии и канавки показаны на рис. 4, б. Как видно на рис. 4, ширина оксидной линии и вытравленной канавки почти не изменилась. В то же время глубина вытравленной канав-

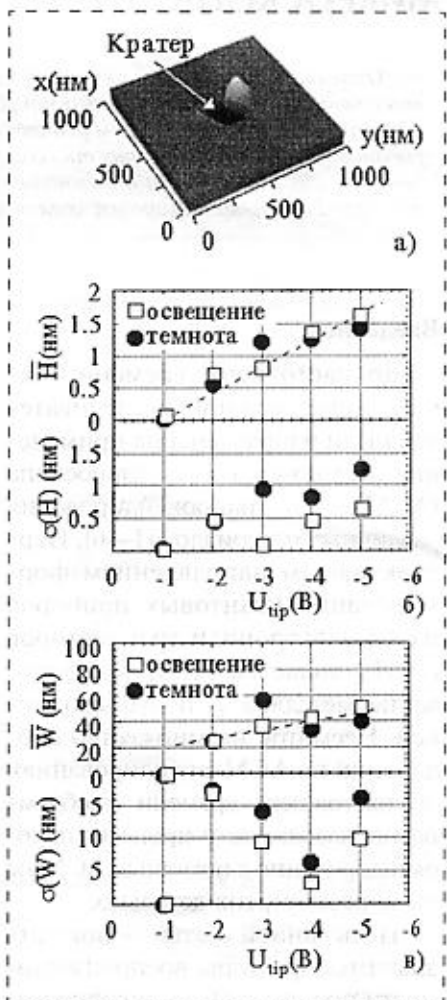


Рис. 2. Углубление, сформированное в темноте при $U_{tip} = -10$ В (а); средняя высота и среднеквадратическое отклонение высоты оксидных точек как функция от U_{tip} при освещении и без освещения места модификации (б); средняя высота и среднеквадратическое отклонение ширины оксидных точек как функция от U_{tip} при освещении и без освещения места модификации (в)

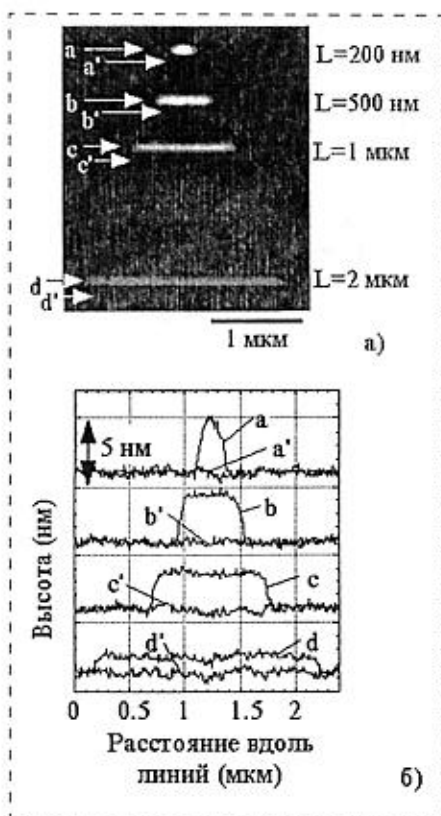


Рис. 3. АСМ-изображения оксидных линий (а); продольные сечения оксидных линий (а, б, с, д) и базовой поверхности (а', б', с', д') (б)

ки почти в 1,5 раза больше высоты линии.

Воспроизводимость процесса АСМ-оксидирования. Из поддающихся контролю факторов воспроизводимости оксидирования были рассмотрены пять факторов:

- напряжение на зонде;
- облучение светом лазера площадки АСМ-оксидирования;
- скорость сканирования при оксидировании;
- влажность окружающей среды;
- сила отрыва зонда от поверхности.

Значимость этих факторов, а также значимость неконтролируемого в ходе процесса АСМ-оксидирования фактора степени изнашивания проводящего покрытия иглы зонда обсуждены в этом разделе.

Как видно на рис. 2, б, в, независимо от облучения поверхно-

сти образца светом лазера с ростом напряжения на зонде происходит рост дисперсии высоты полученных точек. Однако каких-либо выводов о поведении дисперсии ширины оксидных точек при изменении напряжения сделать не удалось ввиду неоднородности дисперсии вдоль оси напряжения на зонде. К тому же выводу привели результаты оксидирования линий в темноте с напряжением на зонде 15, 20 и 30 В при варьировании скорости сканирования зонда в диапазоне 10–100 нм/с [7]. С ростом напряжения наблюдалось увеличение дисперсии высоты линий при хаотичном поведении дисперсии ширины линий.

Как видно на рис. 2, б, в, дисперсия высоты и ширины точек при облучении светом лазера меньше, чем при формировании точек в условиях темноты. Также было обнаружено некоторое улучшение однородности линий при облучении светом. Так, при облучении светом дисперсия высоты линий не превосходит 1 нм, что согласуется с уровнем шероховатости поверхности.

Какой-либо зависимости воспроизводимости процесса оксидирования от скорости сканирования зонда в данном эксперименте обнаружено не было.

Как было показано в работе [7], с уменьшением высоты и ширины при снижении влажности окружающей среды наблюдалось некоторое уменьшение воспроизводимости процесса оксидирования. Этим и был обусловлен выбор рабочих условий по влажности, приблизительно равный 40 %. В ходе эксперимента влажность поддерживалась с абсолютной погрешностью 10 %, что могло приводить к флуктуации геометрических параметров линий в пределах 5–8 % от высоты и ширины линий.

Зависимость высоты и ширины линий от силы отрыва зонда

от поверхности также была рассмотрена в работе [7]. Несмотря на то, что флуктуация сил взаимодействия зонда с поверхностью образца в 10 нН приводит к изменению высоты сформированных линий приблизительно на 16 %, указанная флуктуация усилия зонда представляется невозможной, так как в процессе оксидирования усилия между зондом и поверхностью поддерживались постоянными с точностью около 1 нН.

В ходе эксперимента обнаружилось существенное влияние на воспроизводимость формирования оксидов еще одного фактора — изнашивания проводящего покрытия на вершине зонда. При продолжительном оксидировании с образованием нескольких десятков точек или линий и/или при сканировании больших площадей поверхности, как в случае с обнаружением маркеров на поверхности и точным позиционированием зонда относительно маркеров, или при приложении

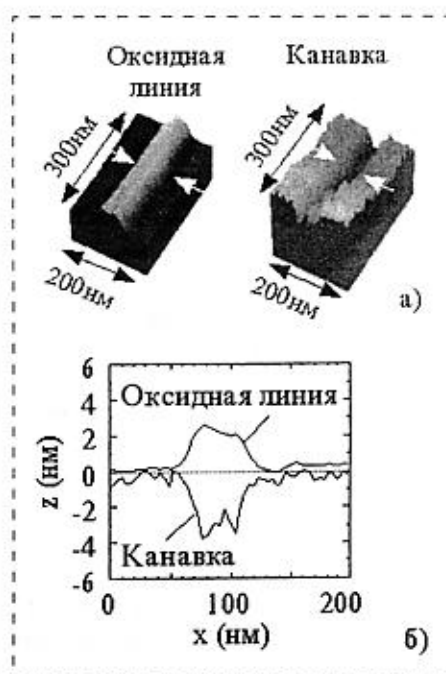


Рис. 4. АСМ изображения оксидной линии и соответствующей вытравленной канавки (а); поперечные сечения оксидной линии и вытравленной канавки (б)

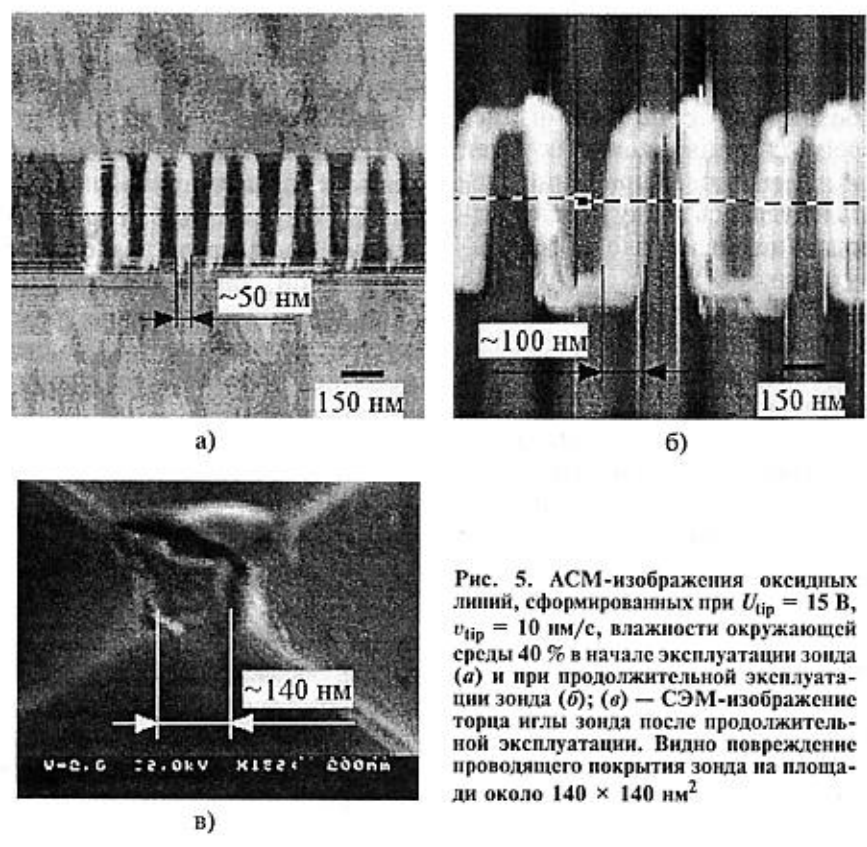


Рис. 5. АСМ-изображения оксидных линий, сформированных при $U_{tip} = 15$ В, $v_{tip} = 10$ нм/с, влажности окружающей среды 40 % в начале эксплуатации зонда (а) и при продолжительной эксплуатации зонда (б); (в) — СЭМ-изображение торца иглы зонда после продолжительной эксплуатации. Видно повреждение проводящего покрытия зонда на площади около 140×140 нм²

больших начальных потенциалов напряжения наблюдалось снятие покрытия на вершине зонда. Пример такого износа покрытия представлен на рис. 5, в, где явно видно, что проводящее покрытие сошло с вершины иглы зонда, обнажив площадку размерами более 100 нм.

На рис. 5, а, б представлены АСМ-изображения линий, сформированных при напряжении зонда 15 В, скорости сканирования зонда 10 нм/с и влажности окружающей среды 40 %. При всех прочих равных условиях формирования линий со временем эксплуатации зонда произошло удвоение ширины линий, как отмечено на рис. 5, а и б.

Как видно из рис. 4, а, вершина линии разделена продольной бороздой. До сих пор считалось, что образование подобных борозд связано с более интенсивным образованием оксида в рай-

онах, более отдаленных от вершины иглы. В процессе образования оксида при взаимодействии зонда с поверхностью образца создается механическое напряжение в материале оксида, что приводит к снижению скорости образования оксида непосредственно под вершиной иглы зонда. Однако результаты этого эксперимента показали возможность существования полевого механизма образования борозд на вершинах оксидных линий.

В результате травления оксидной линии InGaAs было обнаружено проецирование описанного выше профиля с бороздкой по вершине оксидной линии в глубь материала образца (рис. 4, б). Полученный профиль имеет вид канавки с выступом посередине, причем, как видно на рис. 4, а, глубина бороздки возрастает в направлении сканирования зонда при формировании линии. Соответствующий рост хребта базового

материала на дне вытравленной канавки виден и на изображении канавки.

Во всех экспериментах по АСМ-оксидированию InGaAs следящая система микроскопа поддерживала силу взаимодействия зонда с поверхностью постоянной. Таким образом, рост глубины бороздки при формировании линии не может быть объяснен увеличением нагрузки зонда на поверхность. В то же время, исходя из представлений об изнашивании проводящего покрытия на вершине иглы зонда в процессе формирования оксида, уменьшение нормы формирования оксида в центральной области поперечного сечения линии может быть объяснено падением напряженности поля непосредственно под вершиной иглы зонда, подвергшейся изнашиванию.

По всей видимости, при снятии проводящего покрытия иглы зонда увеличивается электрическое сопротивление контакта между иглой и поверхностью. Увеличение сопротивления приводит к смещению порогового напряжения АСМ-оксидирования в сторону больших напряжений [8]. Необходимо отметить также смещение минимальной ширины оксидных точек от 30 нм в начале эксплуатации зонда до 70 нм со временем эксплуатации зонда, что также говорит о нарастающем изнашивании зонда.

Как было отмечено в работе [7], полуконтактный режим показал не только лучшую воспроизводимость, но и лучшие геометрические характеристики сформированных структур по сравнению со структурами, полученными в контактном режиме. Объяснением этому может послужить предположение о меньшем изнашивании зонда в полуконтактном режиме ввиду отсутствия трения колеблющегося зонда о поверхность и, соответственно, более стабильных условиях АСМ-оксидирования.

Флуктуация порогового напряжения в диапазоне 2–11 В в зависимости от степени износа зонда при норме роста оксида около 2,5 нм/В является фактором, определяющим низкую воспроизводимость процесса оксидирования в контактном режиме. Существенно меньшая флуктуация порогового напряжения при полуконтактном оксидировании сопровождалась большей воспроизводимостью и лучшими геометрическими характеристиками оксидных структур. Таким образом, основным значимым фактором стабильности процесса АСМ-оксидирования является износостойкость проводящего покрытия зонда в месте контакта зонда с поверхностью.

Выводы

- Экспериментально показано, что наиболее значимым фактором воспроизводимости АСМ-оксидирования является изно-

стойкость проводящего покрытия зонда.

- Для улучшения воспроизводимости процесса формирования оксидных точек и линий методом АСМ-оксидирования n-InGaAs в контактном режиме рекомендуется проводить оксидирование на свету при влажности около 40 % и напряжении на зонде, не превышающем 8 В.
- Выявлено, что большая неравномерность геометрических характеристик оксидных точек, сформированных в контактном режиме по сравнению с полуконтактным режимом, обусловлена повышенным износом зонда при формировании точек и линий и последующем снятии изображения сформированных структур.
- Многократное линейное сканирование в процессе АСМ-оксидирования обеспечивает улучшение воспроизводимости процесса.

Список литературы

1. Held R., Vancura T., Heinzl T., Enslin K. et al. In-plane gates and nanostructures fabricated by direct oxidation of semiconductor heterostructures with an atomic force microscope // Applied Physics Letters. 1998. V. 73. N 2. P. 262.
2. Matsumoto K., Gotoh Y., Maeda T., Dagata J. A. et al. Japanese Journal of Applied Physics. 1999. V. 38. P. 477.
3. Sasa S., Ikeda T., Anjiki K. and Inoue M. Japanese Journal of Applied Physics. 1999. V. 38. P. 480.
4. Okada Y., Amano S., Kawabe M., Shimbo B. N. et al. Nanoscale Oxidation Of GaAs-Based Semiconductors Using Atomic Force Microscopy // Journal of Applied Physics. 1998. V. 83. N 4. P. 1844–1847.
5. Matsuzaki Y., Yuasa K., Shirakashi J., Chilla E. K. et al. Journal of Crystal Growth. 1999. V. 201/202. P. 656.
6. Ishii M. and Matsumoto K. Extended Abstracts of the 1995 International Conference on Solid State Devices and Materials. 1995. P. 953–955.
7. Соколов Д. В. Нанооксидирование и нанотравление n-In_{0,53}Ga_{0,47}As с помощью атомно-силового микроскопа // Научное приборостроение (в печати).
8. Соколов Д. В. Механизм нанооксидирования n-In_{0,53}Ga_{0,47}As с помощью атомно-силового микроскопа // Журнал технической физики. 2001 (в печати).

МЕЖОТРАСЛЕВАЯ 4-Я НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

13–14 марта 2001 г. в Москве (г. Зеленоград) состоялась Межотраслевая 4-я научно-техническая конференция "РАЗРАБОТКА, ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ" на базе АОТ "НИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЗАВОД "МИКРОН".

Изданы тезисы докладов под редакцией чл. корр. РАН, д-ра техн. наук, проф. Г. Я. Красникова. Сборник состоит из разделов:

- Разработка технологических процессов изготовления ИС с проектными нормами 0,5 мкм.
- Разработка технологических процессов изготовления ИС с проектными нормами 1,0 мкм.
- Физико-технологическое моделирование и межоперационный контроль.
- Микросистемная техника.
- Элементная база на КНИ-структурах.
- Элементная база на сложных полупроводниковых соединениях.
- Схемотехника, проектирование и разработка СБИС.
- Организационные и экономические проблемы производства СБИС.

Наиболее интересные материалы конференции будут опубликованы в нашем журнале.

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. № 1—4, 2001 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Синтез, ион-селективная самосборка в супрамолекулярные комплексы, фотоиндуцированные и термические перициклические реакции краунсодержащих непердельных красителей

Номер проекта: 97-03-32968-а
Год предоставления отчета: 1997

Синтезированы новые стироловые и бисстириловые красители ряда бензотиазола и хинолина, содержащие фрагменты 15-краун-5-эфира или аза-15-краун-5-эфира в бензольной части красителя и N-алкильный, N-сульфобензильный или N-сульфоалкильный спейсер — в гетероциклической части молекулы.

Проведены исследования комплексообразования транс-изомеров полученных красителей с катионами металлов методами электронной и ЯМР ¹H спектроскопии. В случае бетаинов краунсодержащих стироловых красителей (КСК) обнаружено образование димерных комплексов состава 2 (КСК) : 2 (катион). В случае бисстириловых красителей предполагается образование комплексов типа "сэндвич" с катионами большого ионного радиуса. Изучены транс-цис-фотоизомеризация КСК и их комплексов. Для всех типов бетаинов КСК обнаружено образование анион-"накрытых" комплексов в цис-форме.

Исследована реакция стереоспецифического обратимого [2 + 2]-автофотоциклоприсоединения (ФЦП) комплексов красителей. Установлено, что соотношение между двумя направлениями превращений мультифотохромных КСК — образованием прочного анион-"накрытого" комплекса и реакцией ФЦП — зависит от типа спейсера. Для объяснения ряда экспериментальных данных привлечены молекулярная механика и квантово-химические методы.

Синтезированы новые краунсодержащие бутандиенильные красители (КБК) с различными гетероциклическими остатками и фрагментами азакраун-эфиров. Установлена пространственная структура КБК методом рентгеноструктурного анализа. С помощью электронной спектроскопии изучено комплексообразование КБК с катионами металлов. Предполагается протекание в комплексах КБК внутримолекулярной фотоиндуцированной реакции рекоординации.

Основные результаты по молекулярному дизайну, спектральным свойствам, фотохимии и комплексообразованию фотохромных краун-эфиров, содержащих связь C=C, систематизированы в обзоре.

Математическое моделирование гетерогенной твердофазной реакции

Номер проекта 97-03-32618-а
Год предоставления отчета: 1997

На основании полученных нами и описанных в литературе экспериментальных данных сформулированы базовые положения и на их основе создана действующая компьютерная модель гетерогенной твердофазной электрохимической реакции внедрения лития в алюминий с образованием фазы интерметаллического соединения (ИМС) b-LiAl. Модельный расчет основан на проведении численного эксперимента. Пакет программ состоит из трех блоков. В первом ЭВМ моделирует зародышеобразование, учитывая неодинаковую вероятность нуклеации вблизи и вдали от ранее образовавшихся ядер. Программа второго блока рассчитывает совокупную поверхность растущих и перекрывающихся трехмерных зародышей, занятую новой фазой площадь поверхности матрицы и фиктивные (т. е. не учитывающие перекрывание) значения этих площадей. Программы третьего блока предназначены для математической обработки результатов расчета и построения соответствующих графиков.

Проведен анализ работоспособности и чувствительности модели. В ходе анализа варьировали значения следующих параметров: общее число полусферических зародышей на электроде (N), константа скорости роста зародышей (k), критический радиус образующегося зародыша (r_0), размер зоны обеднения (R_2), закон зародышеобразования. Полученные данные о характере влияния каждого из вышеперечисленных факторов на вид расчетной кинетической зависимости "сила тока — время" свидетельствуют о высокой чувствительности настоящей модели к их значениям, что позволяет сделать вывод о возможности применения модельного расчета для воспроизведения получаемых в электрохимическом эксперименте кинетических зависимостей.

Впервые показана возможность электрохимического внедрения лития в интерметаллические соединения (ИМС) алюминия со структурой, отличной от структуры составляющих их компонентов (CuAl_2 , Mg_2Al_3 , NiAl) в неводных растворах солей лития. Изучены закономерности образования — роста b-LiAl на подложках из Al_2Cu , Mg и Si -содержащих сплавов. Установлено, что зародышеобразование ИМС на чистом Al и его сплавах описывается степенным законом. Сделаны выводы о влиянии структуры и состава сплавов на закономерности нуклеации.

Разработан новый алгоритм для модельного расчета площади поверхности растущих и перекрывающихся зародышей новой фазы (при мгновенной нуклеации), базирующийся на применении диаграмм Вороного.

Структура комплексов полиэлектролитных и термочувствительных гелей с поверхностно-активными веществами

Номер проекта: 97-03-32770-а
Год предоставления отчета: 1997

Была исследована структура и физико-химические свойства новых полимерных материалов, приготовленных из полимер-коллоидных комплексов (ПКК) различного состава, образованных сетчатыми полимерами и поверхностно-активными веществами (ПАВ) в присутствии и в отсутствие металлосодержащих соединений.

Было изучено влияние хлористого натрия на состав и структуру ПКК, образованных слабо сшитыми сетками полидиаллилдиметиламмоний хлорида (ПДАДМАХ) и противоположно заряженными ПАВ — додецилбензолсульфонатом и додецилсульфатом натрия (ДДБС и ДДС). Как следует из данных рентгеновского малоуглового рассеяния (РМУ), которые получены при повышенной температуре, хорошо упорядоченная ламеллярная структу-

ра ПКК образуется при некотором определенном содержании ДДБС в объеме геля. При избытке молекул ПАВ во внешнем растворе высокой ионной силы хорошо упорядоченные ПКК могут быть сильно нестехиометрическими. В этом случае степень пространственного порядка в ПКК становится более высокой.

Исследованы системы ПКК, взаимодействующие с соединениями серебра, платины, золота и никеля. После восстановления металлосодержащих соединений были получены металлические частицы, вкрапленные в тело гидрогеля. Степень ионного обмена, в котором участвовали ионы металлов, выше в случае противоположно заряженных ионов металлов и полиэлектролитного геля. С помощью метода РМР было найдено, что внедрение ионов металлов в тело гидрогеля и рост металлических наночастиц приводят к нарушению порядка, образованного агрегатами ПАВ, если расстояние между заряженными группами в полиэлектролите не позволяет обеспечить сильное гидрофобное взаимодействие между молекулами ПАВ. ПДАДМАХ/ДДБС комплексы, по-видимому, являются более стабильными, чем ПДАДМАХ/ДДС комплексы, по отношению к образованию коллоидных частиц металлов внутри ПКК.

Экспериментальное и теоретическое исследование мономолекулярных реакций в органических кристаллах

Номер проекта: 97-03-32252-а
Год предоставления отчета: 1997

Получены экспериментальные данные по константам скорости мономолекулярных реакций термического разложения в твердом состоянии (K_s) для 17 органических соединений. На примере реакций термического разложения ортонитроарилазидов изучены закономерности протекания гомогенной мономолекулярной реакции, имеющей нулевой объем активации в кристаллическом веществе. Для этого была исследована кинетика термического разложения тринитротриазидобензола в твердом состоянии, определены активационные параметры. Тормозящий эффект решетки $K_{\text{ж}}/K_{\text{тв}} = 44$ при 80°C . Величина тормозящего эффекта показывает, что реакция в основном протекает гомогенно в объеме кристалла. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для проведения кинетических исследований в растворах при давлениях до 8 кбар. Изучена кинетика термического разложения тринитротриазидобензола в бензоле при температуре 80°C и давлении до 8 кбар. Обнаружено, что логарифм константы скорости увеличивается с давлением по параболическому закону, а объем активации реакции равен нулю. Никаких

кинетических особенностей, вызванных кристаллизацией бензола при давлениях около 3 кбар, не наблюдается. Таким образом, реакция термического распада вещества, идущая через циклическое переходное состояние и имеющая нулевой объем активации, эффективно тормозится в собственной кристаллической решетке этого вещества, ускоряется под действием высокого давления по параболическому закону и не реагирует на переход растворителя из жидкого в твердое состояние.

Молекулярные конструкции на основе ДНК, фиксированных в структуре жидкокристаллических дисперсий, и полимерных хелатных мостиков между этими биополимерами

Номер проекта: 97-03-32758-а
Год предоставления отчета: 1997

Проведены теоретические и экспериментальные исследования свойств модельной системы, отражающей структурное состояние молекул ДНК в составе биологических объектов. Эта система представляет собой частицы холестерической жидкокристаллической дисперсии из молекул двухцепочечной ДНК, которые фиксированы в пространстве с помощью полимерных хелатных сшивок (мостиков). Полимерные хелатные мостики состоят из чередующихся молекул антрациклинового антибиотика и ионов двухвалентной меди.

Эффективность образования и свойства созданных молекулярных конструкций определяются как способностью антибиотика образовывать "неклассический" комплекс с молекулами ДНК, так и тонкими особенностями его химической структуры. Пространственная организация и физико-химические свойства молекулярных конструкций определяются геометрическими параметрами полимерных хелатных мостиков (их длиной и ориентацией по отношению к оси молекулы ДНК) между молекулами ДНК. Формирование молекулярных конструкций имеет место только при определенной "критической" концентрации ионов двухвалентной меди и антрациклинового антибиотика, которая необходима для образования полимерных хелатных мостиков. Нуклеотидный состав молекул ДНК и двухцепочечных синтетических полинуклеотидов не оказывает заметного влияния на эффективность формирования и свойства молекулярных конструкций.

Изучено влияние ионной силы раствора на стабильность и физико-химические свойства молекулярных конструкций. Впервые показано, что уменьшение ионной силы до крайне низких значений не сопровождается разрушением молекулярных кон-

струкций, т. е. в этих условиях осмотическое давление раствора перестает быть фактором стабилизации пространственной структуры жидкокристаллических дисперсий ДНК.

Физико-химическое исследование и согласование данных по диаграммам состояния халькогенидных систем с гомологическими рядами тройных слоистых тетрадимитоподобных соединений

Номер проекта: 97-03-33385-а
Год предоставления отчета: 1997

На основе рентгено- и металлографического исследований построено изотермическое сечение при 723 К тройной системы Ge—Sb—Te. Впервые обнаружены при этой температуре фазы с 33- и 39-слойными решетками: $Ge_3Sb_2Te_6$ ($n = 3, m = 1$) и $Ge_4Sb_2Te_7$ ($n = 4, m = 1$) соответственно. С помощью монокристалльного автоматического дифрактометра "Syntex P1" измерены интенсивности рефлексов для $GeSb_2Te_4$. Определены координаты атомов, межатомные расстояния и заселенность позиций ($R = 5,3\%$). Установлены закономерности образования слоистых соединений гомологических рядов $nBi_2 \cdot mBi_2Te_3$ и $nGeTe \cdot mBi_2Te_3$ в зависимости от соотношения n и m . Показано, что в образовании соединений обоих гомологических рядов участвуют двухслойные (Bi_2 или $GeTe$) и пятислойные (Bi_2Te_3) пакеты. В случае $nBi_2 \cdot mBi_2Te_3$ наблюдается аддитивное наложение вдоль оси "с" двух типов слоевых пакетов: Bi_2 и Bi_2Te_3 , между которыми действуют ван-дер-ваальсовы связи. В отличие от этого, в структурах $nGeTe \cdot mBi_2Te_3$ аддитивность сложения двухслойных пакетов $GeTe$ и пятислойных Bi_2Te_3 отсутствует. Двухслойные пакеты $GeTe$ не сохраняют свою индивидуальность, а соединяясь с пятислойными пакетами, образуют новые многослойные пакеты, связь между которыми осуществляется слабыми ван-дер-ваальсовыми силами. Проведенное исследование позволяет развить новый подход к данным слоистым соединениям как к естественным композитным термоэлектрическим материалам, свойства которых (особенно решеточную теплопроводность) можно варьировать в широких пределах путем изменения комбинаций различных слоевых пакетов.

Проведена экспертная оценка данных по фазовой диаграмме Ge—Bi—Te и по ограничивающим ее бинарным системам: Ge—Te, Bi—Te, Ge—Bi для построения топологической модели фазовой диаграммы тройной системы. Имеющиеся в литерату-

ре данные о разрезах и сечениях недостаточны для однозначного определения топологии фазовой диаграммы. Сделаны предположения о характере недостающих фазовых реакций. Построен топологический образ фазовой диаграммы Ge—Bi—Te в виде графа. Вершины графа помечены индексами фаз системы, а ребра отвечают двухфазным комплексам и помечены номерами фазовых реакций, упорядоченных по температуре. Использовано также представление топологического образа диаграммы в виде матрицы смежности графа. Разработана простейшая термодинамическая модель слоистых твердых растворов в системах Bi—Te и Bi—Te—Ge.

Исследования в области синтеза нитрида углерода

Номер проекта: 97-03-33228-а
Год предоставления отчета: 1997

Сконструирована установка для газоразрядного лазерно-химического синтеза, состоящая из реактора, вакуумной системы, высоковольтной системы питания и источника лазерного излучения. Собран макет установки и проведено опробирование ее работоспособности. Синтез твердофазного нитрида углерода основан на реакции углеродных или азотуглеродных кластеров с активными частицами азота непосредственно в зоне электрического разряда. Кластеры образуются при лазерном испарении углеродных материалов и вводятся в разряд.

Предварительные эксперименты показали, что при лазерном испарении спектрально чистого графита непосредственно в газоразрядную азотную плазму на подложке, расположенной внутри реактора, образуется характерная пленка. Если продукты лазерного испарения не вводятся в газоразрядную азотную плазму, то на подложке пленка не образуется, даже если электрический разряд горит в азоте между графитовыми электродами.

Термическим разложением роданида ртути синтезирован аморфный нитрид углерода состава $C_3N_{4.2}$, который предназначен для использования в качестве материала для получения азотсодержащих углеродных кластеров при его лазерном испарении. В целях определения эффективности лазерного испарения синтезированного аморфного нитрида углерода были выполнены оптико-акустические исследования его параметров, которые характеризуют взаимодействие излучения с материалом. Для получения кристаллического нитрида углерода аморфный материал состава $C_3N_{4.2}$ подвергался термобарической обработке в установке твердофазного статического сжатия. В образцах закалки аморфного графита ($C_3N_{4.2}$) (после термобарической обработки при температурах выше 1200 °С и давлении 60 кбар) обнаружены графит и стекловидные образования.

Химическое формирование магнитоупорядоченных структур в новых элементоорганических полимерах — металлсодержащих полисиланах

Номер проекта: 97-03-33724-а
Год предоставления отчета: 1997

Разработаны синтетические способы получения дихлоролигосиланов, являющихся промежуточными продуктами при получении металлсодержащих полисиланов с фенильными и метильными группами у атома кремния. Основной способ — раскрытие гексасилановых циклов хлорирующими агентами — $SnCl_4$, $TiCl_4$ (в случае перметилированных циклосиланов) и тетрачлорэтаном (в случае перфенилированных циклосиланов). Найдены оптимальные условия, позволяющие снизить вероятность протекания побочной реакции, приводящей к хлорпроизводным гексациклосиланов. Исследовано взаимодействие дихлоролигосиланов с галогенидами металлов. Установлено (в случае перметилированных олигосиланов) нетривиальное протекание реакции, приводящее к обмену функциональных групп между кремнием и металлом. Предложена схема протекающих превращений. На основе перфенилированных олигосиланов получены соединения, где полисилановые блоки соединены металлосилоксановыми фрагментами — $[Si(R_2)-Si(R_2)]_n-O-M-O-[Si(R_2)-Si(R_2)]_n-$ ($M=Cu, Ni$; $R=Ph$, $n=2-4$). На основе широкого набора спектральных методов исследованы структурные особенности соединений, содержащих медьсилоксановые фрагменты. Установлено, что по мере увеличения содержания меди происходит изменение строения координационных центров от моноядерных слабоискаженных октаэдров до полиядерных систем, в которых атомы меди связаны сильным спин-обменным взаимодействием.

Использование принципов иммунохимического анализа в вольтамперметрии

Номер проекта: 97-03-33232-а
Год предоставления отчета: 1997

Обоснована и экспериментально подтверждена возможность разработки новых амперометрических иммуноферментных сенсоров для селективного определения некоторых патогенных грибов (*Candida albicans* — CA, *Phytophthora infestans* — PhI). Было установлено, что в зависимости от соотношения компонентов в составе биочувствительной части сенсоров, а также от условий проведения биоспецифических реакций наблюдается

ингибирующий или активирующий эффект по отношению к каталитической активности фермента холинэстеразы (ХЭ), используемого для регистрации аналитического сигнала. Показано, что для данных грибов возможно снизить нижнюю границу определяемых содержаний за счет активирующего эффекта до $1,6 \cdot 10^{-16}$ для СА и $6,0 \cdot 10^{-14}$ моль/л для PhI. По данным вольтамперметрических измерений определены константы связывания образующихся комплексов антиген—антитело: для СА —

$$K(1) = (5,4 \pm 0,2) \cdot 10^{12}, \\ K(2) = (4,7 \pm 0,1) \cdot 10^{10} \text{ 1/моль};$$

для PhI —

$$K(1) = (1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{11}, \\ K(2) = (4,4 \pm 0,1) \cdot 10^{12} \text{ 1/моль}.$$

Оценены кинетические параметры реакции ферментативного гидролиза серосодержащих субстратов ХЭ при различных концентрациях субстрата, антигена и антител. Значения констант ингибирования в зависимости от соотношения компонентов в биочувствительной части сенсора составляют $(8,8 \pm 0,6) \cdot 10^{-9}$ — $(9,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$ 1/моль, константы активации $(2,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$ — $(5,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$ 1/моль. Высказаны предположения о вероятном механизме ингибирования и активации. Определенное внимание уделено изучению возможности использования для вольтамперметрической регистрации результатов биоспецифических взаимодействий систем L-цистеиндисульфгидролаза — L-цистеин и тканевого биосенсора на ее основе. Найдены условия получения иммобилизованных гомогенатов растительных тканей, позволяющие сохранить их каталитическую активность в течение недели и более. Исследования по использованию ионов металлов Pb(II), Cd(II) и Pt(II) как меток для контроля иммунологических реакций показали перспективность использования Pt(II) для регистрации взаимодействий ДНК-антигена к ДНК.

Теоретические и экспериментальные исследования нефиковского массопереноса в полимерных стеклах

Номер проекта: 97-03-32487-а

Год предоставления отчета: 1997

С помощью методов расширенной необратимой термодинамики описан массоперенос низкомолекулярных веществ в полимерных стеклах, сопровождающийся различными кинетическими отклоне-

ниями от фиковской диффузии. В число переменных, определяющих неравновесное состояние, включаются диффузионный поток и тензор вязких напряжений. Получена и проанализирована математическая модель, учитывающая как перекрестные эффекты между диффузией и вязкоупругими напряжениями, так и релаксацию системы к локальному равновесию. Получены математические выражения для модифицированного закона Фика и уравнения диффузии. При соизмеримых временных и пространственных масштабах массопереноса и нелокальности такая модель приводит к появлению волнового фронта на профиле концентраций, который распространяется с постоянной скоростью. Это характерно, в частности, для диффузионной кинетики типа II (Case II). Показано, что расширенная необратимая термодинамика является удобным инструментом для анализа аномальных эффектов при диффузии низкомолекулярных веществ в стеклообразных полимерных материалах.

Начаты исследования по численному моделированию процесса аномальной диффузии в полимерных материалах с учетом релаксационных и перекрестных эффектов на основе построенной математической модели. На примере полистирола, нитратов целлюлозы, полиметилметакрилата экспериментально исследованы закономерности формирования диффузионных зон (ДЗ) в стеклообразных полимерах из ограниченного источника диффузанта.

Начата разработка модели, описывающей течение подобных процессов в реальных условиях. Установлено, что процесс роста ДЗ характеризуется двумя основными стадиями. На первой из них он может подчиняться как диффузионной, фиковской кинетике, так и значительно отклоняться от нее, протекая по кинетике, характеризуемой "Case II", а также по промежуточному механизму. Концентрационный профиль имеет выпуклую форму и резко спадает в области концентрированных растворов. После выработки диффузанта на поверхности полимера происходит постепенное снижение концентрации по ширине ДЗ, а по мере развития процесса — резкое падение скорости роста зоны и ее изотермическое стеклование. Установлено, что температура стеклования ДЗ примерно соответствует температуре диффузионного процесса. Показано, что изменения протяженности ДЗ в течение длительного времени настолько малы, что формирующиеся градиентные системы можно считать условно-равновесными или метастабильными структурами.

Новости нанотехнологии

В море информации, которая размещена в Интернет, найдены интересные, на наш взгляд, крупицы новых знаний по тематике журнала. Предлагаем подборку кратких сообщений, которая, надемся, не оставит читателя равнодушным.

Микромеханический транзистор

Сотрудники Центра изучения материалов и структур (г. Тулуза, Франция) предложили теоретическую компьютерную модель микромеханического транзистора. Основная идея работы — использовать в транзисторе встроенный одноточечный туннельный микроскоп. Игла микроскопа должна быть установлена против молекулы фуллерена C_{60} . Такая конфигурация оказывается сверхчувствительной к перемещению кантилевера. Вначале, при приближении иглы к молекуле фуллерена, ток возрастает экспоненциально вследствие усиливающегося перекрытия волновых функций. При более тесном контакте молекула фуллерена испытывает эффективное сжатие, что приводит к расщеплению электронных состояний и дополнительному росту туннельного тока. Усиление тока также возникает из-за положительной обратной связи через иглу кантилевера. В итоге схема обеспечивает возрастание туннельного тока на два порядка при перемещении кантилевера на 0,1 нм.

Необходимо отметить, что российские ученые В. А. Федирко, В. А. Быков и М. Д. Еремченко еще в 1996 году, изучая молекулярные монослои фуллеренов C_{60} , наблюдали особенности туннелирования на вольт-амперных характеристиках, когда между подложкой и зондом находился отдельный фуллереновый кластер (J. Anal. Chem. 1996, 355, 707—709).

Nanotechnology, 2001, 12. P. 44—52.

Исследователи нацелились на одноэлектронную схему

Группа ученых из Института физических и химических исследований (Япония) создали первый в своей стране одноэлектронный туннельный транзистор, работающий при нормальной температуре. По их мнению, транзистор позволит создать микропроцессор терабитной плотности площадью 10 см^2 . Транзистор состоит из трех полимерных "проводов" шириной 3 нм, которые выполняют роль стока и истока, нанесенных на графитовую подложку. Они разделены квантовой ямой, содержащей кластер — конденсатор из 500 атомов серебра. На расстоянии 4 нм от емкости размещен затвор. Появление подобного транзистора стало возможным благодаря прорыву, сделанному этой группой уче-

ных год назад, когда им удалось создать молекулярные провода в полимерной пленке длиной до 300 нм. Для размещения кластеров серебра в процессе используется игла туннельного микроскопа, которая переносит кластер в требуемое положение. На этапе моделирования схемы разработчики столкнулись с двумя основными трудностями: надежность размещения квантовых ям по заданному шаблону и тестирование полученной схемы. Последнюю проблему им, по-видимому, придется решать, используя трехзондовый туннельный микроскоп.

By Paul Kallender, EE Times

Mar 7, 2001 (8:18 AM)

URL: <http://www.techweb.com/wire/story/TWB20010307S0002>

Микровентиляторы для микросхем

Возможно, вскоре мы избавимся от огромных и шумных вентиляторов в компьютерах. Ученые из Университета Колорадо предлагают заменить их на микропропеллеры, изготавливаемые прямо на поверхности интегральных схем. Вентилятор с размером лопастей менее 500 мкм изготавливается путем размерного травления тонкого слоя кремния. Каждая лопасть прикрепляется к центральному остову при помощи шарнира, и на одну сторону каждого шарнира осаждается золотая пленка. Далее на нее наносят каплю припоя; поверхностное натяжение между припоем и золотом заставляет лопасти подниматься. Чтобы привести вентилятор в действие, формируются дополнительные узлы с удерживающимися на них кремниевыми обкладками. Они располагаются на слое диэлектрика Si_3N_4 , покрывающего кремниевую подложку под вентилятором. На одном из концов обкладки создается выступ типа "нога" и между противоположной стороной обкладки и подложкой подается переменное напряжение. Разность потенциалов вызывает изгиб обкладки в сторону диэлектрика, тогда как "нога", на другом конце поднимается и вращает вентилятор. При приложенном переменном напряжении с частотой 2 кГц скорость вентилятора составляет от 50 до 180 оборотов в минуту. Разработчики надеются повысить эту цифру на четыре порядка.

New Scientist issue: 20 January 2001

"Нанофлюидика"

Исследователи из Университета Корнелла (Нью-Йорк) использовали нанотехнологию, чтобы построить микроскопическое кремниевое устройство. Оно имеет размеры, сравнимые с ДНК, про-

теинами и прочими биологическими молекулами, и позволяет считать молекулы, анализировать, разделять и работать с ними. Ученые предлагают новые способы сортировки фрагментов ДНК по длине, которые дадут возможность биологам работать быстро с небольшим количеством материала. Созданы различные наноструктуры на основе кремния с порами, размеры которых сравнимы с молекулой ДНК. Как и в традиционном методе, основой является разделение молекул по скорости их движения в электрическом поле. Новым является применение дополнительных средств, таких как кремниевые мембраны и массивы тонких столбиков на квадратной кремниевой решетке. Для работы с одиночными молекулами был сделан микроскопический туннель шириной 1 мкм и длиной 30 мкм, через который за один импульс может пройти только одна молекула ДНК. Для визуализации ДНК помечают другими молекулами, которые флуоресцируют при облучении их ультрафиолетом. Свет доставляется микроволноводами, расположенными по обе стороны туннеля.

EMBARGOED FOR RELEASE: 15 FEBRUARY 2001 AT 17:00 ET US.

Скрученные полупроводниковые нанотрубки

Эlegantный метод изготовления нанотрубок предложен учеными Института Макса Планка в Штуттгарте (Германия). На поверхность кремния, покрытого естественным оксидом, осаждался тонкий слой Si/Ge, причем нижний слой имеет постоянную решетку большую, чем верхний слой. При селективном травлении оксида этот слой оказывается свободным, и каждый из слоев кремния и германия пытается принять присущую ему постоянную решетку, что в конечном счете приводит к силам, направленным перпендикулярно к плоскости подложки. Сила поднимает слой вверх, формируя нанотрубку после одного полного оборота. Пока получены трубки диаметром до 500 нм. Уменьшение радиуса трубки связано с улучшением качества напыляемых пленок с сохранением толщины в два атомных слоя.

Nature, March 8, 2001.

Свет вращает микрочастицы

Сотрудники Биологического исследовательского центра АН Венгрии создали и привели в движение микрообъекты с помощью сфокусированного лазерного луча. Микрочастицы захватываются и удерживаются в фокусе лазера так называемым лазерным пинцетом на основе ИК диодного лазера ($\lambda = 994$ нм). Процесс полимеризации происходит при двухфотонном облучении оптического клея (два УФ лазерных луча с различной длиной волны, один — сфокусированный, другой — слабо "расфокусированный"). Клей облучается светом ($\lambda \approx 340$ нм), а в фокусе луча Ar лазера (514 нм) достигается необходимая интенсивность для полимеризации. Образующийся стеклообразный полимер ($n = 1,56$) легко манипулируется лазерным пинцетом. Перемещением материала с помощью трехосной пьезоплатформы создаются детали нужной конфигурации размером несколько микрометров. След лазера при перемещении образует тонкую полимерную нить, размер которой зависит от фокусировки и мощности лазерного пучка и достигает в этих экспериментах 500 нм при интенсивности излучения 20 мВт.

Таким образом, удалось создать различные микродетали — роторы, шестеренки, "разбрызгиватели". Сфокусированный луч лазерного пинцета может удерживать ротор в нужном положении и поставлять необходимый поток для его вращения. В исходной смоле было приготовлено несколько сотен деталей. Неполимеризованная масса затем растворялась в ацетоне, и далее в полученной среде проводились эксперименты с вращением. Устойчивое вращение с частотой до нескольких герц при интенсивности излучения 20 мВт наблюдалось в конструкции, подобной разбрызгивателю.

Appl. Phys. Lett., 2001, 78 (2). P. 249-251.

В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
И. И. Бобринецкий, **Э. А. Снисаренко**

E-mail: ykn@miee.ru

<http://www.nanoworld.org/russian/tef>

В МИРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Около сорока лет темпы развития полупроводниковой электроники хорошо описывались так называемым законом Мора. Согласно этому закону число элементов, приходящих на одну микросхему, удваивалось каждые полтора—два года. Этот эмпирический закон хорошо выполнялся вплоть до сегодняшнего дня, что вселяло и вселяет наде-

жду на его продолжение. Более того, в 1999 г. Ассоциация полупроводниковой индустрии (Semiconductor Industry Association (SIA), International Technology Roadmap for Semiconductor (ITRS)), строя свои прогнозы развития полупроводниковой технологии вплоть до 2014 г., ориентировалась на закон Мора. Вместе с тем в этом прогнозе не без

теинами и прочими биологическими молекулами, и позволяет считать молекулы, анализировать, разделять и работать с ними. Ученые предлагают новые способы сортировки фрагментов ДНК по длине, которые дадут возможность биологам работать быстро с небольшим количеством материала. Созданы различные наноструктуры на основе кремния с порами, размеры которых сравнимы с молекулой ДНК. Как и в традиционном методе, основой является разделение молекул по скорости их движения в электрическом поле. Новым является применение дополнительных средств, таких как кремниевые мембраны и массивы тонких столбиков на квадратной кремниевой решетке. Для работы с одиночными молекулами был сделан микроскопический туннель шириной 1 мкм и длиной 30 мкм, через который за один импульс может пройти только одна молекула ДНК. Для визуализации ДНК помечают другими молекулами, которые флуоресцируют при облучении их ультрафиолетом. Свет доставляется микроволноводами, расположенными по обе стороны туннеля.

EMBARGOED FOR RELEASE: 15 FEBRUARY 2001 AT 17:00 ET US.

Скрученные полупроводниковые нанотрубки

Эlegantный метод изготовления нанотрубок предложен учеными Института Макса Планка в Штуттгарте (Германия). На поверхность кремния, покрытого естественным оксидом, осаждался тонкий слой Si/Ge, причем нижний слой имеет постоянную решетку большую, чем верхний слой. При селективном травлении оксида этот слой оказывается свободным, и каждый из слоев кремния и германия пытается принять присущую ему постоянную решетку, что в конечном счете приводит к силам, направленным перпендикулярно к плоскости подложки. Сила поднимает слой вверх, формируя нанотрубку после одного полного оборота. Пока получены трубки диаметром до 500 нм. Уменьшение радиуса трубки связано с улучшением качества напыляемых пленок с сохранением толщины в два атомных слоя.

Nature, March 8, 2001.

Свет вращает микрочастицы

Сотрудники Биологического исследовательского центра АН Венгрии создали и привели в движение микрообъекты с помощью сфокусированного лазерного луча. Микрочастицы захватываются и удерживаются в фокусе лазера так называемым лазерным пинцетом на основе ИК диодного лазера ($\lambda = 994$ нм). Процесс полимеризации происходит при двухфотонном облучении оптического клея (два УФ лазерных луча с различной длиной волны, один — сфокусированный, другой — слабо "расфокусированный"). Клей облучается светом ($\lambda \approx 340$ нм), а в фокусе луча Аг лазера (514 нм) достигается необходимая интенсивность для полимеризации. Образующийся стеклообразный полимер ($n = 1,56$) легко манипулируется лазерным пинцетом. Перемещением материала с помощью трехосной пьезоплатформы создаются детали нужной конфигурации размером несколько микрометров. След лазера при перемещении образует тонкую полимерную нить, размер которой зависит от фокусировки и мощности лазерного пучка и достигает в этих экспериментах 500 нм при интенсивности излучения 20 мВт.

Таким образом, удалось создать различные микродетали — роторы, шестеренки, "разбрызгиватели". Сфокусированный луч лазерного пинцета может удерживать ротор в нужном положении и поставлять необходимый поток для его вращения. В исходной смоле было приготовлено несколько сотен деталей. Неполимеризованная масса затем растворялась в ацетоне, и далее в полученной среде проводились эксперименты с вращением. Устойчивое вращение с частотой до нескольких герц при интенсивности излучения 20 мВт наблюдалось в конструкции, подобной разбрызгивателю.

Appl. Phys. Lett., 2001, 78 (2). P. 249-251.

В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
И. И. Бобринецкий, **Э. А. Снисаренко**

E-mail: ykn@miee.ru

<http://www.nanoworld.org/russian/tef>

В МИРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Около сорока лет темпы развития полупроводниковой электроники хорошо описывались так называемым законом Мора. Согласно этому закону число элементов, приходящих на одну микросхему, удваивалось каждые полтора—два года. Этот эмпирический закон хорошо выполнялся вплоть до сегодняшнего дня, что вселяло и вселяет наде-

жду на его продолжение. Более того, в 1999 г. Ассоциация полупроводниковой индустрии (Semiconductor Industry Association (SIA), International Technology Roadmap for Semiconductor (ITRS)), строя свои прогнозы развития полупроводниковой технологии вплоть до 2014 г., ориентировалась на закон Мора. Вместе с тем в этом прогнозе не без

сожаления отмечается, что уже к 2006—2007 гг. будут исчерпаны все исследованные потенциальные технологические возможности развития полупроводниковой микроэлектроники. В данном прогнозе проанализировано около 20 параметров, характеризующих уровень развития технологии: число уровней металлизации, ширина проводящих дорожек и их эффективная проводимость, значение диэлектрической проницаемости изолирующих слоев и т. д. Анализ возможностей улучшения этих параметров показал, что к 2006—2007 гг. все существующие идеи по их модернизации будут реализованы.

Таким образом, в рамках существующих представлений дальнейшее развитие полупроводниковой технологии будет исчерпано, хотя на отдельных направлениях в научных лабораториях и достигнуты многообещающие результаты. Так, например, создан транзистор с толщиной диэлектрического слоя 14 нм и рекордно коротким затвором — 20 нм. В целом же ситуация представляется весьма пессимистической. В этом нет ничего страшного — все имеет свое начало и конец.

История развития электроники аналогична истории развития устройств точного времени, которые прошли путь от механических хронометров, применяющих различного типа маятники, через кварцевые часы, основанные на твердотельных резонансах, до современных наиболее точных часов, использующих внутримолекулярные эффекты в молекулах аммиака и т. д. Подобным образом развивается и электроника, прошедшая путь от механических электромагнитных реле и электровакуумных ламп к твердотельным транзисторам и микросхемам, а в настоящее время она подошла к порогу, за которым лежит область использования индивидуальных свойств молекул — область молекулярной технологии.

Традиционно дальнейшие перспективы развития электроники связываются с созданием полупроводниковых приборов, использующих квантовые явления, в которых счет идет на единицы электронов. В последнее время широко ведутся теоретические и экспериментальные исследования искусственно создаваемых низкоразмерных структур: квантовых слоев, проволок и точек. Особенно большое внимание уделяется эффекту кулоновской электронной блокады. Ожидается, что специфические квантовые явления, наблюдающиеся в этих системах, могут лечь в основу создания принципиально нового типа электронных приборов.

Переход на квантовый уровень, несомненно, является новым важным этапом в развитии электроники, так как позволяет перейти на работу практически с единичными электронами и создать элементы памяти, в которых один электрон может соответствовать одному биту информации. Однако создание искусственных квантовых структур пред-

ставляет сложнейшую технологическую задачу. Наряду с проблемами малых размеров, на которых реализуются квантовые явления, значительно ужесточаются требования к составу и однородности легирования исходных материалов. При этом возрастают трудности безукоризненного воспроизведения размеров и состава квантовых структур. На решение этой важнейшей задачи нацелена вся технологическая и интеллектуальная мощь полупроводниковой науки и индустрии. Сформулирована и развивается новая область электроники — наноэлектроника, оперирующая с размерами в единицы нанометров.

В последнее время стало очевидным, что реализация квантовых структур сопряжена с большими технологическими сложностями даже при создании единичных элементов, и непреодолимые трудности возникают при создании чипов с многомиллионными элементами. Выходом из создавшегося положения, по мнению многих исследователей, является переход к новой технологии — *молекулярной электронике*. Именно практические технологические трудности полупроводниковой технологии инициировали активные исследования по молекулярной электронике в последние годы.

Новая технология имеет и другие параллельные названия: молекулярная нанотехнология, органическая электроника. В любом случае речь идет об использовании молекулярных материалов для создания нового поколения электронных устройств. В частности, считается, что создание нового поколения устройств отображения информации (дисплеев), элементов памяти и химических сенсоров может быть достигнуто только в рамках новой технологии.

Совершенно неслучайно, что основное внимание было сосредоточено на молекулярных системах. Для этого имеется несколько причин. Во-первых, молекула представляет собой идеальную квантовую структуру, состоящую из отдельных атомов, движение электронов по которой задается квантово-химическими законами и является естественным пределом миниатюризации. Во-вторых, можно отметить большое разнообразие молекулярных структур и простоту их модификаций, которые, как правило, сохраняют свою индивидуальность в различных агрегатных состояниях. Это обуславливает большое разнообразие возможных молекулярных систем и физических эффектов, которые могут в них реализоваться на атомарных и молекулярных размерах.

Другой, не менее важной, особенностью молекулярной технологии является то, что в основе создания подобных квантовых структур лежит принцип самосборки. Способность атомов и молекул при определенных условиях самопроизвольно соединяться в заранее заданные молекулярные образования является средством организации микроскопических квантовых структур, оперирование с

молекулами предопределяет и путь их создания. Именно синтез молекулярной системы является первым актом самосборки соответствующих устройств. Этим достигается идентичность собранных ансамблей и, соответственно, идентичность размеров элементов, и тем самым, надежность и эффективность протекания квантовых процессов, функционирования молекулярных устройств. Может оказаться, что реализация квантовых слоев, проволок и точек также станет проще при использовании молекулярной технологии. Отмеченные факторы определяют главное отличие от полупроводниковой технологии и обуславливают преимущества и перспективы молекулярного подхода в построении электронных устройств.

Перспектива использования молекулярных материалов, в том числе и одиночных молекул как активных элементов электроники, уже давно привлекает исследователей. Еще в начале 60-х годов XX века Ричард Фейнман призвал осваивать атомарный и молекулярный уровень при создании электронных устройств нового поколения. Вслед за этим в конце 70-х годов известный ученый Картер разработал концепцию создания молекулярных электронных устройств. Он предложил использовать органические молекулы как базовые элементы при конструировании логических схем компьютеров, работающих на принципах фон Неймана, тем самым заложив основы молекулярной электроники.

В статьях и обзорных публикациях последних 10 лет отражены усилия, предпринятые по созданию молекулярных устройств на принципах, заложенных в основном Картером. В этих работах объективно и детально освещены важнейшие этапы в развитии молекулярной электроники, вскрыты проблемы, стоящие на пути ее развития. За последнее десятилетие предприняты серьезные усилия по созданию молекулярных электронных устройств. Получены и исследованы чрезвычайно интересные молекулярные системы, обладающие определенными функциональными свойствами. Развита технология самосборки молекулярных систем и методы их исследования.

Однако наряду с несомненными успехами в данной области выявлен ряд проблем, заложенных в самой концепции создания молекулярных устройств. В ряде обзорных работ отмечается, что общепринятый анализ работы молекулярного устройства в терминах линейной суперпозиции отдельных его элементов представляется необоснованным. Этот подход фактически дублирует на молекулярном уровне схемотехнические решения, разработанные в процессе развития полупроводниковой микроэлектроники при конструировании компьютеров неймановского типа. Подобный подход существенно сужает потенциальные возможности молекулярной электроники. Основная цель

молекулярной электроники — не просто замена базовых полупроводниковых элементов, а решение тех проблем, которые не решаются традиционным способом. Авторы обзоров небезосновательно ставят во главу угла проблему разработки новой парадигмы конструирования молекулярного компьютера.

Действительно, концепция развития молекулярной электроники путем замены полупроводниковых элементов на их молекулярные аналоги притягательна с точки зрения дальнейшей миниатюризации, но оставляет мало шансов на создание реальных молекулярных устройств в ближайшее время. При таком подходе (использование бинарных сигналов и последовательных вычислений) отбрасывается возможность создания квантовых компьютеров и нейрокомпьютеров с параллельными вычислениями, использующих аналоговые сигналы. А именно в этих направлениях можно ожидать в ближайшее время появления новых прорывных информационных технологий, в частности, базирующихся на молекулярной технологии.

Однако вопрос о стратегии создания молекулярного компьютера остается открытым и требует дальнейшей разработки. От правильности выбора стратегии в значительной мере зависят и успехи в данной области. Несмотря на существующие проблемы, связанные с разработкой компьютера на принципах "идеальной молекулярной электроники", активно развиваются параллельные области исследований по использованию молекулярных материалов: фотоактивные полимеры, электролюминесцентные экраны, молекулярные транзисторы, химические сенсоры. Интенсивно продолжается работа по решению проблемы использования в электронике молекулярных материалов и физических эффектов, возникающих на уровне одиночной молекулы.

Таким образом, в настоящее время речь может идти о развитии функциональной молекулярной электроники по типу жидкокристаллических дисплеев. Стратегическим моментом предлагаемого нами подхода является концентрация усилий не на уменьшение топологического размера элемента, а на увеличение его функциональных возможностей. Для развития этого направления, которое базируется в основном на использовании свойств тонких пленок, необходимо освоение технологий их получения и контроля.

В дальнейшем будут отдельно рассмотрены перспективы использования фотоактивных полимеров, электролюминесцентных экранов, молекулярных транзисторов и химических сенсоров, а также вопросы технологии их получения.

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

ИНФОРМАЦИЯ

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ИНВЕСТИЦИЙ"

"Молекулярная медицина"

12—14 сентября 2001 г.

г. Пушкино, Московская область

Первое информационное сообщение

Министерство промышленности, науки и технологий Российской Федерации, Министерство внешнеэкономических связей правительства Московской области, Отделение физико-химической биологии Российской академии наук, Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), Институт биоорганической химии им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН (ИБХ РАН) и Инкубатор биотехнологий (г. Пушкино) сообщают о проведении VI Международной конференции из цикла "Результаты фундаментальных исследований для инвестиций", которая состоится с 12 по 14 сентября 2001 в г. Пушкино Московской области на базе Филиала Института биоорганической химии им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН.

Цель конференции — предоставление потенциальным инвесторам результатов исследований в молекулярной медицине и биотехнологии, включая результаты фундаментальных исследований по грантам РФФИ, перспективных для коммерциализации и практического использования в медицине и здравоохранении.

На семинаре будут представлены результаты исследований по следующим направлениям:

- генно-инженерные и биотехнологические подходы к созданию новых средств диагностики;
- методы генной терапии;
- современные терапевтические препараты и средства для лечения и профилактики кардиологических, эндокринных, опухолевых заболеваний, вирусных и бактериальных инфекций.

Председатель Оргкомитета — акад. А. И. Мирошников, сопредседатели Программного комитета — член-корр. С. Н. Кочетков и член-корр. В. А. Ткачук.

В представленных и отобранных Оргкомитетом конференции докладах будут отражены актуаль-

ность, новизна и значимость научных идей, положенных в основу проекта, а также предложена экономически обоснованная возможность практической реализации результатов фундаментальных разработок.

К работе в конференции будут приглашены представители научно-исследовательских учреждений России, Российской академии наук, Министерства промышленности, науки и технологий РФ, отраслевых министерств и ведомств, а также представители отечественных и зарубежных инвестиционных фондов и коммерческих фирм, заинтересованных в коммерциализации научных разработок, освоении и внедрении в практику здравоохранения новых подходов в диагностике и терапии опасных заболеваний человека, новых технологий производства современных терапевтических и диагностических средств.

Условия участия в конференции

Предварительные заявки на участие в работе Международной конференции по прилагаемой регистрационной форме необходимо отправить до 1 мая 2001 года:

- по адресу: 117997 ГСП, Москва, В-437, ул. Миклухо-Маклая, 16/10 Институт биоорганической химии РАН, "Молекулярная медицина"
- по электронной почте, mis@ibch.ru
- факсом: (095) 330-74-10, 330-73-29.

Регистрационный взнос для участия в работе семинара/составляет:

- для российских участников 300 руб.;
- для зарубежных участников 300 долл. США.

Регистрационный взнос включает: оплату издания тезисов конференции, информационных материалов и оплату услуг переводчика.

Докладчики работ, рекомендованных Оргкомитетом для представления на конференции, освобождаются от уплаты регистрационного взноса.

Дополнительная информация и предварительная программа конференции будет изложена во втором информационном сообщении.

Программа конференции и необходимые для предварительной работы информационные материалы будут высланы участникам, приславшим регистрационную форму и оплатившим оргвзнос до 1 августа 2001 г.

Информацию о конференции можно получить у ученого секретаря семинара по телефону: (095) 330-73-29 или по e-mail: mis@ibch.ru