

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 538.971.621.739

В. Г. Мокеров, член-корр. РАН, **Ю. В. Федоров**,
Л. Э. Великовский, **М. Ю. Щербакова**,
Институт радиотехники и электроники РАН

ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРНОГО ТРАНЗИСТОРА НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

Исследованы модулированно-легированные гетероструктуры N-AlGaAs/GaAs/InAs/GaAs/InAs/GaAs с квантовыми точками, встроенными в "токовый" канал GaAs, и изучены характеристики транзисторов на их основе. Показано, что подвижность μ_{2D} и концентрация n_{2D} двумерных электронов значительно изменяются (уменьшаются) из-за наличия квантовых точек в приборном канале. Вольт-амперные характеристики этих гетероструктур в сильных электрических полях проявляют аномальную "двухступенчатую" форму, обусловленную вкладами квантовых точек в протекание тока от двух типов электронных состояний: от подвижных двумерных электронов и электронов, локализованных на квантовых точках. В отличие от всех ранее известных модулированно-легированных полевых транзисторов транзисторы на квантовых точках демонстрируют принципиально новый тип приборов на "горячих" электронах, представляющийся перспективным для высокочастотных применений.

Введение

Полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми точками (КТ), часто рассматриваемыми как искусственные атомы, привлекают большой интерес, как научный, так и практический. Наиболее перспективная технология их получения базируется на гетероэпитаксиальном росте по механизму Странски—Крастанова, при котором эпитаксиальный слой формируется на подложке, не согласованной с ним по параметрам решетки, и КТ возникают при толщине слоя, превышающей некоторое критическое значение [1—3]. Хотя в последние годы было выполнено много работ по изучению структурных и оптических свойств КТ, однако до сих пор мало известно об исследованиях электронного транспорта в этих системах, особенно в сильных электрических полях. Отсутствуют данные и по транзисторам на КТ.

В настоящей статье представлены исследования оптических и транспортных свойств двумерных электронов в модулированно-легированных гетероструктурах N-AlGaAs/GaAs/InAs/GaAs/InAs/GaAs с КТ InAs, встроенными в приборный канал, а также впервые исследованы характеристики транзисторов на их основе.

Молекулярно-лучевая эпитаксия модулированно-легированных гетероструктур с КТ

Исследованы два типа гетероструктур с КТ (*S1* и *S2*), выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на полуизолированной подложке GaAs (100). Их поперечное сечение схематически изображено на рис. 1. Оно включает нелегированный буферный слой GaAs толщиной 0,5 мкм, два очень тонких слоя InAs, разделенных нелегированным "спейсер"-слоем GaAs. Для образцов *S1* толщина слоев InAs составляла 1,07 нм, а "спейсер"-слоя GaAs — 5,6 нм. Для образцов *S2* эти толщины были 0,7 и 3,7 нм соответственно.



Рис. 1. Поперечное сечение модулированно-легированных гетероструктур с квантовыми точками

В обоих случаях формировались два слоя КТ с различными размерами и плотностью. Затем, после выращивания второго "спейсер"-слоя GaAs с толщинами 5,6 и 3,7 нм для образцов *S1* и *S2* соответственно, выращивались нелегированный "спейсер"-слой $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ толщиной 10 нм, $\delta(\text{Si})$ -легированный слой и нелегированный барьерный слой $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ толщиной 35 нм. Формирование гетероструктур завершалось выращиванием нелегированного слоя GaAs толщиной 6 нм и легированного кремнием $n+(3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3})$ контактного слоя GaAs толщиной 40 нм. В качестве образцов сравнения (*SR*) были выращены псевдоморфные напряженные гетероструктуры $\text{AlGaAs}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ без КТ, но с той же средней мольной долей In ($y = 0,17$) и толщиной слоя $\text{In}_{0,17}\text{Ga}_{0,83}\text{As}$ 12 нм.

Оптические и электрические свойства гетероструктур с КТ

На рис. 2 показана фотография поверхности образца *S1*, сделанная на атомно-силовом микроскопе. Для этого образца МЛЭ-рост был завершен сразу после осаждения второго слоя InAs. На рис. 2 видно, что средний размер КТ и плотность их расположения составляют ~ 40 нм и $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Формирование КТ в образцах *S1* и *S2* было также подтверждено и измерениями спектров фотолуминесценции (ФЛ) при $T = 77$ К. Для этих образцов наблюдались характерные для КТ широкие полосы ФЛ при энергиях фотонов ($h\nu$) 1,27 и 1,25 эВ соответственно. Вместе с тем в образце *SR*, где нет КТ, в спектре ФЛ вместо широкой полосы наблюдались две узкие линии (при $h\nu_1 = 1,356$ эВ и $h\nu_2 = 1,400$ эВ), характерные для модулированно-легированных квантовых ям и соответствующие оптическим переходам между двумя запол-

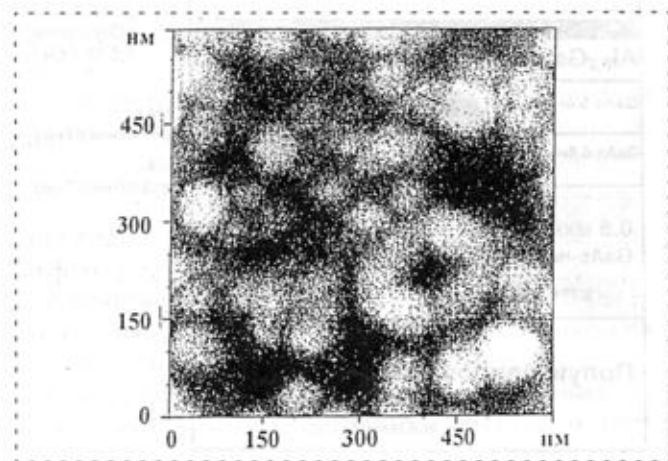


Рис. 2. Фотография поверхности образца *S1*, выполненная на атомно-силовом микроскопе

Результаты Холловских измерений μ_{2D} и n_{2D}

Образцы	$\mu_{2D}, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		$n_{2D}, \text{см}^{-2}$	
	77 К	300 К	77 К	300 К
<i>SR</i>	10108	4500	$8,2 \cdot 10^{11}$	$9 \cdot 10^{11}$
<i>S1</i>	3000	2852	$1 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{10}$
<i>S2</i>	1500	1000	$8,3 \cdot 10^{11}$	$8,05 \cdot 10^{11}$

ненными электронными подзонами и дырочными состояниями [4–5].

В таблице приведены результаты Холловских измерений подвижности μ_{2D} и плотности n_{2D} двумерных электронов в различных образцах. Из таблицы следует, что введение КТ в приборный канал (образцы *S1* и *S2*) приводит к уменьшению электронной подвижности μ_{2D} и к существенному снижению электронной концентрации n_{2D} в образце *S1* по сравнению с образцом сравнения *SR*. В образцах *S1*, очевидно, имеет место захват большинства электронов на глубокие уровни КТ. В образцах *S2*, выращенных с меньшим количеством осажденного InAs, латеральные размеры КТ могут быть меньше, а их электронные уровни, соответственно, менее глубокими. В результате меньшее число электронов может захватываться этими КТ. Более низкие по сравнению с образцом *SR* значения электронной подвижности в образцах *S1* и *S2* являются прямым указанием на то, что введение КТ InAs в приборный канал приводит к формированию специфических потенциалов, эффективно рассеивающих двумерные электроны. Захваченные на КТ электронные заряды и упругие напряжения, возникающие вокруг каждой КТ, могут быть ответственны за эти рассеивающие потенциалы.

Электронный транспорт в гетероструктурах с КТ в сильных электрических полях

Если часть двумерных электронов в образцах *S1* и *S2* (особенно в *S1*) захватывается КТ, то они, естественно, не могут участвовать в низкополевым электронном транспорте. Однако, если это действительно так, то их вклады должны проявиться в сильных электрических полях в результате индуцированной полем эмиссии электронов из КТ. Для проведения таких экспериментов на образцах *S1* и *S2* были изготовлены специальные транзисторные структуры, такие же, как и изображенные на рис. 1, но без затворов. Расстояние между омическими контактами истока и стока в них составляло 2 мкм. На рис. 3 приведены их вольт-амперные (ВАХ) характеристики. Как видно на рис. 3, ВАХ гетероструктур с КТ, в отличие от кривых с насыщением для "классических" структур полевых транзисторов,

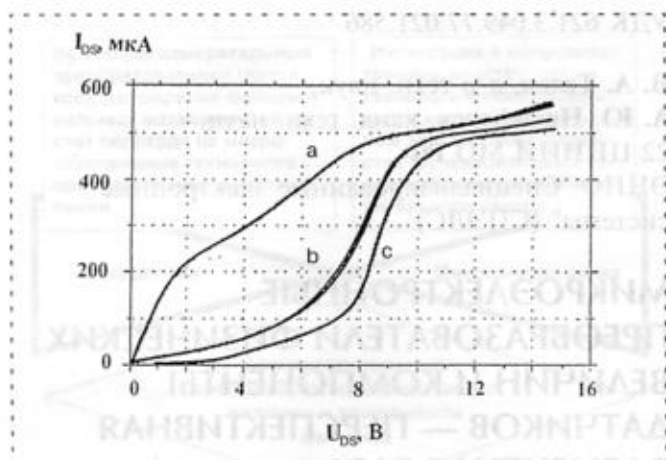


Рис. 3. ВАХ гетероструктур с квантовыми точками (образец $S1$) в сильных электрических полях при расстоянии между стоком и истоком $d = 2$ мкм:

a — для исходного образца; b и c — после дополнительного травления его поверхностного слоя

имеют аномальную "двухступенчатую" форму. Две ступеньки на этих ВАХ объясняются вкладами от двух различных типов электронных состояний: подвижных двумерных электронов (как в стандартных полевых транзисторах), ответственных за первую ступеньку, соответствующую насыщению их дрейфовой скорости, и электронов, локализованных на КТ. Последние ответственны за вторую ступеньку. Они дают вклад в электронный транспорт только в сильных электрических полях E , превышающих некоторое пороговое поле $E_{пор}$, в результате эмиссии электронов из КТ, индуцированной этими полями. Как видно на рис. 3 (кривые b и c), при сокращении расстояния между поверхностью образца и каналом транзистора (путем стравливания некоторого поверхностного слоя) происходит уменьшение силы тока в области первой ступеньки или даже полное его исчезновение. Это, очевидно, обусловлено обеднением канала подвижными носителями за счет усиления эффекта воздействия поверхностного потенциала. При этом из-за наличия только второй ступеньки ВАХ приобретает отчетливо пороговый характер.

Характеристики транзисторов на модулированно-легированных гетероструктурах с КТ

На основе образцов гетероструктур $S1$ и $S2$ были изготовлены полевые транзисторы с длиной затворов от 0,3 до 0,4 мкм (см. рис. 1) ВАХ этих транзисторов показаны на рис. 4. Как видно, приложение даже нулевого смещения к затвору приводит к существенному сдвигу второй токовой ступеньки к более низким значениям напряжений по сравнению с "беззатворными" приборами. Этот эффект

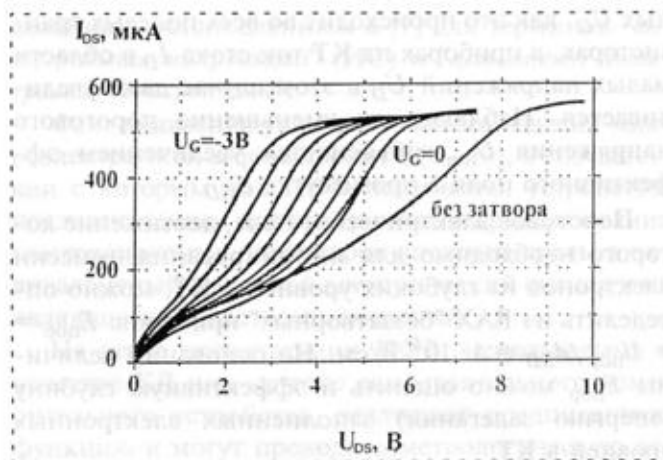


Рис. 4. ВАХ гетероструктурных транзисторов на квантовых точках с длиной затвора $L_G = 0,35$ мкм при различных значениях напряжения на затворе U_G ; дискретность (шаг) изменения U_G при переходе от одной кривой к другой составляет $-0,5$ В

может быть объяснен перераспределением электрического поля в приборном канале. Действительно, поскольку большинство электронов в образцах $S1$ локализовано на глубоких уровнях в КТ, их концентрация должна слабо управляться напряжением на затворе. В соответствии с этим распределение потенциала вдоль длины затвора должно сохраняться постоянным. В этом случае, большая часть напряжения, приложенного между стоком (D) и истоком (S), должна падать только на промежутке d_{GD} между стоком и ближайшим к нему краем затвора. Поскольку расстояние d_{GD} меньше, чем расстояние между стоком и истоком d_{SD} , электрическое поле в реальной рабочей области (т. е. в промежутке d_{GD}) должно быть больше, чем среднее электрическое поле в "беззатворном" приборе. Поэтому пороговое напряжение $U_{пор}$ должно уменьшиться по сравнению с "беззатворными" приборами. Из рис. 4 также следует, что сила тока насыщения $I_{нас}$ для второй ступеньки практически не зависит от напряжения на затворе U_G , однако пороговое напряжение $U_{пор}$ для этой ступеньки очень эффективно управляется напряжением U_G . Эти характеристики принципиально отличаются от характеристик "классических" полевых транзисторов, для которых лишь электронная плотность и соответственно токи насыщения управляются напряжением U_G . Таким образом, данные на рис. 4 показывают, что в исследуемых транзисторах концентрация электронов, участвующих в транспорте при сильном поле, не зависит от U_G , тогда как пороговое напряжение $U_{пор}$, необходимое для эмиссии электронов из КТ, уменьшается, когда U_G становится более отрицательным. Таким образом, вместо "запирания" транзистора при отрицатель-

ных U_G , как это происходит во всех полевых транзисторах, в приборах на КТ ток стока I_D в области малых напряжений U_D в этом случае даже увеличивается. Наблюдаемое уменьшение порогового напряжения $U_{пор}$ объясняется увеличением эффективного поля в промежутке d_{GD} .

Пороговое электрическое поле, достижение которого необходимо для инициирования эмиссии электронов из глубоких уровней в КТ, можно определить из ВАХ "беззатворных" приборов: $E_{пор} = U_{пор}/d_{SD} = 4 \cdot 10^4$ В/см. На основании величины $E_{пор}$ можно оценить и эффективную глубину (энергию залегания) заполненных электронных уровней в КТ:

$$E_{КТ} = eE_{пор}d_{КТ} = 160 \text{ мэВ}, \quad (1)$$

где $d_{КТ} = 40$ нм — латеральный размер КТ. Из кривых, приведенных на рис. 4, была определена также максимальная удельная крутизна g_m исследуемых транзисторов в области малых напряжений U_D , т. е. там, где токи I_D управляются смещением на затворе U_G : $g_m \approx 500 \text{ мСм/мм}$. При этом следует ожидать, что рабочая емкость этих транзисторов невелика. Достаточно большая крутизна и предполагаемая малая емкость этих приборов дают основания рассматривать их весьма перспективными для высокочастотных применений.

В заключение отметим, что исследованные транзисторы на модулированно-легированных гетероструктурах с КТ принципиально отличаются от всех известных полевых транзисторов (например, НЕМТ). Необычность их характеристик обусловлена тем, что носителями тока в них являются "горячие" электроны, т. е. электроны, имеющие энергию, большую глубины залегания заполненных электронных состояний в КТ. Поэтому их можно рассматривать как новый тип приборов на "горячих" электронах. Ввиду высокой крутизны и малой емкости эти приборы могут оказаться очень перспективными для высокочастотных применений.

Список литературы

1. Leonard D., Pond K. and Petroff P. M. Phys. Rev., 1994, Vol. B50, N 16. P. 11687—11692.
2. Moison J. M., Houzay F., Barthe F., Leprince L., Andre E., Vatel O. Appl. Phys. Lett., 1994, Vol. 64, N 2. P. 196—198.
3. Solomon G. S., Trezza J. A., Harris J., Jr. Appl. Phys. Lett., 1995, Vol. 66, N 23. P. 3161—3163.
4. Pozela J., Jucine V., Namajinas A., Pozela K., Mokerov V. G., Fedorov Yu. V., Kaminskii V. E., Hook A. V., J. Appl. Phys., 1997, Vol. 32, N 1. P. 5564—5567.
5. Мокеров В. Г., Федоров Ю. В., Гук А. В., Хабаров Ю. В. ДАН, 1998. Т. 362, № 3. С. 335—338.

УДК 621.3.049.77.021.586

В. А. Телец, д-р техн. наук,
А. Ю. Никифоров, канд. техн. наук,
22 ЦНИИ МО РФ,
ЭНПО "Специализированные электронные
системы" (СПЭЛС)

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И КОМПОНЕНТЫ ДАТЧИКОВ — ПЕРСПЕКТИВНАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Интеграционные процессы в микроэлектронике привели к формированию нового класса функционально сложных изделий — преобразователей физических (физико-химических) величин и компонентов датчиков, который восполнил недостающее звено в классификаторе группы однородной продукции "микросхемы интегральные".

Уникальность изделий этого класса состоит в том, что в них могут быть конструктивно-технологически объединены все основные функциональные элементы электронного канала информационно-измерительной системы: от чувствительного элемента на входе схемы до усилителя, аналого-цифрового преобразователя, микропроцессора в тракте обработки информации и исполнительного устройства на выходе.

На фоне конструктивно-технологических достижений в области электронной техники последних лет и связанных с ней измерительных и вычислительных средств оказались не так заметны результаты двух важных эволюционных процессов, произошедших на стыке метрологии и микроэлектроники.

Один из этих процессов непосредственно связан с результатами эволюции измерительных преобразователей или датчиков [1, 2] в направлении их структурного усложнения, расширения функциональных возможностей и решаемых технических задач за счет перехода на перспективную элементную базу микроэлектроники, а также на новые технологии проектирования и производства (рис. 1).

Другой эволюционный процесс является результатом интеграционных процессов в микроэлектронике, которые открыли принципиальные возможности конструктивно-технологического объединения в законченном электронном устройстве всех основных функциональных узлов измерительно-информационного канала (рис. 2) [3]:

- чувствительных элементов (ЧЭ), воспринимающих измеряемую физическую (химическую) величину и осуществляющих ее первичное преобразование в электрические сигналы;

ных U_G , как это происходит во всех полевых транзисторах, в приборах на КТ ток стока I_D в области малых напряжений U_D в этом случае даже увеличивается. Наблюдаемое уменьшение порогового напряжения $U_{пор}$ объясняется увеличением эффективного поля в промежутке d_{GD} .

Пороговое электрическое поле, достижение которого необходимо для инициирования эмиссии электронов из глубоких уровней в КТ, можно определить из ВАХ "беззатворных" приборов: $E_{пор} = U_{пор}/d_{SD} = 4 \cdot 10^4$ В/см. На основании величины $E_{пор}$ можно оценить и эффективную глубину (энергию залегания) заполненных электронных уровней в КТ:

$$E_{КТ} = eE_{пор}d_{КТ} = 160 \text{ мэВ}, \quad (1)$$

где $d_{КТ} = 40$ нм — латеральный размер КТ. Из кривых, приведенных на рис. 4, была определена также максимальная удельная крутизна g_m исследуемых транзисторов в области малых напряжений U_D , т. е. там, где токи I_D управляются смещением на затворе U_G : $g_m \approx 500 \text{ мСм/мм}$. При этом следует ожидать, что рабочая емкость этих транзисторов невелика. Достаточно большая крутизна и предполагаемая малая емкость этих приборов дают основания рассматривать их весьма перспективными для высокочастотных применений.

В заключение отметим, что исследованные транзисторы на модулированно-легированных гетероструктурах с КТ принципиально отличаются от всех известных полевых транзисторов (например, НЕМТ). Необычность их характеристик обусловлена тем, что носителями тока в них являются "горячие" электроны, т. е. электроны, имеющие энергию, большую глубины залегания заполненных электронных состояний в КТ. Поэтому их можно рассматривать как новый тип приборов на "горячих" электронах. Ввиду высокой крутизны и малой емкости эти приборы могут оказаться очень перспективными для высокочастотных применений.

Список литературы

1. Leonard D., Pond K. and Petroff P. M. Phys. Rev., 1994, Vol. B50, N 16. P. 11687—11692.
2. Moison J. M., Houzay F., Barthe F., Leprince L., Andre E., Vatel O. Appl. Phys. Lett., 1994, Vol. 64, N 2. P. 196—198.
3. Solomon G. S., Trezza J. A., Harris J., Jr. Appl. Phys. Lett., 1995, Vol. 66, N 23. P. 3161—3163.
4. Pozela J., Jucine V., Namajinas A., Pozela K., Mokerov V. G., Fedorov Yu. V., Kaminskii V. E., Hook A. V., J. Appl. Phys., 1997, Vol. 32, N 1. P. 5564—5567.
5. Мокеров В. Г., Федоров Ю. В., Гук А. В., Хабаров Ю. В. ДАН, 1998. Т. 362, № 3. С. 335—338.

УДК 621.3.049.77.021.586

В. А. Телец, д-р техн. наук,
А. Ю. Никифоров, канд. техн. наук,
22 ЦНИИ МО РФ,
ЭНПО "Специализированные электронные
системы" (СПЭЛС)

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И КОМПОНЕНТЫ ДАТЧИКОВ — ПЕРСПЕКТИВНАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Интеграционные процессы в микроэлектронике привели к формированию нового класса функционально сложных изделий — преобразователей физических (физико-химических) величин и компонентов датчиков, который восполнил недостающее звено в классификаторе группы однородной продукции "микросхемы интегральные".

Уникальность изделий этого класса состоит в том, что в них могут быть конструктивно-технологически объединены все основные функциональные элементы электронного канала информационно-измерительной системы: от чувствительного элемента на входе схемы до усилителя, аналого-цифрового преобразователя, микропроцессора в тракте обработки информации и исполнительного устройства на выходе.

На фоне конструктивно-технологических достижений в области электронной техники последних лет и связанных с ней измерительных и вычислительных средств оказались не так заметны результаты двух важных эволюционных процессов, произошедших на стыке метрологии и микроэлектроники.

Один из этих процессов непосредственно связан с результатами эволюции измерительных преобразователей или датчиков [1, 2] в направлении их структурного усложнения, расширения функциональных возможностей и решаемых технических задач за счет перехода на перспективную элементную базу микроэлектроники, а также на новые технологии проектирования и производства (рис. 1).

Другой эволюционный процесс является результатом интеграционных процессов в микроэлектронике, которые открыли принципиальные возможности конструктивно-технологического объединения в законченном электронном устройстве всех основных функциональных узлов измерительно-информационного канала (рис. 2) [3]:

- чувствительных элементов (ЧЭ), воспринимающих измеряемую физическую (химическую) величину и осуществляющих ее первичное преобразование в электрические сигналы;



Рис. 1. Взаимное влияние средств измерений и изделий микроэлектроники

- устройств коммутации и нормализации сигналов — аналоговых мультиплексоров или аналоговых ключей и коммутаторов, устройств выборки и хранения (УВХ), операционных и измерительных усилителей, фильтров и др.;
- аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и компараторов напряжения (КН — как одноразрядных АЦП) как устройств вторичного преобразования аналоговых сигналов в эквивалентный им цифровой код;
- микропроцессорных (МП) средств цифровой обработки сигналов и схем обрамления — цифровых и логических схем, запоминающих устройств различных классов (ЗУ);
- цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) для обратного преобразования цифровой информации в аналоговые сигналы;
- устройств вывода и распределения результирующих сигналов — устройств выборки и хранения, аналоговых коммутаторов-демультиплексоров — на актюаторы или другие исполнительные устройства (микросопла, поршни, двигатели, гироскопы, акселерометры и др.).

Таким образом, интеграционные технологические процессы в микроэлектронике привели к формированию нового класса изделий — преобразователей физических (физико-химических) величин и компонентов датчиков (ПФВ и КД) [4, 5], которые восполнили недостающее звено в классификаторе групп однородной продукции "микросхемы интегральные" [6].

Совокупность конструктивно-технологических и функциональных особенностей микроэлектронных ПФВ и КД в полной мере соответствует опре-

делениям, установленным в [7] для терминов "интегральная микросхема" (ИС) и "компонент интегральной микросхемы".

Факт появления указанного класса изделий микроэлектроники зафиксирован в [8—10], в соответствии с которым под ПФВ понимается устройство, предназначенное для восприятия и преобразования контролируемых параметров внешней среды в эквивалентный выходной электрический сигнал и не являющееся средством измерений.

На этапе эксплуатации ПФВ, используемые в качестве КД или другого самостоятельного измерительного устройства, реализуют предписанную функцию и могут проходить метрологическую аттестацию и калибровку по установленным в документации на поставку (техническим условиям) характеристикам преобразования (точностным параметрам).

В области средств измерений ПФВ и КД обеспечивают переход к так называемым "интеллектуальным" датчикам.

В области микроэлектроники появление ПФВ и КД свидетельствует о переходе от традиционных

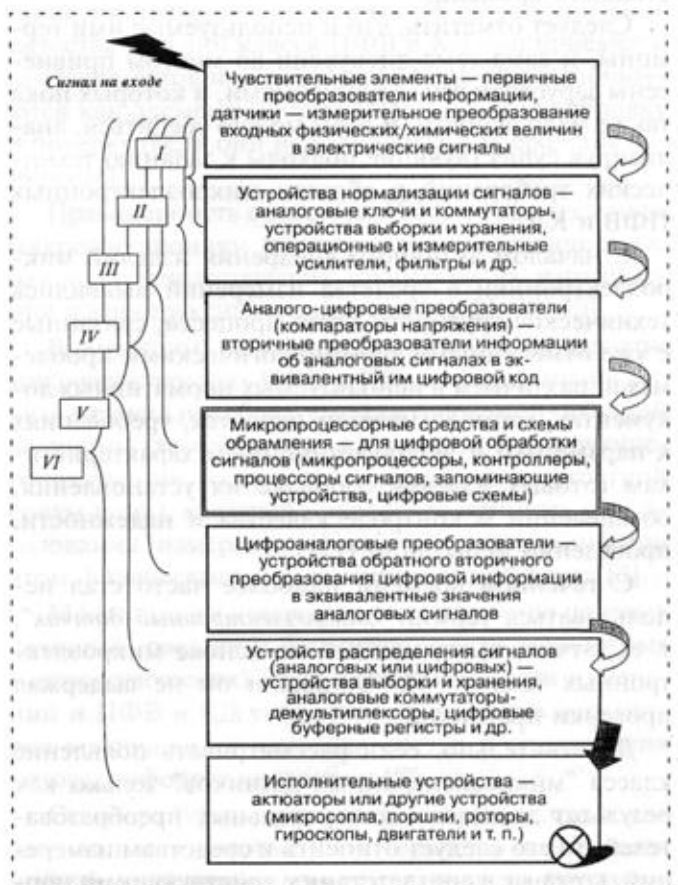


Рис. 2. Структура информационно-измерительного канала: I—VI — возможные варианты функционального построения преобразователей физических величин и компонентов датчиков

технологий, архитектур, алгоритмов, материалов и компонентов к комплексированным технологиям, новым физическим эффектам, "интеллектуализации" функциональных элементов и узлов, а в итоге — **к формированию элементной базы микросистемной техники.**

Уникальность микроэлектронных ПФВ и КД обусловлена не только особенностями их функционального построения, но и алгоритмическими, схемотехническими и конструктивно-технологическими новациями.

Появление в начале 90-х годов технических прообразов микроэлектронных ПФВ и КД вызвало в среде специалистов в области метрологии и датчикоостроения терминологические дискуссии, возникающие по мере вхождения в обращение разнообразных и быстро приживающихся в технической литературе терминов-синонимов ("микроэлектронный датчик", "интеллектуальный датчик", "сенсор", "смарт-сенсор", "чувствительный элемент датчика" и др.).

Судя по последним отечественным публикациям [11], проблема с терминологией остается нерешенной в указанной среде специалистов до настоящего времени.

Следует отметить, что и используемые ими термины, и сама тема дискуссии во многом привнесены зарубежными публикациями, в которых пока также мало ясности. В этом можно убедиться, анализируя существующие подходы к заданию технических требований в области микроэлектронных ПФВ и КД.

С началом активного внедрения изделий микроэлектроники в средства измерений выявились технические трудности этого процесса, связанные с уже отмеченными терминологическими проблемами, различием в используемых нормативных документах, метрологических аспектах, требованиях к параметрам и эксплуатационным характеристикам готовых изделий, порядке их установления, обеспечении и контроле качества и надежности, проведении испытаний [12].

С течением времени наиболее часто стал использоваться термин "микроэлектронный датчик", т. е. датчик, выполненный на основе микроэлектронных технологий. Однако и он не выдержал проверки практикой.

Действительно, если рассматривать появление класса "микроэлектронных датчиков" только как результат эволюции измерительных преобразователей, то его следует относить к средствам измерений, которые в соответствии с действующими нормативными документами [13] подлежат метрологической аттестации (калибровке). Эта процедура в целом хорошо отработана и осуществляется, как

правило, предприятиями-изготовителями или потребителями датчиков. Специфика метрологической аттестации (калибровки) такова, что датчики индивидуально или в составе партии однотипных образцов аттестуются метрологически в строгой увязке с конкретной технической задачей.

Очевидно, что такая традиционная практика соответствует только ранним этапам технического развития датчиков или справедлива по отношению к определенным их классам, которые характеризуются следующим:

- несовершенство технологии проектирования и изготовления и, как следствие, низкий уровень воспроизводимости от образца к образцу в составе партии вызывают необходимость компенсации разбросов основных параметров и метрологических характеристик путем индивидуальной подгонки до требуемых норм;
- низкая производительность процедуры индивидуальной подгонки и метрологической аттестации (калибровки) еще приемлема ввиду того, что потребность в датчиках при решении конкретных технических задач ограничена и обеспечивается малосерийным производством.

Внедрение же массовых микроэлектронных технологий гарантирует воспроизводимость параметров и характеристик изделий от образца к образцу. Сколь бы функционально сложными не были современные измерительные преобразователи — датчики, они могут быть выполнены на основе базового, модифицированного или специального технологических процессов микроэлектроники.

Тем самым обеспечивается универсальность их применения за счет единства технических требований, системы обеспечения качества надежности, состава и методов испытаний.

Но вместе с тем нормативная база проектирования и производства изделий микроэлектроники не предполагает их калибровки, как это принято для средств измерений.

До недавнего времени предприятия-изготовители прототипов микроэлектронных ПФВ и КД, не аттестованные для проведения калибровки изготавливаемых изделий как средств измерений, находились в затруднительном положении, поскольку термины, определения, системы параметров и другие аспекты в сферах метрологии и микроэлектроники не были взаимосвязаны и стандартизованы.

В связи с этим можно утверждать, что появление ПФВ и КД как нового класса изделий микроэлектроники было логически предопределено и стало в известном смысле техническим компромиссом в указанных выше областях электронной техники. В основу этого компромисса положены:

- единство структурных схем и составов функциональных элементов измерительного и информационного каналов;
- идентичность операций по вводу, преобразованию, обработке и выводу информации измерительного и информационного каналов;
- возможность выбора идентичных параметров-критериев для оценки характеристик измерительного и информационного каналов, связанных с их производительностью (быстродействием, числом параллельных каналов) и потерями информации (погрешностями преобразования, измерения);
- возможность сочетания универсальности и особенностей применения, перспективность.

Действительно, какими бы функционально и технологически сложными не были микроэлектронные ПФВ и КД (например, за счет размещения в одном или нескольких кристаллах и изготовления в едином конструктивном исполнении ЧЭ, УВХ, КН и других аналоговых схем, АЦП и ЦАП, ЗУ, микропроцессоров и др.), они реализуют целевую функцию — измерительное преобразование. Качество ее выполнения оценивается уровнем технических и, прежде всего, точностных (или метрологических) параметров и характеристик канала информационно-измерительной системы (ИИС) в целом и его функциональных составляющих.

Поэтому микроэлектронные ПФВ и КД можно определить как изделия:

- самостоятельные с точки зрения выполнения предписанной функции, технических требований, испытаний, приемки, поставки, эксплуатации;
- не требующие метрологической аттестации (калибровки и поверки, за исключением случаев применений в качестве измерительных средств);
- осуществляющие функцию измерительного преобразования в условиях внешних воздействующих факторов.

Технический статус ПФВ и КД, как самостоятельного класса электронных приборов, подтверждается наличием единых классификационных признаков (функциональный состав, назначение) и возможностью сведения в единую систему терминов и определений, параметров и характеристик, принципов и порядка задания технических требований.

Обоснование технического статуса микроэлектронных ПФВ и КД потребовало их одновременной идентификации как в государственной системе промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП — в части соответствия общим техническим условиям на средства измерений и управляющей вычислительной техники [14]), так и в государственной системе стандартов на изделия электронной техники (в части соответствия общим

техническим условиям на микросхемы интегральные [15]) (рис. 3, см. четвертую сторону обложки).

Установленное единство структуры и функционального состава ПФВ и КД [1, 3—5, 16, 17] позволило выявить общность технологических процессов изготовления и технических требований к ним и как к средствам измерений (КД), и как к элементам управляющей вычислительной техники — интерфейсам (ПФВ).

Особое значение имело установление общности у средств измерений и ПФВ и КД по наличию точностных характеристик.

Так, в соответствии с [14] по "метрологическим свойствам изделия подразделяются на средства измерения и на изделия, не являющиеся средствами измерений". При этом "изделия, не являющиеся средствами измерений, подразделяются на изделия, имеющие точностные характеристики, и на изделия, не имеющие точностных характеристик". Очевидно, что к первой группе изделий относятся ПФВ и КД, которые, обладая точностными (метрологическими) характеристиками, в общем случае не являются средствами измерений.

Наличие точностных (метрологических) характеристик позволяет проводить не только контроль качества изделий класса ПФВ и КД при приемке и поставке готовой продукции (если они используются как элементная база ИИС), но и калибровку и поверку (если они используются как средства измерений).

Правомерность отнесения ПФВ и КД к изделиям микроэлектроники подтверждается идентичностью базовых технологических процессов их изготовления и конструктивного исполнения [1, 18, 19].

Важнейшим классификационным признаком микроэлектронных ПФВ и КД, закрепленным в [8], является вид преобразуемой (измеряемой) входной величины (температуры, давления, ионизирующего излучения, состава воздушной и жидкостной среды и др.), который определяет принцип преобразования (измерения) и выбор используемого при этом физического или химического эффекта [3].

Можно также утверждать, что единство целевых функций, состава и физической сути точностных (метрологических) характеристик средств измерений и ПФВ и КД указывает на единство параметров-критериев их качества, состав и определения которых сформулированы в [9].

Стандарт [9] построен таким образом, что изложенная в нем совокупность терминов и определений образует основу для последующего формирования системы важнейших параметров и характеристик ПФВ и КД. Более того, эта система становится составной частью общей параметрической системы

[20], распространяющейся на всю группу однородной продукции "Микросхемы интегральные".

Таким образом, с одной стороны, достигнуто соответствие состава параметров и характеристик ПФВ и КД требованиям основополагающих стандартов в области метрологии, а с другой — имеется возможность оценки и контроля их качества в процессе проектирования и микроэлектронного производства.

Наличие у микроэлектронных ПФВ и КД унифицированной системы параметров и характеристик обусловило возможность проведения комплексной стандартизации для формирования типажа данного класса изделий [21], важной составляющей которого является выбор и обоснование состава определяющих параметров, наиболее полно характеризующих их функциональные и физические свойства.

Определяющие параметры могут быть отнесены к входным, выходным, статическим, динамическим, энергетическим, конструктивно-технологическим, эксплуатационным, экономическим [22, 23], которые описывают следующие характеристики.

Входные параметры — вид, форму, амплитуду и диапазон изменений входных сигналов, входные сопротивление и емкость, число каналов приема информации.

Выходные — вид, форму (аналоговую или цифровую), амплитуду, диапазон изменения, нагрузочную способность, число каналов распределения информации.

Статические — разрешающую способность (чувствительность), погрешности преобразования (отнесенные к статическим — основная, дополнительная, аддитивная, мультипликативная, аппроксимации, линейности и др.).

Динамические — быстродействие (время задержки прохождения сигнала через устройство), погрешности преобразования (отнесенные к динамическим — переходная и импульсная, от временной нестабильности и др.).

Энергетические — напряжения источников питания и опорных источников напряжения, сила тока потребления от указанных источников энергии, мощности рассеяния и потребления.

Конструктивно-технологические — вид исполнения (корпусное, бескорпусное, гибридно-модульное), значения статических потенциалов, связанных непосредственно с технологией исполнения и др.

Эксплуатационные — устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов (климатических — температуры, давления, влаги и т. п.; специальных — ионизирующих излучений и агрессивных сред; механических — вибраций, линейных

ускорений и т. п.; биологических — плесени, грибов; изменений значений питающих и опорных напряжений и др.).

Экономические — затраты на проектирование, серийное производство и эксплуатацию.

Принципы распространения на ПФВ и КД технических требований, регламентированных для интегральных микросхем по оценке и контролю качества, надежности, проведению испытаний, приемке и поставке (последняя редакция [15]), в общем виде сформулированы еще в [24].

Практика показала допустимость и целесообразность введения указанных технических требований для различных классов ПФВ и КД с учетом их классификационных особенностей, изложенных в дополнениях к нормативным документам вида "Общие технические условия" на микросхемы интегральные (корпусные, бескорпусные, гибридно-модульные) [22, 23]. Это означает, что на микроэлектронные ПФВ и КД могут и должны распространяться как общие технические требования к качеству, надежности (минимальная наработка, гамма-процентный ресурс, сохраняемость, порядок приемки, методы контроля, гарантии и др.) и радиационной стойкости, установленные для данной группы однородной продукции [25, 26], так и специальные требования, установленные в соответствующих дополнениях (рис. 4).

Это могут быть требования по устойчивости к воздействию механических, климатических, биологических и специальных факторов с учетом видов и диапазонов преобразуемых (измеряемых) и влияющих физических (химических) величин, а также видов конструктивно-технологического исполнения изделий и условий эксплуатации [10, 26].

Для конкретных классов (типов) ПФВ и КД состав подгрупп, виды, последовательности и режимы испытаний могут быть изменены, а отдельные

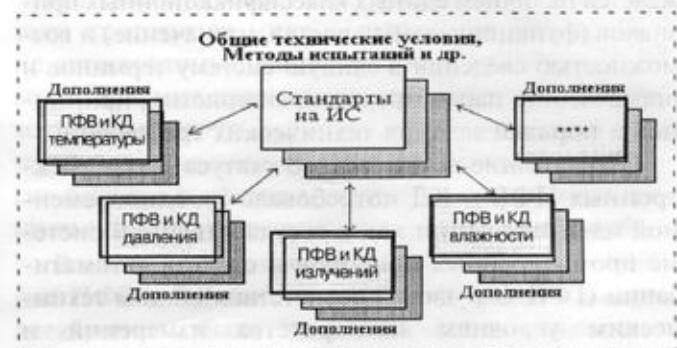


Рис. 4. Принцип формирования системы нормативных документов для микроэлектронных ПФВ и КД

виды испытаний — проводиться по специальным методам (методикам) [27—29].

В технически обоснованных случаях к ПФВ и КД в зависимости от видовых групп их исполнения и рабочих диапазонов входных и/или влияющих физических (химических) величин могут быть установлены иные требования по надежности (например, значения наработки до отказа), а также режимам и условиям эксплуатации (в том числе — облегченным).

К специальным техническим требованиям могут быть отнесены дополнительные условия защиты ПФВ и КД при эксплуатации в аппаратуре. К таким условиям, в частности, может относиться защита поверхности изделий лаковым покрытием. Тогда (например, для ПФВ и КД давления, влаги и др.) должны быть введены требования, исключющие нанесение лака в непосредственной близости или в зоне функциональных отверстий в корпусе. Во всех случаях защитные покрытия не должны оказывать влияния на чувствительность ПФВ и КД к входной преобразуемой (измеряемой) физической (химической) величине.

Исследования вариантов постановки и решения рассматриваемых технических задач в мировой практике позволили выявить косвенные примеры использования аналогичного методологического подхода, хотя число таких примеров невелико.

Так, в публикациях фирмы *Motorola Inc.* (США) [30, 31] без указания группы однородной продукции (но с оговорками о возможных критических замечаний по этому поводу) делается попытка формирования единых требований к характеристикам качества и надежности, методам и содержанию испытаний электронных датчиков давления, вводится стандартизованный состав их параметров.

Там же указывается на проблемы задания технических требований к электронным датчикам из-за отсутствия четкой их классификационной идентификации как изделий, отмечается разрозненность действующих стандартов (в медицине, автомобильной промышленности, военной технике и др.) и отсутствие общепромышленных основополагающих нормативных документов для кремниевых датчиков давления.

Специалисты фирмы *Motorola Inc.* в качестве нормативного документа, устанавливающего технические требования к электронным датчикам (в [30] — *sensor*) давления, используют стандарт MIL-STD-750, областью распространения которого являются дискретные полупроводниковые приборы.

Однако по их собственным оценкам этот стандарт не позволяет учитывать существующие различия между дискретными полупроводниковыми и

более сложными микроэлектронными приборами, к которым относятся электронные датчики давления, объединяющие в составе функциональной схемы ЧЭ и схемы нормализации сигнала о преобразованной входной физической величине.

При оценке качества электронных датчиков температуры фирмы *Analog Devices* (США) [32] уже используются отдельные положения стандартов MIL-M-38510 (общие технические условия) и MIL-STD-883 (методы испытаний), областью распространения которых являются изделия микроэлектроники. В частности, для технического описания изделий применена система параметров, близкая к системе параметров интегральных микросхем.

Однако и в этом случае была предпринята попытка локального решения проблемы, которое не направлено на получение результата в области стандартизации и унификации терминов и определений, системы параметров ПФВ и КД, требований к обеспечению их качества и надежности, методам испытаний.

Таким образом, с достаточной долей уверенности можно констатировать, что представленное выше обоснование необходимости формирования и развития нового класса изделий микроэлектроники — ПФВ и КД — и методологический подход к заданию для них технических требований являются в законченном виде сформулированной отечественной технической новацией.

На основании изложенного справедливыми представляются следующие выводы.

- Измерительная техника является одной из важнейших, но не единственной областью применения микроэлектронных ПФВ и КД, которые в общем случае не являются средствами измерений, а представляют собой элементную базу для их построения, равно как и для построения электронных устройств преобразования и обработки информации в составе ИИС.
- Конструктивно-технологические и схемотехнические достижения в области микроэлектроники обеспечивают реализацию в составе функциональных узлов ПФВ и КД различных электронных устройств (от чувствительных элементов на основе полупроводниковых приборов до функционально сложных аналоговых и аналого-цифровых схем, средств цифровой и вычислительной техники, исполнительных устройств — актюаторов).
- Совокупность функциональных и конструктивно-технологических особенностей микроэлектронных ПФВ и КД позволяет рассматривать этот перспективный класс изделий в качестве основы элементной базы микросистемной техники.

Список литературы

1. Чаплыгин Ю. А. Конструктивно-технологический базис микроэлектронных датчиков // Измерительная техника. 1994. № 11. С. 10—13.
2. Валиев К. А., Орликовский А. А. Технологии СБИС. Основные тенденции развития // Электроника: наука, технология, бизнес. 1996. № 5—6. С. 26—47.
3. Никифоров А. Ю., Подлепский Б. И., Телец В. А. Перспективы развития и особенности применения микроэлектронных компонентов датчиков в военной технике // Тез. докл. VII всероссийской научно-техн. конф. "Датчик—95". Т. 3. Гурзуф. 1995.
4. Критенко М. И., Телец В. А., Комаров Д. А. Микроэлектронные датчики — элементная база робототехники // Тез. докл. научно-техн. конф. "Микроэлектроника и информатика". Зеленоград. 1993.
5. Телец В. А., Гамкрелидзе С. А., Комаров Д. А. Интеллектуальные датчики как новый класс элементной базы нейронных систем // Тез. докл. научно-техн. конф. "Нейрокомпьютеры и их применение". Москва. 1996.
6. ОСВ 11 073.915. Микросхемы интегральные. Классификация и система условных обозначений. М.: ГУП ЦКБ "Дейтон". 1999.
7. ГОСТ 17021. Микросхемы интегральные. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов. 1988.
8. ОСТ 11.0941. Преобразователи физических величин электронные. Классификация и система условных обозначений. Санкт-Петербург: РНИИ "Электронстандарт". 1995.
9. РОСТ Р 51068. Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. М.: Госстандарт России. 1996.
10. Новый комплекс государственных военных стандартов на электрорадиоизделия / Ю. И. Степанов, М. И. Критенко, М. А. Бедревский, В. В. Голубев // Технологическое оборудование и материалы. 1998. № 4. С. 27—29.
11. Цапенко М. П., Клисторин И. Ф., Алейников А. Ф. Датчики (функции восприятия входных величин и формирование измерительных сигналов) // Датчики и системы. 2000. № 1. С. 17—18.
12. Кузин А. Ю., Строителев В. Н. Направления совершенствования систем контроля на основе датчиков // Тез. докл. научно-техн. конф. "Датчик-93". Гурзуф. 1993.
13. ГОСТ 16263—89. Метрология. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов.
14. ГОСТ 12997—91. Изделия ГСП. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов.
15. ОСТ В 11.0998—99. Микросхемы интегральные. Общие технические условия. Мытищи: 22 ЦНИИ МО РФ.
16. Телец В. А., Комаров Д. А. Датчики в системах управления технологическими процессами // Тез. докл. межрегиональной научно-техн. конф. "Комплексное математическое и физическое моделирование. Обеспечение надежности электронных приборов и аппаратуры". Бердянск. 1994.
17. Никифоров А. Ю., Телец В. А. Микроэлектронные преобразователи физических величин и компоненты датчиков как основа элементной базы микросистемной техники // Тез. докл. Всероссийской научно-техн. конф. с международным участием "Сенсоры и микросистемы". Санкт-Петербург. 2000.
18. Телец В. А., Комаров Д. А. Определение метрологических характеристик электронных датчиков на основе моделирования их взаимосвязей с характеристиками технологического процесса изготовления микросхем // Тез. докл. научно-техн. совещания "Электроника и информатика". Нижний Новгород—Астрахань. 1992.
19. Подлепский Б. И. Интегральные полупроводниковые сенсоры: состояние и перспективы разработок // CHIP-news. Новости о микросхемах. 1996. № 6—8. С. 38—45.
20. ГОСТ В 19480—80. Микросхемы интегральные. Система параметров. М.: Изд-во стандартов.
21. Программа комплексной стандартизации "Датчики электронные и преобразователи физических величин электронные" (проект). Санкт-Петербург: РНИИ "Электронстандарт". 1996.
22. Никифоров А. Ю., Подлепский Б. И., Телец В. А. Микроэлектронные компоненты датчиков и преобразователей — подход к формированию системы нормативных документов // Тез. докл. научно-техн. конф. "Датчик—97". Гурзуф. 1997.
23. Никифоров А. Ю., Подлепский Б. И., Телец В. А. Принципы формирования системы нормативных документов на микроэлектронные компоненты датчиков // Измерительная техника. 1997. № 3. С. 12—15.
24. Малышев П. П., Телец В. А. О возможности использования основных положений ОТУ на интегральные микросхемы для создания НТД на датчики в микроэлектронном исполнении // Тез. докл. научно-техн. совещания "Электроника и информатика". Нижний Новгород—Астрахань. 1992.
25. Nikiforov A. Y., Telets V. A., Gromov D. V. Microelectronic Approach to Smart Sensor Quality, Reliability and Radiation Hardness Regulation and Assurance / Proceedings 3rd Workshop on Electronics for LHC Experiments. England. 1997.
26. Никифоров А. Ю., Телец В. А. Методический подход к заданию требований, контролю и прогнозированию радиационной стойкости интегральных преобразователей информации // Радиационная стойкость электронных систем СТОЙКОСТЬ—99. Москва, 1999.
27. Ultraviolet Sensors Based on the Natural Diamond / D. V. Gromov, P. P. Maltsev, A. Y. Nikiforov, V. A. Telets e. a. // Result in Proceedings of "Eurosensors X" The 10th European Conference on Solid-state Transducers. V. 5. Belgium. 1996.
28. Nikiforov A. Y., Telets V. A., Figurov V. S., Bekishev A. T. Thermal Sensor Radiation Hardness Tests: Technique and Results // Proc. of Eurosensors X The 10th European Conf. on Solidstate Transducers, Sept. 8—11, 1996, Leuven, Belgium. V. 1. P. 315—318.
29. Nikiforov A. Y., Telets V. A., Figurov V. S. Thin-Film Thermo-Resistor Radiation Hardness Experimental Results // 1997 IEEE Radiation Effects Data Workshop, July 24, 1997, Showmass Village, Colorado. P. 41—43.
30. Motorola Pressure Sensor. Device Data. DL2000, Rev. 1. Q1/94. Motorola Inc. 1998.
31. Senseon Sense the Possibilities. Sensor Products. DQ 2. SG162/D. Rev. 25. Motorola Inc. 1998.
32. Analog Devices Product Data. Design — in reference manual Rev. B. S. 19. Sensor and Signal Conditioners. 1996.

УДК 621.3

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф.,
Б. Е. Андрианов, канд. техн. наук,
И. Б. Кнауэр, канд. техн. наук,
В. П. Степанов, канд. техн. наук,
 Институт проблем механики РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОДВИГАТЕЛЯХ

Исследованы статические и динамические характеристики микродвигателей, предназначенных для применения в микросистемах. Описана методика динамических испытаний, рассмотрен стенд для динамических испытаний и приведены нагрузочные и динамические характеристики микродвигателей.

Введение

В настоящее время в промышленно развитых странах мира ведутся интенсивные работы по разработке технологий и образцов функциональных комплектующих элементов и узлов будущей микроробототехники как составляющей нового направления развития науки и техники — микромеханики, базирующейся на методах и средствах прецизионных технологий.

Актуальность проведения исследований и разработок по этой проблеме в России следует из необходимости решения ряда проблем. В промышленности, топливно-энергетическом и оборонном комплексах эти проблемы обусловлены неэффективностью и недоступностью современных методов и средств для диагностики и ремонта изделий, в медицине — для проведения диагностики, операций и лечения. Существуют проблемы также в областях обороны страны, фундаментальных исследований, атомной энергетики, охраны окружающей среды.

Анализ зарубежных информационных материалов позволяет утверждать, что за рубежом успешное продвижение обеспечено

преимущественно широкомаштабными и крупнофинансируемыми проектами в США, Германии, Японии, Швейцарии, а в последние годы — в Китае и Индии, направленными на использование всей гаммы супертехнологий микроэлектронных производств при создании микромеханических устройств [1].

В то же время, по оценкам зарубежных специалистов и публикуемым материалам, наблюдается явный дефицит успешных разработок в области создания микро манипуляторов и микророботов, предназначенных для взаимодействия с внешней средой и выполнения "силовых" операций с объектами.

Причиной этого является то, что современные технологии микроэлектронного производства не позволяют создавать эффективные трехмерные (3D) микроустройства в интегральном исполнении. Например, наиболее продвинутой в этом направлении LIGA (основные технологические приемы: рентгенолитография (Li), гальваника (G), микролитье) обеспечивает изготовление 3D-микроизделий, позволяя создавать "силовые" микромеханизмы преимущественно электростатического типа. Кроме того, она чрезвычайно дорога из-за использования рентгенолитографии.

Одной из основных проблем современной микромеханики является проблема разработки 3D-микрокомплектующих элементов, компонентов и модулей микромеханики, а также технологий их производства.

МНТК "Робот" в 1996—1998 гг. разработал новую СВ-технологию [2—4], в основе которой лежит комбинация стекловолоконной технологии и пленочной технологии микроэлектроники. В процессе этой разработки был изготовлен ряд опытных образцов микроизделий, а именно:

- трехфазные микромоторы с внешними габаритными диаметрами 1,0 и 2,0 мм;
- энергоемкие микрокатушки индуктивности и микроконденсаторы минимальным объемом $(0,3 \times 0,3 \times 0,4) \text{ мм}^3$.

СВ-технология, в отличие от LIGA-технологии, не требует применения дорогостоящей рентгенолитографии и использует в основном отечественное промышленное оборудование. Так же, как и технология микроэлектронного производства, она позволяет осуществлять групповое изготовление 3D-микроизделий, что обеспечивает низкую себестоимость продукции.

В микросистемах, разрабатываемых для различного применения в машиностроении, медицине, военной технике, в каждом частном применении могут быть востребованы различные модификации микродвигателей (МД), но все они будут выполняться по СВ-технологии. Поэтому важно исследовать динамические характеристики уже разработанных микродвигателей, чтобы иметь возможность применения их результатов при разработке новых модификаций.

Эта работа была проделана специалистами ИПМ РАН и МНТК "Робот".

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 99-01-00085

Разрабатываемый двигатель и технологические аспекты его реализации

В качестве основного варианта был выбран синхронный двигатель с диаметрально намагниченным ротором и многофазной обмоткой статора (рис. 1). Статор выполняется по специальной технологии из стекла с мультипликативными проводниками (рис. 2). В качестве проводникового материала используется припой ПОС61 с удельным сопротивлением $\sigma = 0,00000016$ Ом/м и температурой плавления $T_{пл} = 200$ °С. Коэффициент заполнения сечения припоём составляет примерно $K_3 = 0,225$.

Использование мультикапиллярных проводников способствует

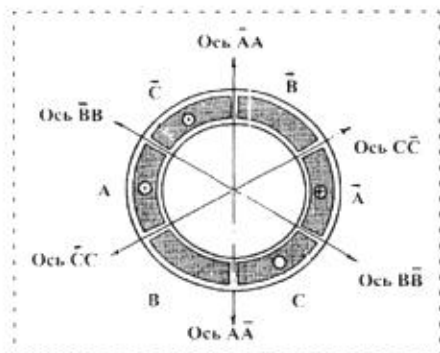


Рис. 1. Расположение секций $A\bar{A}$, $B\bar{B}$, $C\bar{C}$ статора

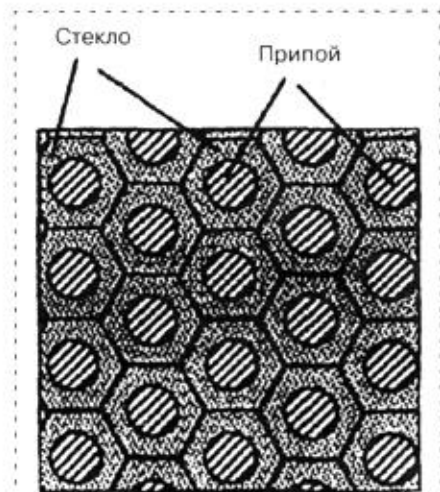
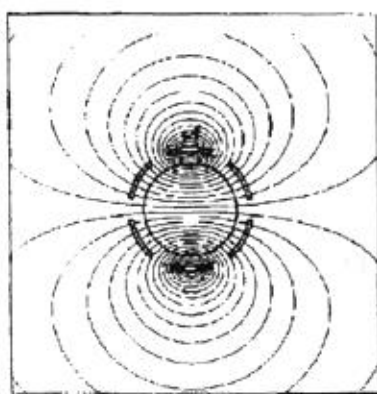
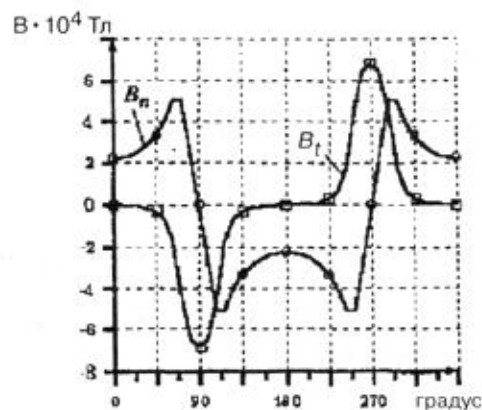


Рис. 2. Структура материала обмоток



а)



б)

Рис. 3. Магнитное поле фазы обмотки:

а — картина магнитного поля; б — распределение нормальной B_n и тангенциальной B_t составляющих индукции в зазоре

улучшению теплообмена в статоре и увеличивает проводимость проводников на высоких частотах.

Проводники группируются в секции обмотки статора (на рис. 1 обмотка статора состоит из секций $A, B, C, \bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$). С одного из торцов статора все секции электрически объединены между собой, а к другому торцу подводится питание. Такая конструкция статора позволяет гибко реализовывать различные схемы питания обмоток и, в частности, синхронное управление с разгоном ротора вращающимся магнитным полем с постепенно нарастающей частотой вращения.

Цилиндрический, диаметрально намагниченный ротор (диаметр 0,5—1,5 мм) изготовлен из сплава NdFeB.

Анализ электромагнитных процессов и получение расчетных соотношений

Разработке действующего образца МД и подсистемы его электропитания предшествовали расчетные исследования электромагнитных процессов в рабочем пространстве проектируемого двигателя. Детально анализировалась динамика распределения магнитного поля обмотки статора при протекании в ней тока (рис. 3),

а также распределение магнитного поля диаметрально намагниченного ротора (рис. 4). Целью расчетов являлось определение максимального электромагнитного момента, развиваемого двигателем. Электромагнитный момент рассчитывался по взаимодействию магнитного поля статора с магнитным полем ротора методом конечных элементов с помощью пакета программ ELCUT.

Были сформулированы расчетные соотношения для максимального электромагнитного момента вращения $M_{\phi, \max}$ при взаимодействии поля ротора с полем одной фазы статора в зависимости от угла между продольной осью ротора (осью магнита) и осью фазы.

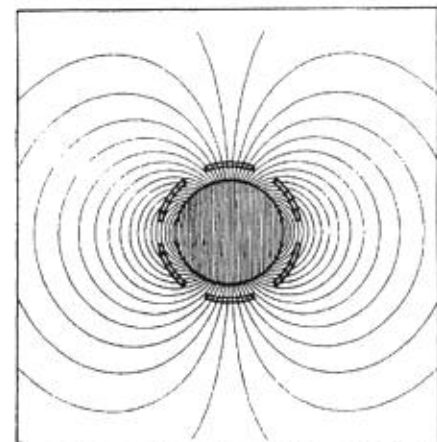


Рис. 4. Картина магнитного поля ротора

Было получено также аналитическое выражение для электромагнитного момента при одно-временной подаче токов во все три обмотки статора.

Исследование модели микродвигателя

Для проверки полученных расчетных соотношений была изготовлена **макромодель** двигателя (рис. 5). Шестисекционная обмотка, изготовленная из латунной фольги, уложена на внешней поверхности стеклянного статора, диаметр которого равен 6,1 (внутренний диаметр статора 4,85 мм). На одном из торцов все обмотки объединены.

К диаметрально намагниченному ротору (NdFeB) были приклеены два хвостовика, с помощью которых ротор был установлен в подшипники скольжения.

Питание обмоток статора осуществлялось от импульсного источника тока. Токи в противоположных секциях были сдвинуты на 180 °С, так что эти секции можно рассматривать как начало (А) и конец (А̄) одной и той же фазы. Временная диаграмма токов показана на рис. 6.

Согласно расчетам методом конечных элементов для модельного двигателя максимальный средний момент вращения составляет $M_{вр} = 0,66 \cdot 10^{-4}$ Н·м.

Расчетные соотношения были проверены экспериментально на специально изготовленном стенде (рис. 7). Стенд состоит из платформы 1, на которой установле-

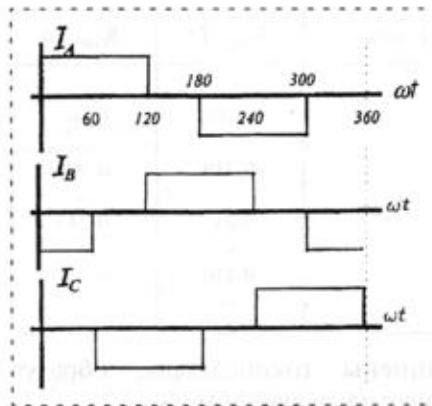


Рис. 6. Диаграмма токов в фазах

ны: приспособление 2 для крепления испытываемого двигателя 3, имеющее возможность осевого перемещения; нагрузочное устройство, представляющее собой систему постоянных магнитов 5, укрепленных на вращающемся диске 6. Ось диска снабжена стрелкой 7 и грузом-противовесом 8.

При вращении ротора в поле постоянных магнитов вращается латунный диск 4, укрепленный на валу двигателя. В этом диске наводятся вихревые токи и возникает тормозящий момент, нагружающий испытываемый двигатель и отклоняющий стрелку и противовес.

Уменьшением расстояния между латунным диском и постоянными магнитами достигается увеличение нагрузочного момента M_H .

Частота вращения контролируется строботаксометром 9.

При изменении силы фазового тока от 1,5 до 3 А максимальная частота вращения изменялась от 3000 до 15000 мин⁻¹, а M_H — от

0 до $0,6 \cdot 10^{-4}$ Н·м. При дальнейшем увеличении M_H двигатель выходил из синхронизма и останавливался.

Примерное равенство M_H и $M_{вр}$ подтверждает точность расчета $M_{вр}$ методом конечных элементов.

Выбор оптимальных геометрических параметров МД

Полученные расчетные соотношения были использованы при выборе оптимальной геометрии МД по критерию максимального вращающего момента. При этом была принята конструктивная схема статора, показанная на рис. 1.

При расчетах принимались постоянными внешний диаметр статора $D_a = 2$ мм, зазор между статором и ротором $\delta = 20$ мкм, а варьировались внутренний диаметр статора D_i , диаметр ротора магнита D_m и сечение обмотки. Плотность тока в обмотке статора принималась равной $\sigma = 10$ А/мм².

Результаты расчетов представлены в таблице. В ней приведены значения момента вращения из расчета на одну фазу и на единицу активной длины двигателя.

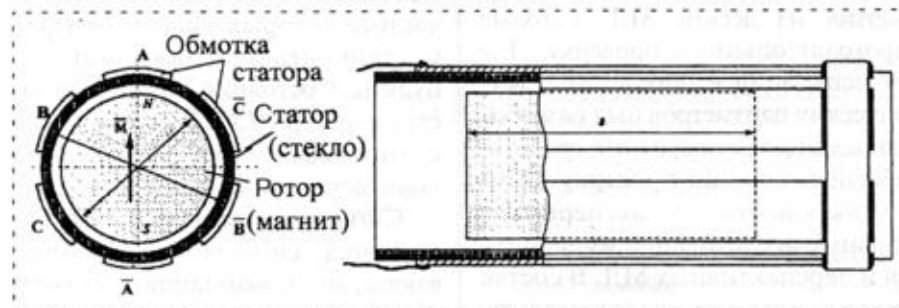


Рис. 5. Макромодель двигателя

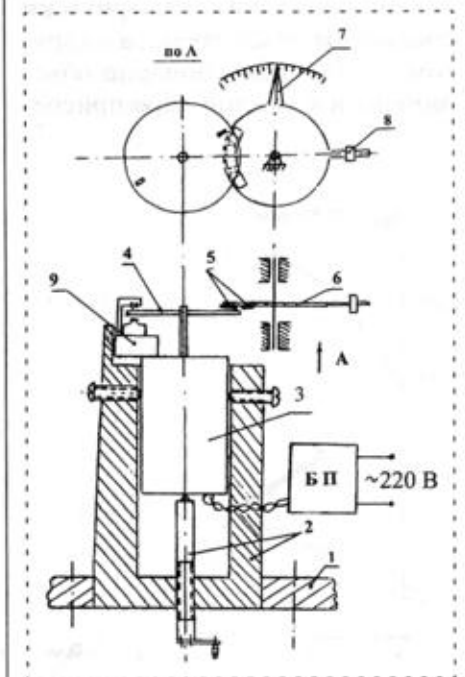


Рис. 7. Стенд для испытаний модельного двигателя

D_i , мм	I_{ϕ} , мА	$M_{\phi \max} \cdot 10^{-4}$, Н·м/м	$V_{\text{вср}}$, Тл	$V_{r \text{ср}}$, Тл
1,0	440	1,77	—	—
1,1	410	1,94	0,180	0,163
1,2	375	2,06	—	—
1,3	340	2,12	0,214	0,203
1,4	300	2,12	—	—
1,5	260	2,00	0,232	0,243
1,6	210	1,82	—	—
1,7	165	1,57	0,270	0,281
1,8	110	1,16	—	—

Максимальный электромагнитный момент, который может развить двигатель при трехфазном питании, $M_{\text{max}} = 1,65 I M_{\phi \text{max}}$, где l — длина активной зоны двигателя.

Зависимость $M_{\phi \text{max}}$ от D_i показана на рис. 8. Оптимальное значение D_i при $D_a = 2$ мм составляет 1,2–1,5 мм. Для двигателя диаметром 2 мм при $l = 4$ мм максимальный момент $M_{\text{max}} = (10 \div 14) \cdot 10^{-7}$ Н·м.

По результатам проведенной оптимизации был спроектирован опытный образец двигателя. В конструкцию статора было внесено изменение, а именно, он был выполнен с обмоткой не из шести, а из 12 секций, заполненных сплавом PbSn. На одном из торцов все секции электрически соединены между собой, а на другом торце секции попарно объединены и к каждой паре присое-

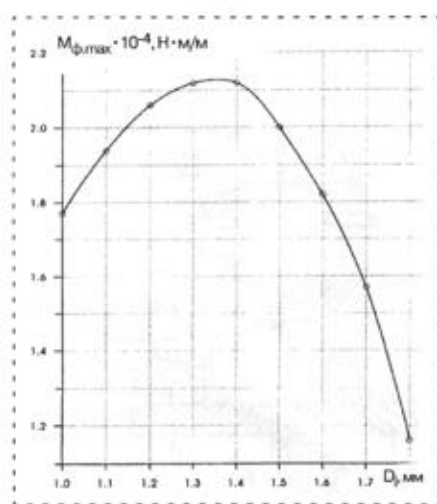


Рис. 8. Зависимость $M_{\phi \text{max}}$ от внутреннего диаметра D_i

динены токоподводы, образуя шестилучевую обмотку.

Конструкция ротора варьировалась (рис. 9).

Так, ротор из сплава NdFeB имеет сложный в изготовлении магнит и радиальный технологический паз, необходимый для получения центрального отверстия под вал (рис. 9, в), в результате чего ротор приобрел эксцентриситет. В качестве подшипников скольжения были использованы полиимидные втулки.

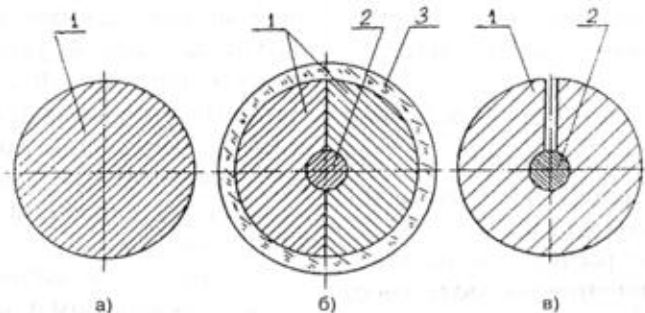


Рис. 9. Ротор микродвигателя: а — без вала (МД без подшипников); б — с составным постоянным магнитом; в — с постоянным магнитом цельной конструкции; 1 — постоянный магнит (NdFeB); 2 — вал; 3 — стеклянный цилиндр

Аппаратура для питания МД и проверки его работоспособности

В настоящее время изготовлена партия из десяти МД, которые проходят опытную проверку. Для их испытаний и определения технических параметров был разработан комплекс аппаратных средств, обеспечивающий проверку работоспособности и экспериментальные исследования имеющихся и перспективных МД. В состав этого комплекса входят следующие блоки.

Источник питания обеспечивает выработку нестабилизированного напряжения +9 В; 1,5 А.

Пульт питания МД обеспечивает получение последовательности прямоугольных импульсов тока для питания обмоток МД с возможностью ручной регулировки частоты следования этих импульсов и амплитуды фазового тока в обмотках с одновременной цифровой индикацией этих параметров на табло. Диапазон изменения частоты импульсов питания 1–20 Гц. Сила фазовых токов может принимать следующие значения: 0,725; 1,0 и 1,25 А.

На рис. 10 приведена функциональная схема пульта питания. Резистором R_3 задается частота вращения магнитного поля статора в диапазоне 1–20 Гц. После включения питания восьмиразрядный счетчик СЧ обнуляется, и преобразователь напряже-

ние — частота (ПНЧ) начинает вырабатывать последовательность прямоугольных импульсов, частота которых зависит от $U_3(t)$. Счетчик пересчитывает эти импульсы. Состояние счетчика является адресом ПЗУ. В соответствии с этим адресом на выходах ПЗУ появляется определенный код.

Сигналы на выходах 1–6 ПЗУ — являются сигналами, обеспечивающими коммутацию токовых ключей $K1$ – $K12$, коммутирующих обмотки статора.

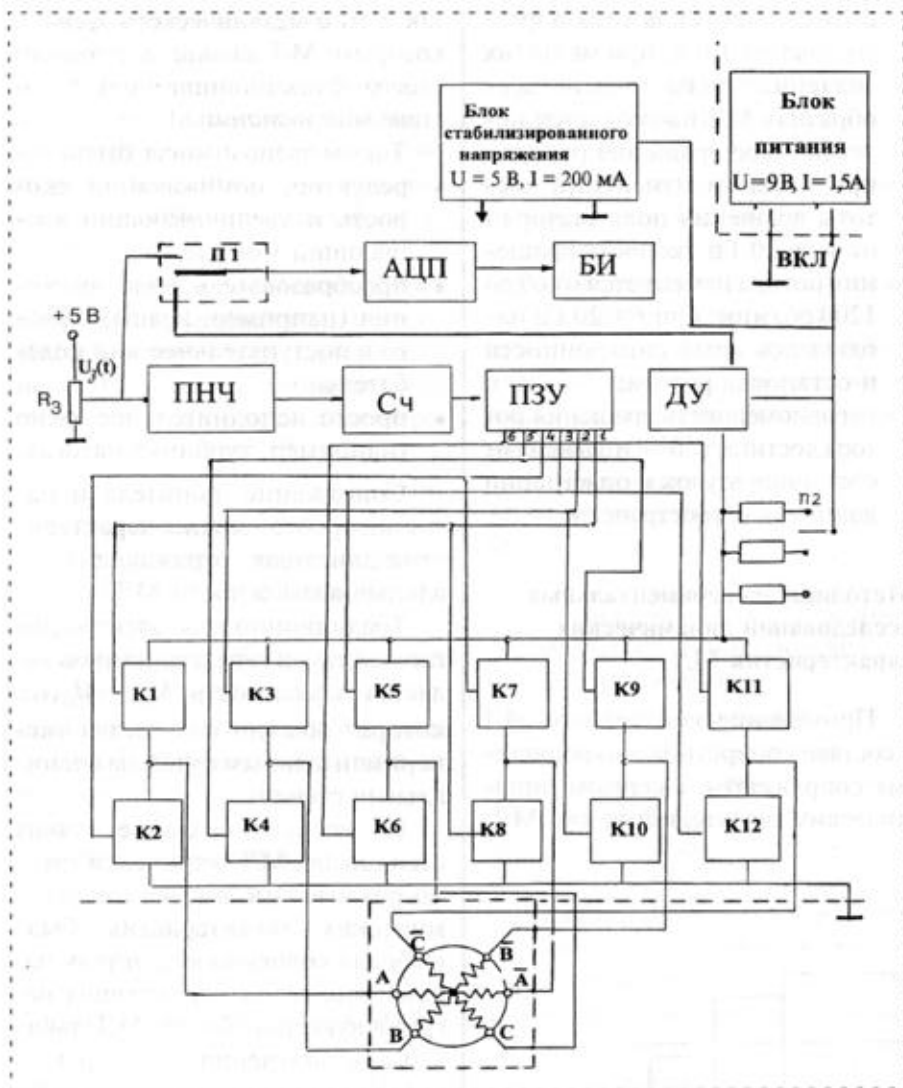


Рис. 10. Функциональная схема пульта питания МД: П1 — переключатель системы индикации; П2 — переключатель фазовых токов; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БИ — блок индикации; ДУ — дифференциальный усилитель

Все адресное пространство ПЗУ (256 адресов) разделено на шесть зон, и в каждой зоне записан код коммутации очередной фазы.

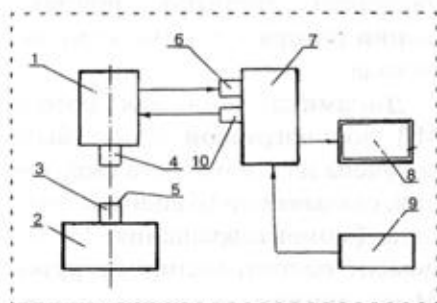


Рис. 11. Функциональная схема контрольно-измерительного стенда на базе микроскопа

Частота импульсов ПНЧ в совокупности с кодировкой ПЗУ задает частоту вращения магнитного поля статора.

Постепенное изменение сигнала $U_3(t)$ в пределах от +5 до 0 В вызывает изменение частоты вращения поля статора от 1 до 20 Гц.

Остановка двигателя осуществляется простым отключением питания. При этом все обмотки статора оказываются разомкнутыми и обесточенными. Вращение ротора прекращается за счет сил внутреннего торможения.

Контрольно-измерительный стенд на базе телевизионного микроскопа предназначен для оп-

ределения фактической скорости вращения ротора.

Функциональная схема микроскопа показана на рис. 11. На предметный столик 2 устанавливается микродвигатель 3. На тубусе микроскопа закреплена телевизионная камера 4. На торце вала МД нанесен флажок (риска) 5, изображение которого проецируется на фотоприемник телекамеры в необходимом масштабе.

Видеосигнал телекамеры передается через видеопорт 6 в компьютер 7, снабженный монитором 8 и клавиатурой 9. Через параллельный порт 10 осуществляется управление временем экспозиции телекамеры.

Изображение вращающегося флажка визуализируется на экране монитора.

Телекамера может экспонировать флажок в течение 20, 10, 5, 2.5 и 1 мс.

На время экспозиции видеопорт "захватывает" отдельные кадры телевизионного изображения и визуализирует их на экране монитора в виде "размазанного" сектора, угол которого зависит от времени экспозиции и мгновенной угловой скорости ротора.

Пример такого изображения представлен на рис. 12.

Определив $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ и зная время экспозиции Δt , можно вычислить мгновенную угловую скорость ротора $\omega = \varphi/\Delta t$.

Диапазону скоростей вращения магнитного поля 1—20 Гц соответствует скорость вращения

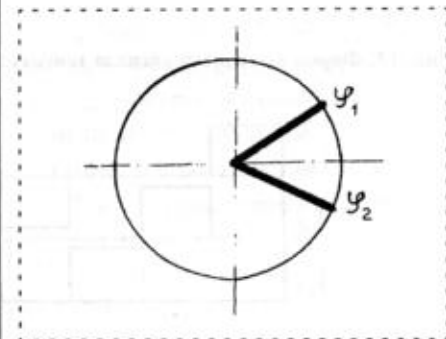


Рис. 12. Изображение вращающегося флажка микродвигателя на экране монитора

ротора (в синхронном режиме) 60—3000 мин⁻¹.

Для снятия динамических характеристик достаточно экспонировать телекамеру каждые 50 мс на время $\Delta t = 5$ мс. В этом режиме можно измерить угловую скорость ротора не менее чем 2 раза за один его оборот.

Результаты испытаний опытной партии МД

Контрольно-измерительным испытаниям были подвергнуты десять образцов МД.

В результате было установлено следующее:

- с точки зрения аппаратных затрат наиболее экономичной является шеститактная схема питания обмоток, показанная на рис. 13 и рис. 14, при которой угол синхронизации равен $\pi/3$ и отсутствует перекрытие фаз;

- оптимальная сила тока в фазе составляет 1,0 А; при меньших значениях силы тока на всех образцах МД наблюдается неустойчивое вращение ротора;
- при плавном изменении частоты вращения поля статора f от 1 до 20 Гц скорость вращения ротора изменяется от 60 до 1200 об/мин; при $f > 20$ Гц наблюдался срыв синхронности и остановка ротора;
- неравномерность вращения ротора достигает 50 % и зависит от состояния втулок и ориентации двигателя в пространстве.

Методика экспериментальных исследований динамических характеристик МД

Применение конкретного МД в составе конкретной микросистемы сопряжено с анализом динамических характеристик как МД,

так и того механического звена, с которым МД связан в процессе своего функционирования в составе микросистемы.

Таким звеном могут быть:

- редуктор, понижающий скорость и увеличивающий вращающий момент;
- преобразователь вида движения (например, вращательно-поступательное или колебательное);
- просто исполнительное звено (например, турбинка насоса).

Сопряжение двигателя и нагрузки требует знания характеристик двигателя, отражающих реальные возможности МД.

Традиционно для электродвигателей такой характеристикой является зависимость $M_H = M_H(\omega)$, которая обычно получается экспериментальным путем на специальных стендах.

Поскольку создание таких стендов для МД технически трудно реализовать, в качестве динамических характеристик была выбрана совокупность других параметров, также отражающих нагрузочную способность МД, таких что для получения этих характеристик достаточно использовать уже имеющееся оборудование.

С точки зрения простоты реализации эксперимента наиболее привлекательным является исследование работы МД без нагрузки (т. е. в режиме холостого хода).

Большинство силовых и инерционных факторов, оказывающих влияние на работу МД под нагрузкой, действуют и при вращении ротора в режиме холостого хода.

Динамика движения ротора МД под нагрузкой может быть получена из следующего выражения, связывающего силовые факторы [момент вращения $M_{вр}(t)$, момент сопротивления нагрузки $M_H(t)$, момент внутреннего торможения ротора $M_{т.вр}$] с инерционными параметрами МД:

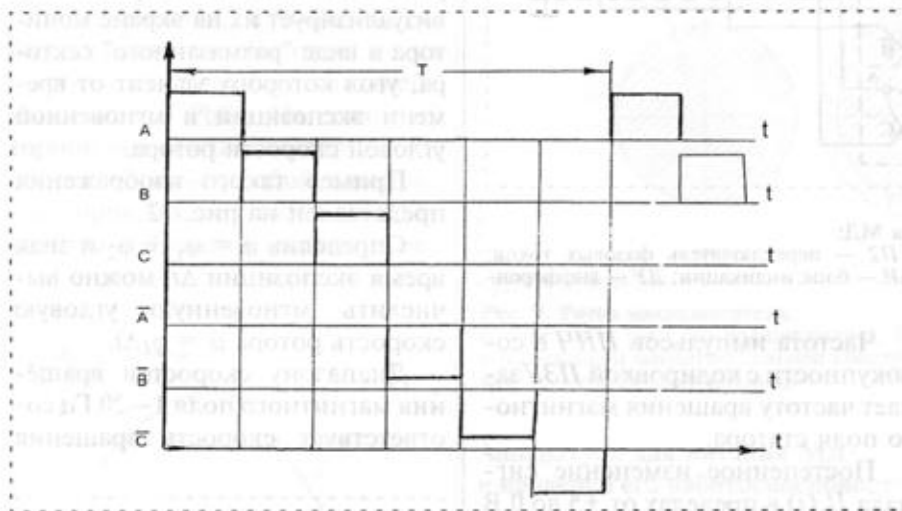


Рис. 13. Форма выходного сигнала генератора импульсов

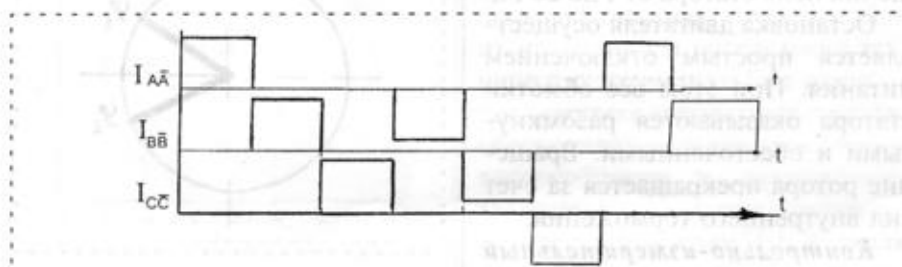


Рис. 14. Форма токов в обмотках микроэлектродвигателя

$$M_{вр}(t) = M_{н}(t) + M_{т.вн}(t) + I_{пр}d\omega/dt, \quad (1)$$

где $I_{пр}$ — приведенный момент инерции ротора, равный сумме момента инерции ротора I_p и момента инерции нагрузки $I_{н}$, т. е. $I_{пр} = I_p + I_{н}$.

В режиме холостого хода (без нагрузки) $I_{пр}$ совпадает с моментом инерции ротора I_p , который нетрудно получить расчетным путем, зная материал и размеры ротора.

Момент вращения $M_{вр}(t)$ определяется силой фазовых токов и дисциплиной их включения при формировании вращающего поля статора.

Значение $M_{вр}(t)$ колеблется в течение каждого оборота в зависимости от отставания по фазе оси намагниченности ротора от вращающего электромагнитного поля статора, но среднее значение $M_{вр.ср}$ остается постоянным.

Для ненагруженного МД аналогичное уравнение не содержит $M_{н}(t)$ и имеет вид:

$$M_{вр}(t) = M_{т.вн}(t) + I_p d\omega/dt, \quad (2)$$

где $M_{т.вн}(t)$ — полный внутренний тормозящий момент, обусловленный электромагнитным торможением и трением в МД, т. е.

$$M_{т.вн}(t) = M_{эм}(t) + M_{т.вн}(t).$$

Рассмотрим эти факторы подробнее.

Электромагнитное торможение возникает в результате взаимодействия магнитного поля вращающегося ротора с обмотками статора. При пересечении обмотки статора магнитным полем вращающегося ротора в этой обмотке наводится ЭДС, пропорциональная скорости пересечения и длине провода обмотки. Если в этой обмотке возможно прохождение тока, то направление этого тока таково, что, взаимодействуя с магнитным полем ротора, он

оказывает тормозящее действие на ротор.

Так как в МД все обмотки соединены в одной точке и при вращении по крайней мере одна из обмоток коммутирована на землю, то наведенная ЭДС вызовет в обеих обмотках ток, который окажет тормозящее влияние на вращающийся ротор. Если же эта ЭДС возникла в обмотке, по которой идет фазовый ток, то сила этого тока уменьшится, что вызовет уменьшение $M_{вр}$.

Рассматривая влияние *трения* $M_{тр}(t)$ следует различать трение в МД в начале движения ротора (трение покоя) и трение в процессе движения, т. е. при разгоне ротора, его стационарном вращении и торможении.

Перед началом движения ротор находится в положении, при котором из-за имеющегося эксцентриситета его ось не совпадает с осью статора и, следовательно, ротор механически контактирует со статором (например, в подшипниках). Это проявляется как традиционное "сухое" или трение покоя $M_{тр.пок}$, препятствующее началу движения ротора при включении МД:

$$M_{тр.пок} = 0,5f_{тр.пок}ND_b,$$

где $f_{тр.пок}$ — коэффициент трения металла по полиимиду; D_b — диаметр вала; N — нормальная реакция в точке соприкосновения вала с втулкой подшипника.

Зная геометрические параметры МД, нетрудно получить значение N расчетным путем.

При пуске МД по мере набора скорости между валом и втулкой возникает воздушная прослойка (так же, как между ротором и внутренним цилиндром статора) и при этом "сухое" трение уменьшается.

Если $M_{тр.пок}$ перед началом вращения можно вычислить, то его изменение в процессе набора скорости можно учесть на основании экспериментальных изме-

рений. Согласно [5], воздушная турбулентная прослойка, в которой вращается ротор, оказывает на него тормозящее влияние ("вязкое" трение), зависящее от скорости вращения $M_{тр}(\omega)$.

Таким образом, при наборе скорости влияние "сухого" трения уменьшается, а влияние "вязкого" трения возрастает. При снижении скорости "вязкое" трение уменьшается, а "сухое" трение возрастает до $M_{тр.пок}$ в момент останова. Точно разделить влияние этих факторов очень трудно.

Зависимость $M_{тр}(\omega)$ является индивидуальной характеристикой каждого конкретного МД, как и $M_{эм}(\omega)$.

Ниже приводится методика получения обеих экспериментальных характеристик, т. е. $M_{тр}(\omega)$ и $M_{эм}(\omega)$, а также их суммы $M_{т.вн}$ путем простого измерения скорости вращения ненагруженного ротора при его останове.

Получение характеристики $M_{тр}(\omega)$. Выше указывалось, что останов ротора происходит простым отключением пульта питания МД от источника питания (см. рис. 12). После выключения питания все обмотки статора оказываются разомкнутыми, поэтому несмотря на наводимые в них ЭДС токи в обмотках не возникают, т. е. при останове МД отсутствует электромагнитное торможение ($M_{эм} = 0$), т. е.

$$M_{т.вн}(t) = M_{тр}(t). \quad (3)$$

Следовательно, замедление движения ротора происходит только за счет вязкого трения в турбулентном воздушном потоке, и в конце перед полным остановом начинает влиять "сухое" трение.

Так как при торможении без нагрузки (в режиме холостого хода) $M_{вр} = 0$ и $M_{н} = 0$, то уравнение (1) с учетом (3) для процесса торможения ротора будет иметь вид:

$$M_{тр}(t) + I_p d\omega/dt = 0,$$

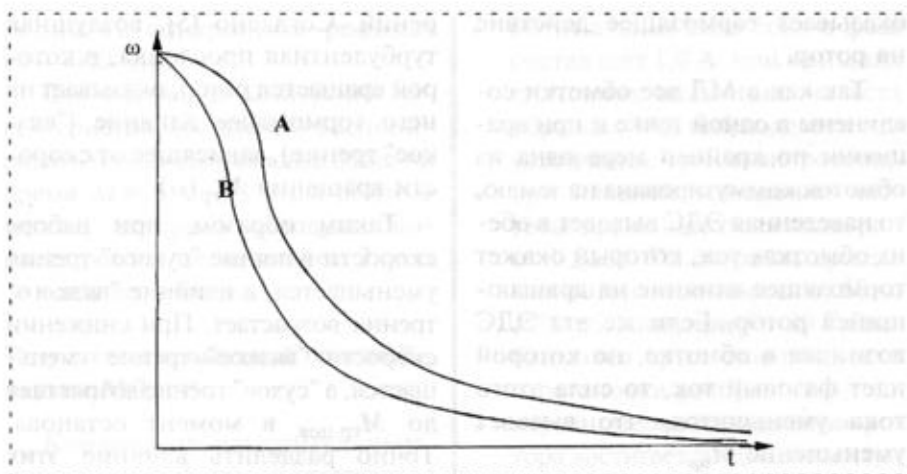


Рис. 15. Графики изменения скорости вращения ротора при останове: A — торможение только трением; B — полное торможение

откуда

$$M_{\text{тр}}(t) = -I_p d\omega/dt,$$

т. е. для получения $M_{\text{тр}}(t)$ достаточно получить информацию об изменении скорости вращения ротора в процессе его останова. Процедура измерения ω с помощью видеотелекамеры описана выше. На рис. 15 изображен график A изменения скорости ротора $\omega = \omega(t)$ при останове МД под влиянием как турбулентного торможения, так и сухого трения (при окончательной остановке ротора).

Зависимость $d\omega/dt$ может быть получена простым численным дифференцированием зависимости $\omega = \omega(t)$, т. е.

$$d\omega/dt = \Delta\omega/\Delta t.$$

На основании полученной зависимости $M_{\text{тр}}(t)$ несложно вычислить характеристику $M_{\text{тр}}(\omega)$ простой заменой аргумента t на функцию $t = t(\omega)$, которая является обратной зависимостью $\omega = \omega(t)$, полученной экспериментально.

Получение характеристик $M_{\text{т.вн}}$ и $M_{\text{эм}}(\omega)$ выполняется аналогичным образом. Для этого пульт питания МД был модифицирован, чтобы обеспечить режим торможения ротора как за счет только турбулентного трения, так и за счет совместного влияния турбулентного трения и электромагнит-

ного торможения (полное торможение).

При полном торможении уравнение (2) имеет вид

$$M_{\text{т.вн}}(t) + I_p d\omega/dt = 0.$$

Время останова ротора существенно сокращается, что видно из полученной экспериментально зависимости (рис. 15, график B):

$$\omega = \omega(t). \quad (4)$$

Далее с помощью численного дифференцирования вычисляем

$$d\omega/dt = \Delta\omega/\Delta t$$

и полный момент торможения

$$M_{\text{т.вн}}(t) = -I_p d\omega/dt. \quad (5)$$

Используя (4) путем замены аргумента $t = t(\omega)$ в (5), находим $M_{\text{т.вн}}(\omega) = M_{\text{т.вн}}[t = t(\omega)]$.

Получив $M_{\text{тр}}(\omega)$ и $M_{\text{т.вн}}(\omega)$, несложно вычислить

$$M_{\text{эм}}(\omega) = M_{\text{т.вн}}(\omega) - M_{\text{тр}}(\omega).$$

Найденные динамические характеристики $M_{\text{т.вн}}(\omega)$, $M_{\text{тр}}(\omega)$ и $M_{\text{эм}}(\omega)$ вместе с вычисленными электромагнитным моментом вращения $M_{\text{вр}}(t)$ и моментом инерции ротора I_p могут быть использованы в качестве характеристик нагрузочной способности МД. Более того, эти характеристики являются более информативными, так как в отличие от $M_{\text{н}}(\omega)$ они

позволяют учесть инерционные параметры нагрузки через момент инерции нагрузки $I_{\text{н}}$.

С точки зрения простоты реализации режим торможения ротора без нагрузки более предпочтителен, поскольку силы внутреннего торможения являются единственными силовыми факторами, влияющими на скорость вращения ротора. Этим и объясняется относительная легкость организации эксперимента и получения информации о $M_{\text{т.вн}}(\omega)$.

Экспериментальные исследования остальных этапов работы МД (например, разгон ненагруженного ротора при пуске МД, вращение ротора с постоянной скоростью в синхронном режиме) могут дать полезную информацию о влиянии остальных силовых факторов. Однако эти исследования ненагруженного МД затруднены тем, что вращающее магнитное поле статора, обусловленное прохождением импульсов тока через обмотки статора, согласно временной диаграмме, приведенной на рис. 14, вращается неравномерно, поворачиваясь скачкообразно на $\pi/3$ через $\Delta t = 1/6\omega$, т. е. шесть раз за каждый оборот ротора. Следовательно, неравномерным является влияние вращающего электромагнитного момента $M_{\text{вр}}(t)$, причем значение $M_{\text{вр}}(t)$ определяется углом отставания оси намагниченности ротора от оси намагниченности действующей фазы статора.

Указанные трудности могут быть преодолены за счет более полного использования возможностей описанного выше телевизионного микроскопа.

Если, во-первых, наносимый на торец вала ротора флажок риска совпадает с осью намагниченности ротора (или известен угол между осью намагниченности ротора и флажком) и, во-вторых, при установке МД на предметный столик 2 (см. рис. 11) его

фазовые обмотки точно ориентируются относительно системы развертки телекамеры, то при каждом экспонировании вращающегося вала ротора мы будем получать информацию не только о скорости вращения, но и о положении оси намагниченности ротора относительно фазовых обмоток статора. В-третьих, если команды на переключение фазовых токов будут поступать на пульт питания МД из компьютера 7 (см. рис. 11), то этот компьютер при каждом экспонировании торца вращающегося ротора будет получать информацию об угле между осью намагниченности действующей фазы статора и осью намагниченности ротора. Этот параметр является важнейшим при анализе динамических процессов, происходящих в МД.

Таким образом, можно сделать заключение о целесообразности объединения контрольно-измерительного стенда на базе телевизионного микроскопа в единый комплекс с пультом питания МД.

Предполагается, что такая работа будет проведена.

Применение такого стенда позволит:

- исследовать процессы синхронного вращения ротора под воздействием скачкообразно вращающегося магнитного поля статора и внутреннего момента торможения $M_{т.вн}(t)$;
- исследовать причины неравномерного вращения ротора;
- определить для каждого МД максимальную скорость вращения ротора в синхронном режиме;
- для каждого МД определить влияние "сухого" трения при разгоне ротора, т. е. получить $M_{тр.пок}(\omega)$.

В результате этих исследований может быть выбрана оптимальная дисциплина питания обмоток статора, а также выработаны рекомендации по структуре системы питания МД.

Получены динамические характеристики микродвигателей, пред-

назначенных для применения в микросистемах, в том числе в многозвенных системах, представляющих управляемые гибкие стержни.

Выявлены особенности и закономерности динамических процессов в микродвигателях. Выполнены экспериментальные исследования на разработанном стенде по предложенной методике испытаний, что позволило провести оценочное сравнение теоретических и экспериментальных данных по динамике микродвигателей.

Список литературы

1. Вешников В. Б., Градецкий В. Г., Калиниченко С. В. и др. Системы миниатюрных роботов. Препринт № 564, ИПМ РАН, М., 1996. 55 с.
2. Белоглазов И. И., Суховеев С. П. Патент № 2085523, 1995.
3. Soukhoveev S. P., Stepanov V. P., Beloglazov V. I. et str. Micro Machines and Systems, Moscow, Russia, 24—25 November 1999. P. 185.
4. Арменский Е. В., Фалк Г. Б. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1985.
5. Ландау Л. Д., Китайгородский А. И. Молекулы. М.: Наука, 1984.

Международная научно-практическая конференция "Фундаментальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения" (ПЬЕЗОТЕХНИКА-2000)

Конференция состоялась 27 ноября—1 декабря 2000 г. в г. Москве.

Организаторы: РАН, РФФИ, Минобразования РФ, МИРЭА (ТУ), Ростовский государственный университет.

Работа конференции проводилась по трем секциям:

Физика пьезоэлектриков
Материаловедение и метрология
Пьезоэлектрическое приборостроение

С приветственным словом выступил сопредседатель конференции, ректор МИРЭА (ТУ) А. С. Сигов, член редколлегии журнала "Микросистемная техника".

Среди участвующих в пленарных заседаниях выступили:

Ерофеев А. А., Ерофеев С. А. (Санкт-Петербург) "Функциональные активные среды и системы на их основе"

Рыбьянец А. Н., Сахненко В. П. (Ростов-на-Дону) "Пьезоэлектрическая керамика за рубежом: современное состояние и перспективы развития".

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 621.3

Ю. В. Панфилов, д-р техн. наук, проф.,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК

Показаны перспективы применения тонкопленочных технологий для получения трехмерных, двумерных и одномерных наноконструктивных структур. С помощью современных информационных технологий проанализированы маршруты, методы, режимы и особенности формирования сверхтонких пленок в вакууме. Приведены характеристики пленок с толщиной от 1 до 100 нм.

Одной из современных тенденций совершенствования изделий машиностроения и приборостроения, в том числе и устройств микромеханики и микросистемной техники, является уменьшение геометрических размеров их элементов. Многие детали машин и приборов, устройства микросистемной техники включают в себя тонкопленочные структуры. Толщина таких структур постепенно уменьшалась сначала до значений микрометрового диапазона, а затем и до размеров в несколько десятков нанометров. Это связано с тем, что при толщине от 1 до 100 нм свойства материала практически не зависят от химического состава, а зависят лишь от формы и размеров наноструктур и во многих случаях по своим характеристикам существенно превосходят монолитные материалы.

Одним из наиболее характерных примеров, подтверждающих такую закономерность, является зависимость предела прочности металлической пленки от ее толщины (рис. 1) [1], что объясняется более совершенной структурой сверхтонких пленок и более

ярким проявлением фрактальных свойств, перераспределением вклада в прочностные свойства материала в "пользу" поверхности по сравнению с объемом. Поэтому одним из перспективных путей управления механическими, а также электрическими, магнитными и многими другими свойствами материала является варьирование толщиной материала в диапазоне от 1 до 100 нм, его наноструктурой, числом слоев и т. п., т. е. формирование наноконструктивного материала.

Типовыми примерами таких материалов являются:

- трехмерные монокристаллические структуры (3D-сверхрешетки), полученные путем

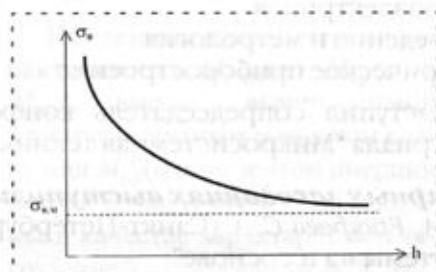


Рис. 1. Зависимость предела прочности $\sigma_{в}$ металлической пленки от ее толщины h ($\sigma_{в,м}$ — предел прочности монолитного материала)

нанесения пленок на синтетический опал и заполнения межглобулярных пустот матрицы с размерами 10–200 нм (рис. 2, а) [2];

- двумерные тонкопленочные покрытия толщиной 1–100 нм (рис. 2, б);
- одномерные "нанопроволочки" диаметром порядка 100 нм, выращенные в каналах трековых мембран (рис. 2, в) [3].

Очевидно, что получить материалы такой толщины можно только с помощью специальных технологий, наиболее распространенной из которых является нанесение тонких пленок в вакууме. Однако высокие требования к толщине, чистоте, структуре, а следовательно, и к свойствам пленок заставляют избирательно подходить к технологии их формирования, т. е. к выбору маршрута, метода и режимов осаждения или роста пленок.

Цель данной статьи — анализ существующих технологий формирования сверхтонких пленок в вакууме (с помощью которых, как было отмечено выше, можно получать трехмерные, двумерные и одномерные наноструктуры). Для реализации поставленной цели воспользуемся современными методами информационных технологий.

Для повышения информационного обеспечения разработок и исследований разработана модель информационного образа вакуумного оборудования для нанесения тонких пленок (рис. 3). Известно, что машины различного технологического назначения состоят из следующих структурных элементов:

- механизмов и устройств рабочих ходов (РХ) — технологиче-

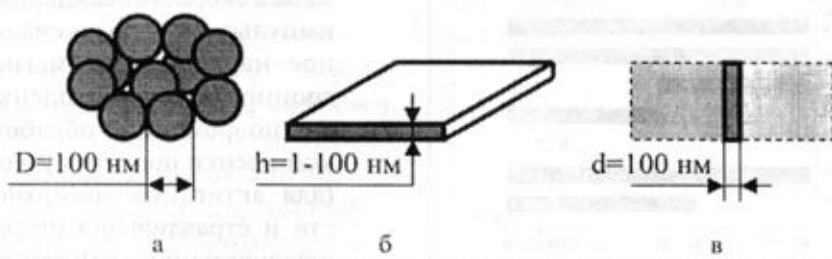


Рис. 2. Схема нанокompозитной структуры: а — трехмерной; б — двумерной; в — одномерной; D — диаметр сферы, h — толщина пленки, d — диаметр нанопроволочки

ская часть, отражающая виды и способы воздействия на обрабатываемое изделие;

- механизмов и устройств холостых ходов (XX) — конструктивное исполнение, отражающее виды и способы загрузки, выгрузки, закрепления и перемещения изделий, размещения всех элементов машины;
- систем управления (СУ).

Спецификой вакуумного технологического оборудования является наличие вакуумной системы (ВС).

В разработанной модели информационного образа каждому структурному элементу соответствует специальная база данных:

- технологической части — "TFD_c", "TFD_m" и др.;
- конструктивному исполнению — "TFD_d", "TFD_l" и др.;
- системам управления — "ConSys";
- вакуумным системам — "Vacuum".

Эти базы данных используются: при выборе наиболее рациональных методов, режимов, маршрута; при описании работы машины с помощью циклограмм и процессных моделей; для анализа и выбора элементов вакуумной системы, а также для прогнозирования показателей надежности оборудования, проведения экспертных оценок (в том числе без непосредственного участия эксперта) и выполнения других работ, связанных с созданием со-

временного конкурентоспособного оборудования.

База данных по технологии и оборудованию для нанесения тонких пленок в вакууме [4] позволила проанализировать более 500 научных статей и докладов по технологии тонких пленок и сделать выборку по методам, режимам и особенностям технологии нанесения пленок из различных материалов толщиной от 1 до 100 нм. Ниже приведены основные результаты проведенного анализа.

- Выявлено 30 (!) областей применения сверхтонких пленок — от высокотемпературной сверхпроводимости до износостойких и декоративных покры-



Рис. 3. Фрагмент информационного образа вакуумного оборудования для нанесения тонких пленок:

РК — рабочая камера; ПК — промежуточная камера; ТС — транспортная система; МН — межоперационный накопитель; ШУ — шлюзовое устройство

тий, однако наибольшее количество публикаций (почти 30 %) связано с микроэлектроникой.

- Очень широк спектр материалов сверхтонких пленок: Al, Cu, Ti, Pt, Fe, Cd, Zn, Mg, In, Pb, Bi, Ag, Co, Tb, Dy, Si, C, α -Si:H, α -SiC:H, SiC, Si₃N₄, PtSi, TaSi₂, WSi₂, CoSi₂, WN, Mo₂N, TiN, AlN, NbN, TiO, NbO, SnO₂, ZrO₂ (стабилизированный иттрием), BiSrCuO, YBaCuO, CaF₂, SrF₂, BaF₂, TiW, SrTiO₃; используемые материалы подложек — кремний, кварц, стекло, сталь, лавсан, бумага и др.
- Методы нанесения пленок, согласно классификации, приведенной в [4], распределились следующим образом: для формирования сверхтонких пленок наиболее привлекателен метод ионного распыления — более 50 %, широко используется реактивное осаждение оксидов и нитридов (35 %) (рис. 4); наиболее универсальными, т. е. позволяющими получать пленки во всем диапазоне толщин от 1 до 100 нм, являются методы ионного распыления, химического и реактивного осаждения (рис.5).

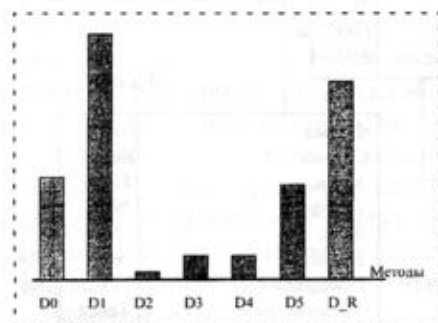


Рис. 4. Гистограмма статистического распределения методов нанесения тонких пленок в вакууме в технологии формирования сверхтонких пленок:

D0 — термическое испарение 17 %; D1 — ионное распыление 51 %; D2 — испарение взрывом 1 %; D3 — дуговое осаждение 8 %; D4 — ионное осаждение 8 %; D5 — химическое осаждение 15 %; D_R — реактивное осаждение 35 %

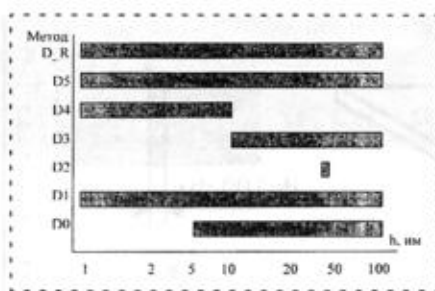


Рис. 5. Статистическое распределение методов нанесения тонких пленок в вакууме в зависимости от толщины h формируемой пленки

- Диапазон рабочих давлений в вакуумной камере (от 10^3 до 10^{-9} Па) и температур подложки (от 293 до 1273 К) свидетельствует о практической независимости толщины осаждаемой или выращиваемой пленки и, по-видимому, ожидаемых свойств пленки от давления и температуры (что вызывает достаточно много вопросов, для получения ответов на которые необходим дополнительный поиск).
- Не выявлены специфические способы подготовки поверхности перед нанесением пленки и обработки пленки после ее нанесения; используются традиционные обезжиривание, отмывка, сушка и ионная очистка перед нанесением и отжиг в вакууме после формирования пленки.
- Выявлены следующие особенности технологии:
 - диапазон мощности источников нанесения от 40 Вт до 5 кВт;
 - напряжение смещения на подложке 150—500 В;
 - диапазон скоростей осаждения или роста пленок от 0,01 до 1,4 нм/с;
 - в некоторых случаях применялись: чередование осаждения пленки с ее отжигом; параллельное подложке магнитное поле 0,01—0,04 Тл (при этом на 10 % увеличи-

валась скорость осаждения); импульсное эпитаксиальное наращивание; магнетронное осаждение пленки с одновременной обработкой пленки ионным пучком (для активации поверхности и травливания некристаллической фазы); подача на подложку перпендикулярного (13,56 МГц) и параллельного (0,78 МГц) высокочастотных электрических полей; использование низкочастотной (55 кГц) плазмы силансодержащей смеси для выращивания пленок α -SiC:H;

- Получены сверхтонкие пленки со следующими свойствами:
 - плотность записи информации более 10^8 бит/мм²;
 - размер блоков 15 нм;
 - атомная плотность $2,6 \times 10^{22}$ см⁻³;
 - ширина запрещенной зоны 3,54—3,7 эВ;
 - коэффициент преломления 2,25;
 - коэрцитивная сила более 1 кЭ;
 - удельное сопротивление 10^2 — 10^4 Ом/□ и 10^{14} Ом·см;
 - удельная емкость 150 мкФ/см²;
 - сила адгезии 10 МПа;
 - плотность 10^4 кг/м³;
 - микротвердость 50 ГПа (для сравнения — твердость алмаза 100 ГПа);
 - линейная интенсивность изнашивания $6,6 \cdot 10^{10}$;
 - наилучшие декоративные эффекты достигаются за счет развитой морфологии (шероховатости) при оптимальной толщине пленки 20—40 нм.

Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что, варьируя толщиной пленок, можно независимо от химического состава управлять свойствами материалов, например, получать ди-

электрические или полупроводниковые характеристики у металлов, достигать более высокой прочности и микротвердости, например, меди и алюминия по сравнению с титаном или сталью, а используя многокомпонентные, многофазные и многослойные пленки, можно формировать нанокompозитные материалы с очень широ-

ким диапазоном функциональных назначений.

Список литературы

1. **Технология тонких пленок** (справочник) / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Т. 2. М.: Сов. радио. 1977. 768 с.
2. **Самойлович Л. А., Самойлович С. М.** Получение 2D и 3D наноструктур на основе опаловых матриц и исследование некоторых их свойств / Тонкие плен-

ки в электронике. Тез. докл. XI международной научно-технической конференции, Йошкар-Ола, 2000. С. 57.

3. **Дмитриев С. Н., Кравец Л. И., Левкович Н. В., Елинсон В. М., Слепцов В. В., Потрясай В. В.** Модификация поверхности полиэтилентерефталатных трековых мембран в плазме аллилового спирта. — Препринт Р18—97—92, ОИЯИ, Дубна.

4. **Ковалев Л. К., Панфилов Ю. В.** Методы нанесения тонких пленок в вакууме / Справочник. Инженерный журнал, 1977. № 3. С. 20—28.

УДК 621.382:621.3.049.77

А. Г. Захаров, д-р техн. наук, проф.,
В. Н. Котов, канд. техн. наук,
Н. А. Кракотец, аспирант,
НИИ МВС ТРГУ (г. Таганрог)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕТТЕРИРОВАНИЯ ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИИ

Рассмотрена модель диффузии вещества в поле напряжений. Показано, что данная модель позволяет описать кинетику захвата примесных атомов дислокациями и другими возможными источниками локальных напряжений в полупроводниковом кремнии. Предложенная модель может быть использована для описания процесса геттерирования структурных точечных дефектов в кремнии нарушенном слое, сформированным электроимпульсной обработкой.

Введение

В настоящее время достигнут значительный прогресс в области контроля содержания примесей в полупроводниках. Тем не менее, проблема контроля электрически активных примесей в полупроводниковых кристаллах, способных изменять характеристики приборов, по-прежнему остается одной из главных и является предметом многочисленных исследований. Поскольку разработать технологический процесс, позволяющий получить полупроводниковые приборы, сенсорные структуры и интегральные микросхемы (ИС), полностью свободные от дефектов, практически невозможно, то очевидна необходимость разработки методик, позволяющих на определенной стадии процесса обнаружить загрязнения в структуре кристалла и удалить их из области локализации элементов ИС с помощью соответствующих геттеров. Разработка

методов геттерирования ведется весьма интенсивно, однако успех того или иного метода зависит от правильного понимания динамики дефектов и примесей в кристалле, а следовательно, от разработки адекватных моделей физических процессов геттерирования.

Геттерирование металлических примесей в кремнии

Для многих сверхбольших интегральных схем (СБИС), в частности для динамических схем памяти с произвольной выборкой, необходимо максимально снизить токи утечки $p-n$ -переходов. Биполярные транзисторы с узкой базовой областью очень чувствительны к наличию преципитатов металлических примесей (в основном атомов переходных металлов), находящихся в кремнии в виде силицидов, которые обладают высокой электропроводностью и могут шунтировать эмиттер и коллектор транзистора.

Приборы, изготовленные на основе МОП-структур, очень чувствительны к поверхностным дефектам. Локализованные на границе $Si-SiO_2$ поверхностные состояния формируют дополнительные энергетические уровни в запрещенной зоне кремния. Одной из причин появления поверхностных состояний являются атомы металлов.

Кроме того, загрязнение кремния быстродиффундирующими атомами металлов является одной из причин снижения его термостабильности [1].

Таким образом, целесообразна разработка методов удаления или деактивации металлических примесей из рабочих областей кремния. При разработке данных методов учитывается тот факт, что выделение металлических примесей может происходить на дислокациях и других локальных областях, являющихся источниками локальных напря-

электрические или полупроводниковые характеристики у металлов, достигать более высокой прочности и микротвердости, например, меди и алюминия по сравнению с титаном или сталью, а используя многокомпонентные, многофазные и многослойные пленки, можно формировать нанокompозитные материалы с очень широ-

ким диапазоном функциональных назначений.

Список литературы

1. **Технология тонких пленок** (справочник) / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Т. 2. М.: Сов. радио. 1977. 768 с.
2. **Самойлович Л. А., Самойлович С. М.** Получение 2D и 3D наноструктур на основе опаловых матриц и исследование некоторых их свойств / Тонкие плен-

ки в электронике. Тез. докл. XI международной научно-технической конференции, Йошкар-Ола, 2000. С. 57.

3. **Дмитриев С. Н., Кравец Л. И., Левкович Н. В., Елинсон В. М., Слепцов В. В., Потрясай В. В.** Модификация поверхности полиэтилентерефталатных трековых мембран в плазме аллилового спирта. — Препринт Р18—97—92, ОИЯИ, Дубна.

4. **Ковалев Л. К., Панфилов Ю. В.** Методы нанесения тонких пленок в вакууме / Справочник. Инженерный журнал, 1977. № 3. С. 20—28.

УДК 621.382:621.3.049.77

А. Г. Захаров, д-р техн. наук, проф.,
В. Н. Котов, канд. техн. наук,
Н. А. Кракотец, аспирант,
НИИ МВС ТРГУ (г. Таганрог)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕТТЕРИРОВАНИЯ ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИИ

Рассмотрена модель диффузии вещества в поле напряжений. Показано, что данная модель позволяет описать кинетику захвата примесных атомов дислокациями и другими возможными источниками локальных напряжений в полупроводниковом кремнии. Предложенная модель может быть использована для описания процесса геттерирования структурных точечных дефектов в кремнии нарушенном слое, сформированным электроимпульсной обработкой.

Введение

В настоящее время достигнут значительный прогресс в области контроля содержания примесей в полупроводниках. Тем не менее, проблема контроля электрически активных примесей в полупроводниковых кристаллах, способных изменять характеристики приборов, по-прежнему остается одной из главных и является предметом многочисленных исследований. Поскольку разработать технологический процесс, позволяющий получить полупроводниковые приборы, сенсорные структуры и интегральные микросхемы (ИС), полностью свободные от дефектов, практически невозможно, то очевидна необходимость разработки методик, позволяющих на определенной стадии процесса обнаружить загрязнения в структуре кристалла и удалить их из области локализации элементов ИС с помощью соответствующих геттеров. Разработка

методов геттерирования ведется весьма интенсивно, однако успех того или иного метода зависит от правильного понимания динамики дефектов и примесей в кристалле, а следовательно, от разработки адекватных моделей физических процессов геттерирования.

Геттерирование металлических примесей в кремнии

Для многих сверхбольших интегральных схем (СБИС), в частности для динамических схем памяти с произвольной выборкой, необходимо максимально снизить токи утечки $p-n$ -переходов. Биполярные транзисторы с узкой базовой областью очень чувствительны к наличию преципитатов металлических примесей (в основном атомов переходных металлов), находящихся в кремнии в виде силицидов, которые обладают высокой электропроводностью и могут шунтировать эмиттер и коллектор транзистора.

Приборы, изготовленные на основе МОП-структур, очень чувствительны к поверхностным дефектам. Локализованные на границе $Si-SiO_2$ поверхностные состояния формируют дополнительные энергетические уровни в запрещенной зоне кремния. Одной из причин появления поверхностных состояний являются атомы металлов.

Кроме того, загрязнение кремния быстродиффундирующими атомами металлов является одной из причин снижения его термостабильности [1].

Таким образом, целесообразна разработка методов удаления или деактивации металлических примесей из рабочих областей кремния. При разработке данных методов учитывается тот факт, что выделение металлических примесей может происходить на дислокациях и других локальных областях, являющихся источниками локальных напря-

жений в кристалле. Локальные напряжения в нерабочих областях кристалла можно создавать различными способами: абразивной или ударно-акустической обработкой, ионной имплантацией, лазерным облучением и диффузионным легированием. Предпочтение в создании нарушенных областей отдается методам с легко управляемым процессом формирования геттера и обеспечивающим высокую воспроизводимость его параметров. В [2] показано, что электроискровая (электроимпульсная) обработка (ЭИО) позволяет формировать локальные структурно-неоднородные области в кристаллах в любых технологических средах, причем метод отличается простотой проведения процесса и низкой стоимостью оборудования. В условиях выбранного режима ЭИО в приповерхностной области пластины кремния формируется нарушенный слой, содержащий микротрещины, мозаичные участки с искаженной структурой более глубоких слоев, а также поликристаллические участки. Деформация кристаллической решетки, обусловленная ЭИО, трансформируется при последующих высокотемпературных обработках в дислокации и в дефекты упаковки. Глубина залегания дефектной области может составлять 30–40 мкм, а при мягких режимах 10–15 мкм; возможно также создание нарушенного слоя глубиной, не превышающей 2 мкм.

Слой полупроводника, содержащий скопления дислокаций, обладает дальнедействующим полем упругих напряжений и способствует возникновению направленного движения примесных атомов из рабочих областей пластины к нарушенной области. Температурная обработка полупроводниковой структуры приводит к закреплению примесных атомов на дислокациях, причем формирование примесных атмосфер не изменяет дальнедействующий характер напряжений [3]. Таким образом, создание подобного геттера является очень эффективным, поскольку он работает в течение всего технологического процесса изготовления полупроводникового прибора.

В [4] установлена возможность эффективного предокислительного геттерирования точечных дефектов в процессе формирования МДП-структур ЭИО нерабочей поверхности кремниевой пластины. Эффективность геттерирования ЭИО определяется как наличием нарушенного слоя на поверхности, так и окисных выделений в объеме пластины кремния. Показано, что оптимальным для геттерирования дефектов является такой режим, при котором плотность энергии электроискрового разряда составляет 10–100 Дж·см⁻².

Моделирование процесса геттерирования электрически активных дефектов нарушенным слоем

Физическая модель процесса геттерирования примеси из рабочей стороны (РС) кремниевой пластины представлена на рис. 1. Будем считать, что примесь с концентрацией C_0 первоначально равномерно распределена в слое h , сформированном ЭИО обратной стороны (ОС) пластины, представляющем скопление дислокаций плотностью N_d . Процесс геттерирования можно описать следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} - v(x') \frac{\partial C(x, t)}{\partial x}; \quad (1)$$

$$v(x') = F(x') \frac{D}{kT}; \quad (2)$$

$$F(x') = - \frac{\partial E(x')}{\partial x}; \quad (3)$$

$$E(x') = - \frac{A}{\sqrt{x'}}. \quad (4)$$

Здесь: (1) — одномерное кинетическое уравнение диффузии вещества в поле напряжений $E(x')$; (2) и (3) — уравнения для скорости и силы взаимодействия вещества с полем напряжений соответственно; $A = 2\delta V(1 + \nu)\sigma L^{1/2}$, где δV — локальное изменение объема полупроводника при введении точечного дефекта (атома примеси); σ — сдвиговая компонента тензора упругих напряжений дислокационного скопления длиной L и толщиной h' ; D — коэффициент диффузии примеси; ν — коэффициент Пуассона для кремния.

Приведенная система уравнений имеет решение в виде

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \times \left(\operatorname{erf} \frac{h + (x - v(x')t)}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf} \frac{h - (x - v(x')t)}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (5)$$

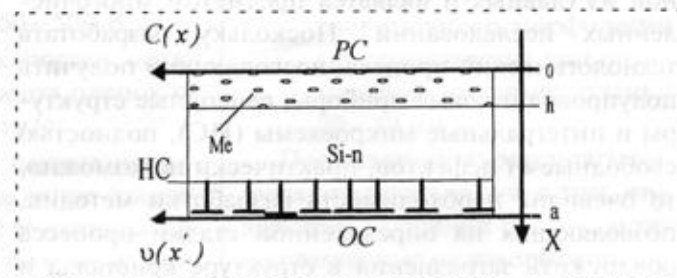


Рис. 1. Физическая модель процесса геттерирования

в случае диффузии вещества из слоя конечной толщины при следующих граничных условиях [5], удовлетворяющих выбранной модели:

- отсутствие потока вещества через границу $x = 0$, т. е.

$$j_D(x, t)|_{x=0} = -D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0;$$

- существование потока вещества, вызванного действием силового поля на границе $x = a$, где a — толщина кремниевой пластины, т. е.

$$j_D(x', t)|_{x=a} = C(x', t) v(x'), \quad \text{где } x' = a - x.$$

Поле напряжений в окрестности скопления краевых дислокаций аналогично полю напряжений у вершины сдвиговой трещины и определяется выражением (4) [6]. Максимальное значение сдвиговой компоненты тензора упругих напряжений скопления дислокаций согласно [7] связано с параметрами нарушенного слоя для случая $h'/L \ll 1$ следующим соотношением:

$$\sigma \approx \frac{\mu b}{2\pi(1-\nu)} N_d 2h';$$

где μ , b — модуль сдвига, вектор Бюргера для кремния соответственно.

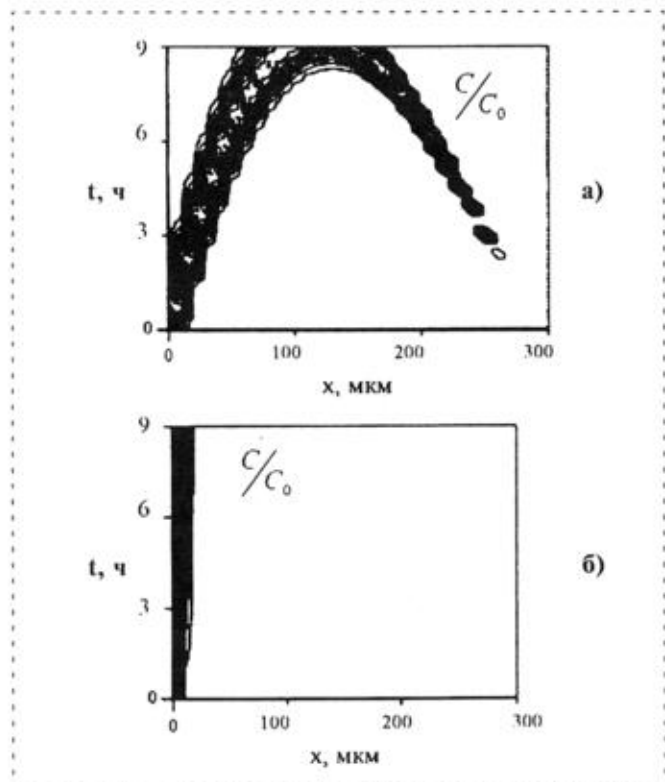


Рис. 2. Контуры диффузионных потоков атомов Al: а — в поле напряжений; б — в отсутствии поля напряжений

Изложенные соотношения (1)–(5) были использованы для моделирования процесса геттерирования атомов Al и Cu из рабочей стороны кремниевой пластины нарушенным слоем толщиной 5 мкм с плотностью дислокаций $N_d = 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, сформированным ЭИО на обратной стороне. Результаты представлены на рис. 2 и 3.

На рисунках видно, что наличие на обратной стороне пластины кремния структурно-нарушенных областей, обладающих дальнедействующими полями упругих напряжений, приводит к ускоренной диффузии атомов металлов из рабочей стороны в направлении действия градиента напряжений. Полученные данные указывают на целесообразность использования для геттерирования атомов быстродиффундирующих металлов (Cu, Au, Fe и др.) импульсной термической обработки [8], а также на необходимость более продолжительного отжига для геттерирования медленнодиффундирующих примесей, к которым, в частности, относится Al.

Очевидно, что для сокращения времени геттерирования медленнодиффундирующих примесей необходимо конструктивно уменьшать расстояние между примесной зоной и зоной геттера полупроводникового прибора. В настоящее время для изготовления датчиков давления, ускорения, темпе-

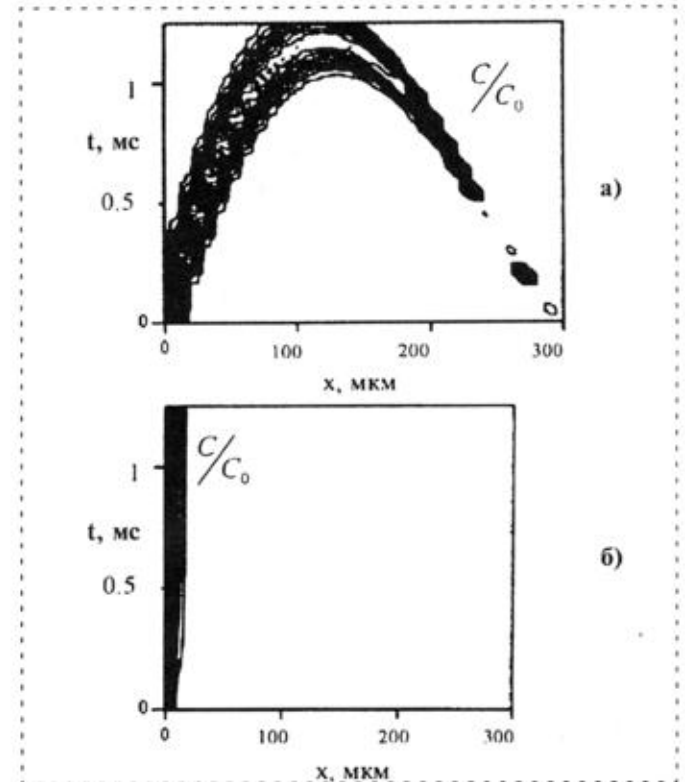


Рис. 3. Контуры диффузионных потоков атомов Cu: а — в поле напряжений; б — в отсутствии поля напряжений

ратуры и других применяются полупроводниковые пластины, выполненные с использованием МЭМС-технологии в виде мембран толщиной от 30 до 50 мкм [9]. Следует ожидать, что ЭИО и последующая импульсная термическая обработка обратной стороны пластины-мембраны будет способствовать эффективному геттерированию медленнодиффундирующих примесей и формированию активных областей указанных приборов с улучшенными электрическими характеристиками. Аналогичные расчеты для предложенной модели показали, что при уменьшении расстояния между нарушенным и примесным слоем в 10 раз время геттерирования атомов Al в кремниевой пластине-мембране сокращается 100 раз и составляет порядка 10 мин.

Таким образом, разработанная модель процесса геттерирования позволяет выбирать оптимальную температуру и оптимальное время технологического процесса геттерирования электрически активных примесей в кремнии нарушенными областями, а также формулировать требования по созданию нарушенных областей методом ЭИО поверхности кремниевой пластины.

Экспериментально получено, что воздействие электромагнитных колебаний на кремниевые структуры, содержащие разупорядоченные области, приводит к локальному выделению энергии излучения в указанных областях кремния и активации в них диффузионных процессов [10, 11]. В [10] показана возможность термофотостимулированного легирования кремния в условиях предварительного действия на структуру кремния электрического разряда и последующей термообработки электромагнитным излучением ИК-диапазона. При этом получены локальные области, легированные бором и алюминием, по физическим параметрам не отличающиеся от полученных в результате ЭИО и последующего длительного термиче-

ского отжига. Однако температура обрабатываемых подложек в данном случае может быть снижена в процессе легирования в 3–5 раз. Кроме того, локальные структурно-неоднородные области, сформированные ЭИО, в условиях термообработки ИК-излучением являются эффективными геттерами. Таким образом, дальнейшее совершенствование модели предполагает учет градиента температур, возникающего в результате ИК-облучения нарушенной ЭИО поверхности полупроводника и способствующего направленной миграции структурных точечных дефектов из объема полупроводника к сформированным разупорядоченным областям.

Список литературы

1. Брикевич Д. И., Крюков В. П., Петров В. В. и др. Ускоренная генерация термодоноров в кремнии // Электронная техника. Материалы (260), 1991. Вып. 6. С. 15–16.
2. Сеченов Д. А., Захаров А. Г., Беспятов В. В. Формирование в кремнии локальных дислокационных областей электроискровым разрядом // Электронная обработка материалов. 1975, № 2. С. 14–17.
3. Орлов А. Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высшая школа, 1983. 144 с.
4. Захаров А. Г., Сеченов Д. А., Беспятов В. В., Котов В. Н. Геттерирование дефектов в кремнии электроискровой обработкой // Электронная обработка материалов. 1989. № 1. С. 9–11.
5. Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 1961. 462 с.
6. Любов Б. Я., Власов Н. М. Некоторые эффекты взаимодействия точечных и протяженных структурных дефектов // Физика металлов и металловедение. (47), 1979. С. 140–147.
7. Масюкевич А. М., Рябошапка К. П. Поля напряжений и энергии дислокаций, хаотически распределенных в слое и стенке // Металлофизика. 1975. Вып. 62. С. 3–9.
8. Diffusion and transient trapping of metals in silicon / Wong—Leung J. // Phys Rev. B. 1999, (59). N 12. P. 7990–7998.
9. Каляев И. А., Котов В. Н., Клиндухов В. Г., Кухаренко А. П. Микроэлектронные сенсорные системы: опыт создания и применения // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 32–36.
10. Котов В. Н. Термополевое легирование кремния: Дис. канд. техн. наук: 05.27.01. Таганрог, 1986. 229 с.
11. Котов В. Н., Клиндухов В. Г., Черепашин И. И. Модификация структуры и оптических свойств кремния электроимпульсной обработкой // Микросистемная техника. 2000. № 3. С. 8–10.

"Электроника и информатика — XXI век"

В г. Зеленограде (Москва) в Московском государственном институте электронной техники (Техническом университете) состоялась Третья Международная научно-техническая конференция "Электроника и информатика — XXI век". Сопредседатель конференции — ректор МИЭТ Ю. А. Чаплыгин (член редколлегии журнала "Микросистемная техника")

Работа конференции проходила по следующим секциям:

- Физика и технология микро- и наноэлектроники
- Материалы и оборудование электронной техники
- Проектирование ИС и систем
- Микросистемы и микромеханика
- Информационно-управляющие системы
- Телекоммуникационные системы и связь
- Биомедицинская электроника
- Менеджмент и маркетинг в электронике
- Гуманитарные проблемы информатизации

УДК 621.3

Н. И. Нургазизов, А. А. Бухараев, Д. В. Овчинников, А. А. Можанова,
Казанский физико-технический институт КНЦ РАН
e-mail: niagn@kfti.kcn.ru

ВОПРОСЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ ЖИДКОСТЬ—ТВЕРДОЕ ТЕЛО С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

Рассмотрены вопросы сравнения компьютерных и реальных АСМ-экспериментов по травлению в HF приповерхностного слоя SiO₂, подвергнутого высокодозовой бомбардировке ионами Fe⁺ с энергией 40 кэВ.

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) позволяет проводить исследования топографии поверхности с высоким пространственным разрешением. Дополнительным преимуществом АСМ является возможность изучать поверхность твердого тела в жидкой среде, что позволяет проводить измерения непосредственно *in situ* во время процессов химического травления или растворения вещества [1]. Если компоненты, из которых состоит исследуемый образец, имеют различную скорость травления, то на основе анализа получаемой с помощью АСМ информации можно делать выводы о структуре и составе исследуемого образца. Значительный интерес при этом представляют многофазные наноструктурированные объекты.

К сожалению, на основе анализа изображений, получаемых с помощью АСМ, не всегда удается сделать однозначный вывод о механизмах травления таких объектов. Компьютерное моделирование АСМ-изображений, полу-

чаемых при травлении подобных структур, позволяет существенно продвинуться в понимании физико-химических процессов на границе между жидкостью и твердым телом. Количественной характеристикой, описывающей кинетику формирования микро- и нанорельефа в процессе травления, является изменение со временем параметров шероховатости отображаемого в АСМ участка поверхности. Совпадение морфологий модельных и экспериментальных АСМ-изображений, а также зависимостей параметров шероховатости поверхности от времени травления дает основание быть уверенным в состоятельности предложенной структурной модели и механизма селективного травления.

Данная статья посвящена сравнению компьютерных и реальных АСМ-экспериментов по травлению в HF приповерхностного слоя SiO₂, подвергнутого высокодозовой бомбардировке ионами Fe⁺ с энергией 40 кэВ. Такие образцы представляют собой двухфазную наноструктуру, представляющую собой диоксид кремния с диспергированными в нем изолированными наночастицами α-Fe. Размеры и форма наночастиц α-Fe зависят от дозы облучения [2].

Мы проводили травление образцов в водных растворах HF с концентрацией 0,025–1% в специально сконструированной нами жидкостной ячейке АСМ. Для работы использовался зондовый микроскоп Solver P4-SPM-18RM. Последовательность изображений поверхности, полученных с помощью АСМ во время эксперимента по травлению образца с дозой облучения $0,8 \times 10^{17}$ ион/см², приведена на рис. 1. Первоначально на основе анализа АСМ-измерений мы предположили, что наблюдаемое изменение морфологии поверхности при травлении объясняется тем, что наночастицы железа травятся медленнее, чем диоксид кремния [3]. Однако более поздние исследования, при которых АСМ-изображения после травления сопоставлялись с данными ФМР и оптической спектрофотометрии этих же образцов, привели к выводу, что наночастицы α-Fe в водных растворах HF растворяются значительно быстрее, чем диоксид кремния.

Известные к настоящему времени данные о структуре таких объектов позволяют считать, что при относительно малых дозах облучения (до 10^{17} ион/см²) наночастицы α-Fe имеют размеры в пределах от 20 до 200 нм и практически все заглублены в приповерхностном слое (рис. 2) и защищены сверху тонким слоем SiO₂, толщиной около 5 нм, поэтому процесс их растворения в HF начинается только после растворения этого защитного слоя [2, 4].

На первом этапе был смоделирован процесс формирования наночастиц из ионов железа. Для этого применялся алгоритм, сходный с тем, который использовался в работе [5] при моделировании получения наночастиц железа из ионов Fe⁺, имплантированных в поверхность кристалла сапфира. Расчет мессбауэровских спектров на основе этой мо-

Исследования поддержаны РФФИ (грант 98-03-32753) и Министерством науки и технологий РФ (Программа "Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники", грант 02.04.3.1.40.Э.22).

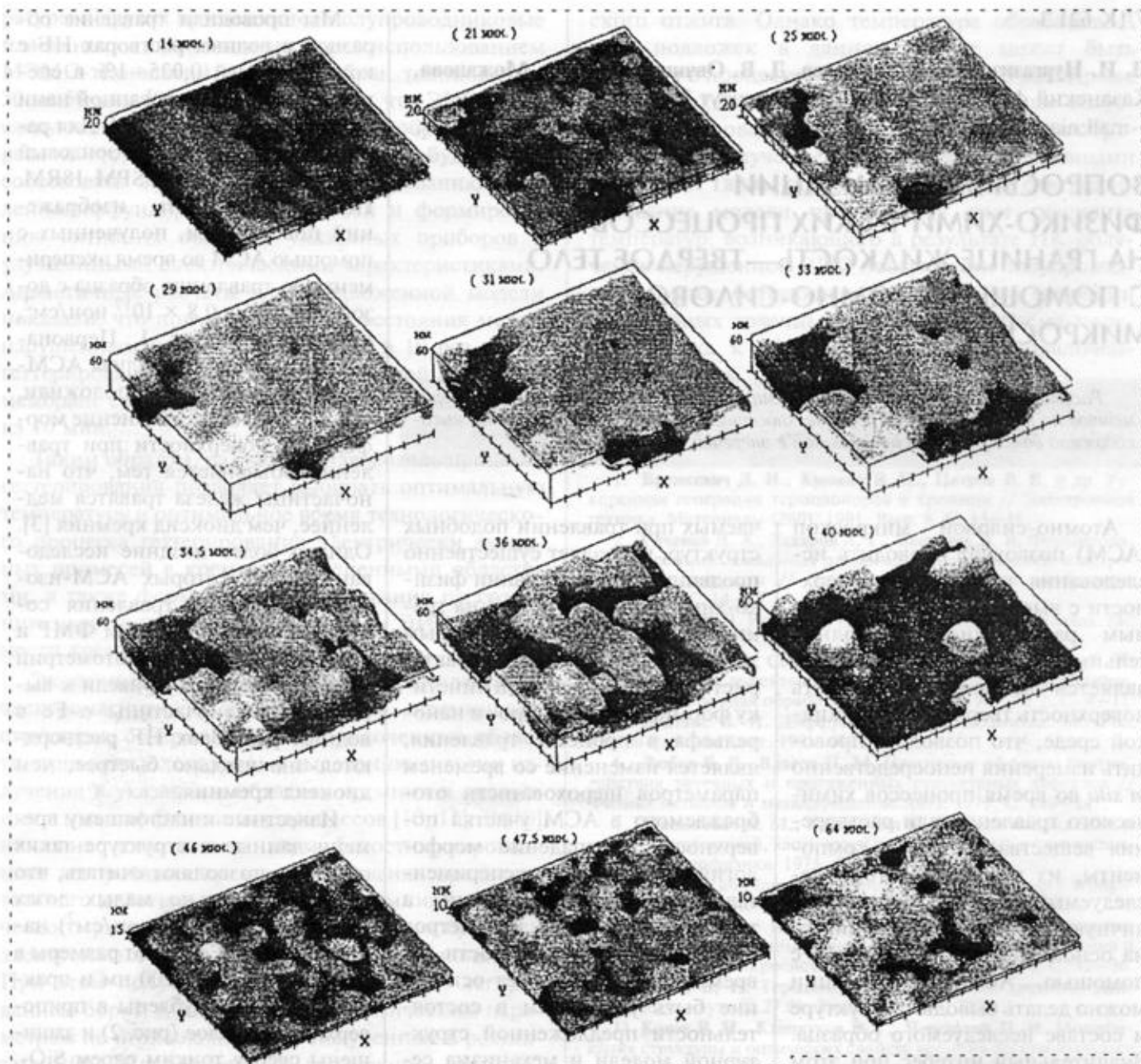
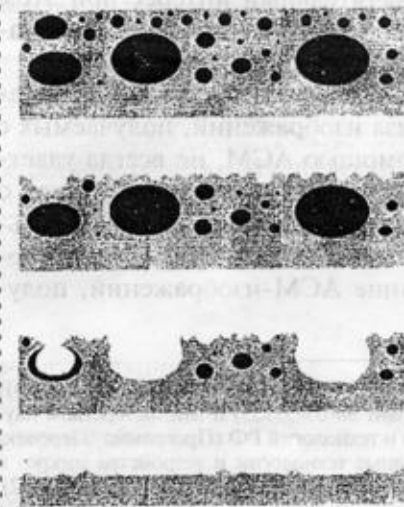


Рис. 1. Серия АСМ-изображений одного и того же участка поверхности SiO_2 , содержащего диспергированные наночастицы $\alpha\text{-Fe}$, полученная при травлении в 0,05 %-м водном растворе HF . В скобках указано время от начала травления. Масштаб X, Y : 100 нм

дели, выполненный в работе [5], показал хорошее совпадение с результатами эксперимента. Суть этого алгоритма состоит в том, что после того, как ион внедряется в приповерхностный слой, он создает напряжение в окружающей его решетке. Эти напряжения вызывают, в свою очередь, появление дефектов, и чем больше напряжение в какой-либо области приповерхностного слоя,

тем больше в этой области дефектов. За счет эффекта диффузии ионы железа перемещаются и начинают скапливаться в областях, где больше всего дефектов, и в этих областях начинают расти наночастицы железа. С помощью такого алгоритма из слу-

Рис. 2. Схема развития микрорельефа при травлении SiO_2 , содержащего наночастицы $\alpha\text{-Fe}$. Черным цветом обозначены наночастицы, серым — SiO_2



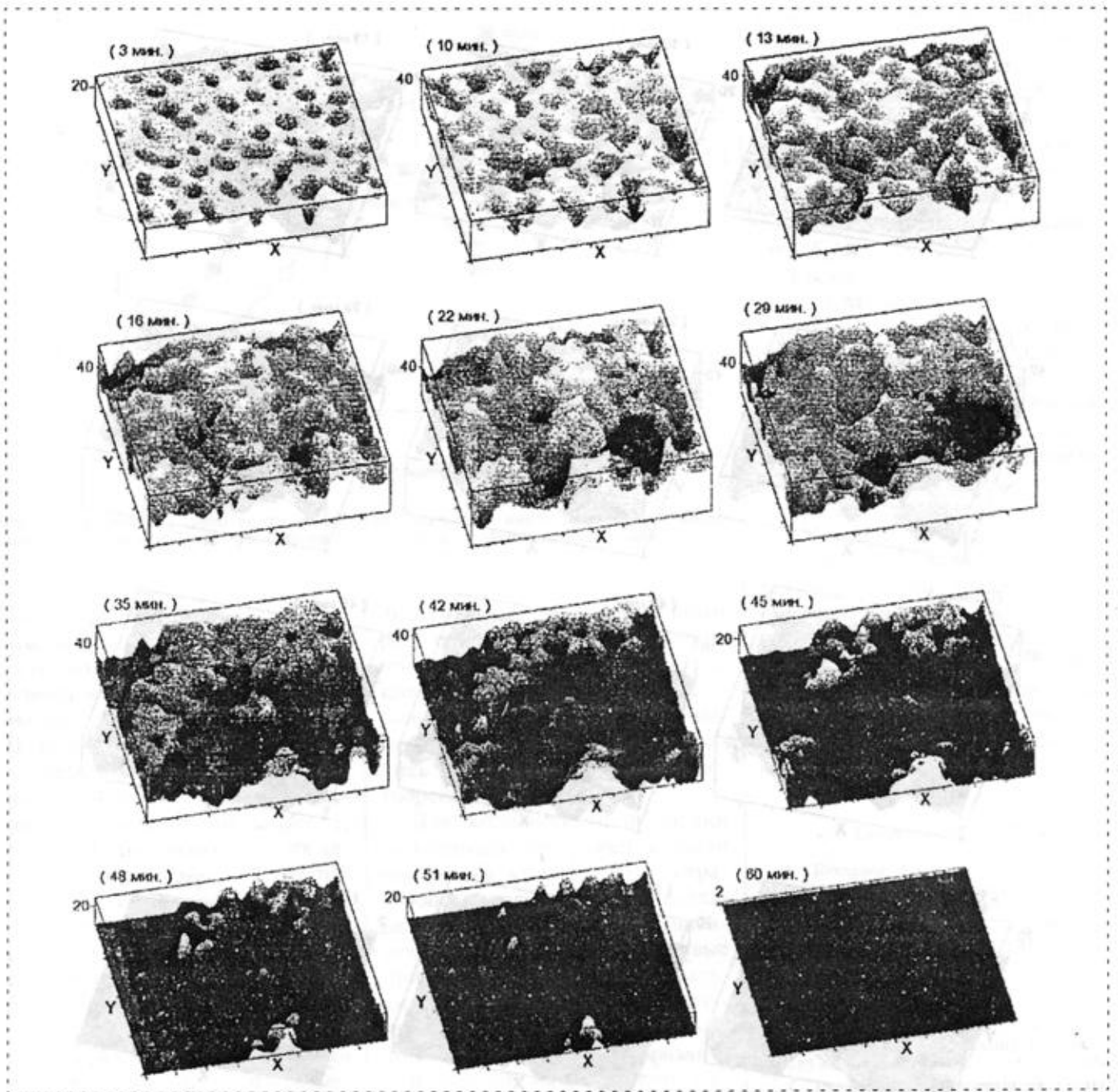


Рис. 3. Серия смоделированных трехмерных изображений, отражающая последовательную трансформацию одного и того же участка поверхности при селективном химическом травлении двухфазной наноструктуры. В скобках указано время от начала травления. Масштаб X, Y: 100 нм

чайного распределения ионов Fe^+ в образце была получена виртуальная структура, представляющая собой матрицу с распределенными в ней отдельно расположенными наночастицами с размерами от 20 до 150 нм. Это хорошо согласуется с данными, полученными с помощью про-

свечивающей электронной микроскопии для реальных образцов [2]. При моделировании процесса образования наночастиц число ионов железа, внедряемых в матрицу, бралось равным дозе облучения $0,8 \times 10^{17}$ ион/см².

После получения модельной структуры, содержащей наноча-

стицы, нами был смоделирован процесс ее химического травления. При моделировании этого процесса скорость травления наночастиц α -Fe задавалась в пять раз выше, чем скорость травления SiO_2 . На рис. 2 схематически показан процесс трансформации образца при таком селективном

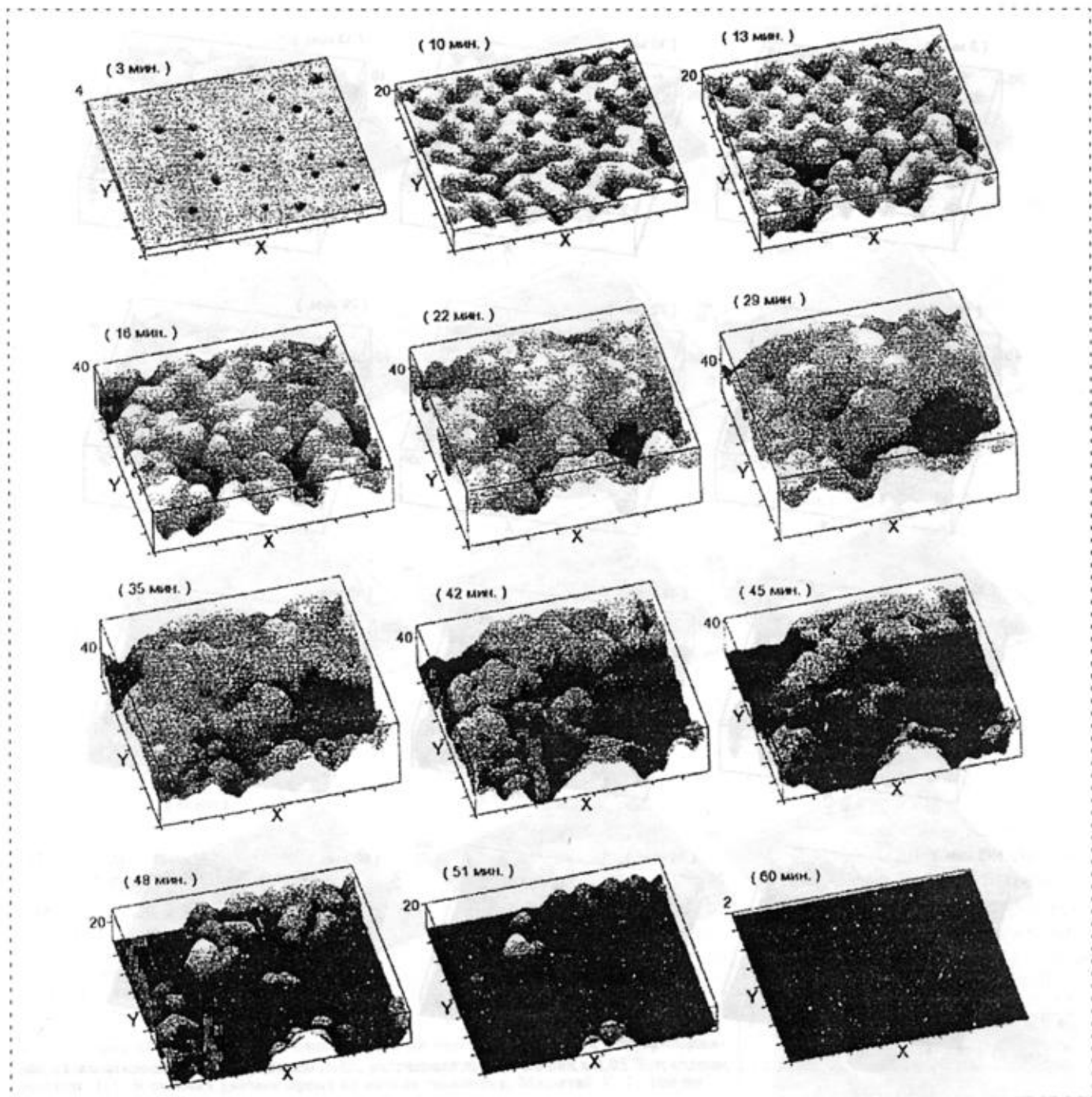


Рис. 4. Смоделированные с помощью компьютера АСМ-изображения, отражающие последовательную трансформацию одного и того же участка поверхности, представленного на рис. 3, при селективном химическом травлении двухфазной наноструктуры. В скобках указано время от начала травления. Масштаб X, Y: 100 нм

травлении. На рис. 3 представлена серия компьютерных трехмерных изображений, отражающих последовательную трансформацию одного и того же участка поверхности при селективном травлении такой двухфазной наноструктуры. Хорошо видно, как за

счет растворения наночастиц развивается микрорельеф поверхности. Однако при наблюдении за процессом химического травления с помощью АСМ получаемые изображения представляют собой свертку изображения поверхности и изображения иглы

АСМ (так называемый эффект конволюции). Для того чтобы учесть влияние этого эффекта, мы смоделировали процесс сканирования иглой АСМ участков поверхности, представленных на рис. 3. При этом мы использовали иглу, представляющую собой

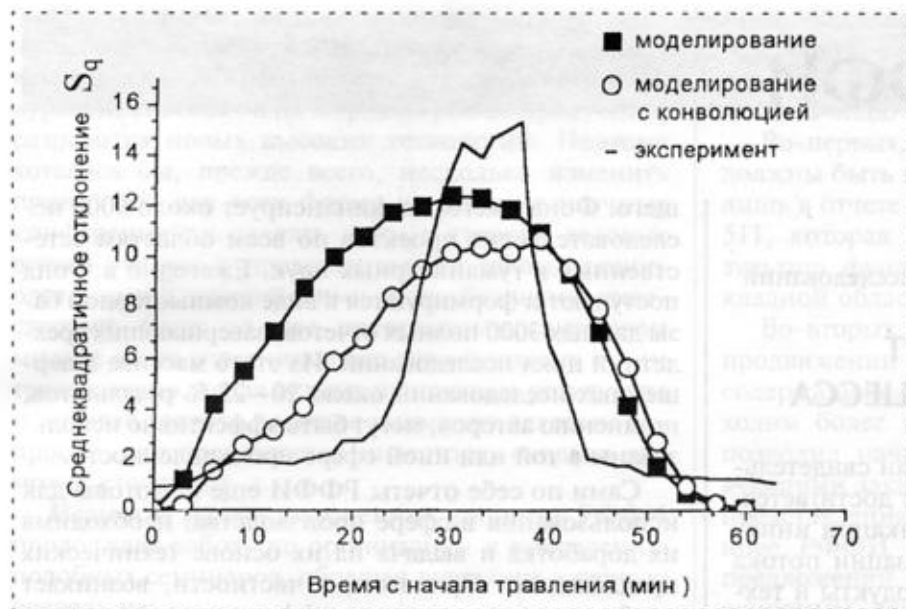


Рис. 5. Зависимость параметра среднеквадратичного отклонения от времени при травлении двухфазной наноструктуры (экспериментальные и смоделированные кривые)

полусферу с радиусом 125 нм, что, по нашим оценкам, близко к размерам кончика иглы АСМ, с помощью которой проводились экспериментальные измерения. Полученная серия изображений приведена на рис. 4. При сравнении этой серии с изображениями, представленными на рис. 1, хорошо видно совпадение их характерных особенностей. На начальном этапе в обоих случаях отсутствует сильно развитый рельеф из-за того, что игла пока еще не проникает в поры, которые остались от мелких наночастиц, лежащих у поверхности. Затем появляются провалы, они начинают увеличиваться в размерах, происходит вытравливание наночастиц и дальнейшее растворивание оставшихся от них пор. И на конечном этапе, когда имплантированный слой практически полностью растворился, остаются одиночные выступы из

диоксида кремния, форма которых сильно зависит от формы кончика иглы АСМ. Именно такие выступы ранее были ошибочно приняты за отдельные наночастицы α -Fe, которые оставались на поверхности после растворения SiO_2 .

Для количественной оценки полученных изображений были построены кривые $S_q(t)$, отражающие изменение среднеквадратичного отклонения в зависимости от времени. Эти кривые приведены на рис. 5. Как компьютерные, так и экспериментальные зависимости $S_q(t)$ имеют колоколообразную форму с различной шириной на полувысоте. Существенно, что полуширина пика, полученного на основе модельных АСМ-изображений, после учета эффекта свертки игла-образец становится существенно уже и приближается по форме к экспериментальному. Очевидно,

подбирая параметры структуры образца (размер и распределения наночастиц α -Fe), степень селективности травления, форму и размер кончика иглы наиболее близкими к реальным, можно в принципе добиться максимального совпадения компьютерных и экспериментальных зависимостей $S_q(t)$.

Таким образом, компьютерный АСМ-эксперимент дал достаточно хорошее совпадение с результатами реальных АСМ-измерений, что подтверждает адекватность заложенных в него модельных представлений о структуре образца и механизме травления в HF диоксида кремния, содержащего наночастицы железа. Можно утверждать, что использование компьютерного моделирования при анализе АСМ-изображений дает дополнительную возможность проверить правильность представлений о структуре многофазных объектов, механизмах их травления и особенностях формирования изображений в АСМ.

Список литературы

1. Бухараев А. А., Нургазизов Н. И., Можанова А. А., Овчинников Д. В. Микроэлектроника, 1999. Т. 28. № 5. С. 385–394.
2. Бухараев А. А., Казаков А. В., Манапов Р. А., Хайбуллин И. Б. ФТТ, 1991, № 33. С. 1018–1026.
3. Бухараев А. А., Можанова А. А., Нургазизов Н. И., Овчинников Д. В. Материалы Всероссийского совещания "Зондовая микроскопия 99", Нижний Новгород. 10–13 марта. С. 91–97.
4. Бухараев А. А., Нургазизов Н. И., Можанова А. А., Овчинников Д. В. Прикладная химия, 2000 (принята в печать).
5. Kobayashi T., Nakanishi A., Fukumura K., Langouche G. J. Appl. Phys. 1998. V. 83. № 9. P. 4631–4641.
6. Зондовая микроскопия—2000. Материалы совещания. Нижний Новгород (28.02–02.03.2000). Институт физики микроструктур РАН.

СТРАНИЧКА РФФИ

С. А. Цыганов, д-р физ.-мат. наук,
И. П. Тихонов, канд. техн. наук,
Российский Фонд фундаментальных исследований

СЕМИНАРЫ РФФИ — СТАРТ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Опыт промышленно развитых стран свидетельствует о том, что экономический рост достигается, в первую очередь, за счет интенсификации инновационной деятельности, т. е. реализации потока научных идей, открытий в новые продукты и технологии, существенного сокращения сроков прохождения инновационного цикла.

Мировая практика показывает, что в условиях рыночной экономики очень важен процесс коммерциализации результатов научных исследований и разработок. В условиях глобализации НИОКР и обострения конкуренции на всем мировом пространстве важнейшим фактором успеха для получения коммерческих результатов в реализации научных достижений является определение успешных идей уже на ранних стадиях.

В России в настоящее время разорвана естественная цепь "фундаментальная наука—прикладная наука—промышленность". Таким образом, в восстановлении взаимодействия в цепи "наука—производство", в запуске ускоренного инновационного механизма — суть необходимых реформ.

Мировой опыт говорит о том, что необходимо создавать инновационную систему, ориентированную на малое предпринимательство. И здесь особую роль могут сыграть именно научные фонды России, с участием которых и могла бы быть создана такая инновационная система. По существу, даже в сегодняшнем состоянии государственные научные фонды играют роль инновационных структур в стране. При этом, например, РФФИ может сыграть роль катализатора инновационного процесса, так как он стоит в самом начале инновационной цепи — на этапе рождения идеи.

Хотя основу для финансовой поддержки РФФИ составляют фундаментальные исследования, как правило, еще далекие от практического использования, тем не менее элементы инновационной деятельности становятся важным направлением Фонда.

РФФИ обладает уникальным продуктом — систематизированным, постоянно растущим банком знаний, в котором находятся идеи многих продуктов и технологий ближайшего и отдаленного буду-

щего. Фонд ежегодно финансирует около 9000 исследовательских проектов по всем областям естественных и гуманитарных наук. Ежегодно в Фонд поступают и формируются в виде компьютерной базы данных 3000 полных отчетов, завершающих трехлетний цикл исследований. Из этого массива завершенных исследований около 20—25 % результатов, по мнению авторов, могут быть эффективно использованы в той или иной сфере промышленности.

Сами по себе отчеты РФФИ еще не готовы для использования в сфере производства, необходима их доработка и выдача на их основе технических предложений. При этом, в частности, возникает необходимость создания эффективных механизмов экономической оценки научных разработок, имеющих высокую вероятность успешной коммерциализации. Таким образом, мы находимся на пути, где Фонд приобретает функции организации, которая не просто распределяет госбюджетные средства в сфере науки, но и становится источником инновационных идей для промышленного сектора.

В РФФИ специально созданным отделом уже несколько лет ведется работа по оказанию помощи грантодержателям в использовании результатов выполненных проектов. Эта работа имеет две основные составляющие:

- проведение дополнительного анализа результатов проектов в целях постановки прикладных разработок,
- развитие связей с заказывающими организациями, инвестиционными фондами и т. д.

Эффективно пройти показанные пути, где знания превращаются в форму, понятную инженерам и технологам, помогают специальные семинары РФФИ.

Семинары РФФИ являются одним из звеньев в сложном процессе упорядочивания взаимоотношений между ученым, обладающим интеллектуальным продуктом, и представителями крупного, среднего и малого бизнеса, а также представителями государственных промышленных предприятий. Именно на этих семинарах результаты высокотехнологичных научных проектов, в той или иной степени готовых к внедрению, представляются в наиболее ясной и удобной форме для партнера-инвестора и содержат также оценку потребностей рынка. Кроме того, именно на семинаре ученый-разработчик получает опыт презентации своих результатов.

Семинары РФФИ проводятся вот уже два года. Начало было положено весной 1997 года по инициативе ученых С.-Петербургского Физико-технического института.

Основная цель этих семинаров — способствовать продвижению результатов фундаментальных исследований в практические дела: создание конкурентноспособной на мировом рынке продукции, разработка новых высоких технологий. Поэтому хотелось бы, прежде всего, несколько изменить привычную для всех форму проведения научных конференций и сделать шаги в сторону деловых встреч ученых с представителями заказывающих организаций, российскими и зарубежными инвесторами. Судя по уже проведенным семинарам многие из их участников все-таки подходят к ним традиционно, делая акцент на научные результаты и забывая уделять должное внимание деловым вопросам: что предлагается инвестору, сколько это может стоить и т. д.

Несмотря на ряд нерешенных вопросов РФФИ продолжает работу по организации и проведению подобных семинаров, обращая внимание в первую очередь на:

- ♦ создание базы данных РФФИ по инновационным предложениям,
- ♦ работу с заказывающими организациями и инвесторами (заключение соглашений),
- ♦ представление результатов РФФИ на выставках, конференциях (в режиме "Поиск партнера").

Несомненно, материалы семинаров РФФИ содержат ценную информацию, которая для дальнейшего эффективного продвижения, например в НИИ и промышленность, как правило, нуждается в соответствующей специальной доработке. Имеется в виду преобразование информации в форму, близкую к техническим предложениям. Если авторы проектов РФФИ заинтересованы в продвижении полученных результатов, у них есть достаточ-

но путей, даже в нынешнее тяжелое время. Мы же предлагаем остановиться на пути, который идет через РФФИ, и где можно рассчитывать на помощь Фонда.

Во-первых, и это прежде всего, предложения должны быть в базе Фонда. Для этого нужно всего лишь в отчете по проекту РФФИ заполнить форму 511, которая информирует о использовании результата фундаментальных исследований в прикладной области.

Во-вторых, для того чтобы оказывать помощь в продвижении результата, конечно, информации, содержащейся в этой форме недостаточно. Необходимо более конкретный материал, который бы позволил начать деловые контакты с соответствующими заказывающими организациями. Форма представления такого материала имеется. На ее основе РФФИ ежегодно формирует сводный том предложений, который предоставляется нашим основным деловым партнерам (Минпромнауки, МЧС, Минобороны, различным фондам и т. д.)

В-третьих, имея постоянные хорошие контакты с рядом научно-инновационных организаций, Фонд поручает им определенную доводку ограниченного числа отобранных проектов до уровня, близкого к техническим предложениям.

Ниже приведены аннотационные отчеты, полученные в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики и поддержанные РФФИ по итогам конкурса 1997 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

Надеемся, что представленные результаты помогут ускорить развитие микросистемной техники в XXI веке.

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Численное моделирование ламинарных и турбулентных дозвуковых течений газовых смесей с учетом химических реакций и теплообмена в трехмерных областях сложной конфигурации

Номер проекта: 97-01-00770-а
Год предоставления отчета: 1997

Проект посвящен численному моделированию аэродинамики и теплообмена применительно к внутренним трехмерным течениям реагирующих

газовых смесей при учете смешанной конвекции. Уравнения записываются в обобщенных криволинейных координатах. В основе описания течений многокомпонентной газовой смеси при наличии физико-химических превращений лежат полные трехмерные нестационарные уравнения Навье—Стокса, которые затем уже дополняются законами сохранения вещества и энергии при наличии химических реакций и турбулентности. Поэтому в течение 1997 г. основное внимание уделялось численным алгоритмам решения уравнений Навье—Стокса. Акцент делался на применение неразнесенных сеток, поскольку использование таких сеток может существенно упростить программирование, уменьшить потребность в памяти и времени

Основная цель этих семинаров — способствовать продвижению результатов фундаментальных исследований в практические дела: создание конкурентноспособной на мировом рынке продукции, разработка новых высоких технологий. Поэтому хотелось бы, прежде всего, несколько изменить привычную для всех форму проведения научных конференций и сделать шаги в сторону деловых встреч ученых с представителями заказывающих организаций, российскими и зарубежными инвесторами. Судя по уже проведенным семинарам многие из их участников все-таки подходят к ним традиционно, делая акцент на научные результаты и забывая уделять должное внимание деловым вопросам: что предлагается инвестору, сколько это может стоить и т. д.

Несмотря на ряд нерешенных вопросов РФФИ продолжает работу по организации и проведению подобных семинаров, обращая внимание в первую очередь на:

- ♦ создание базы данных РФФИ по инновационным предложениям,
- ♦ работу с заказывающими организациями и инвесторами (заключение соглашений),
- ♦ представление результатов РФФИ на выставках, конференциях (в режиме "Поиск партнера").

Несомненно, материалы семинаров РФФИ содержат ценную информацию, которая для дальнейшего эффективного продвижения, например в НИИ и промышленность, как правило, нуждается в соответствующей специальной доработке. Имеется в виду преобразование информации в форму, близкую к техническим предложениям. Если авторы проектов РФФИ заинтересованы в продвижении полученных результатов, у них есть достаточ-

но путей, даже в нынешнее тяжелое время. Мы же предлагаем остановиться на пути, который идет через РФФИ, и где можно рассчитывать на помощь Фонда.

Во-первых, и это прежде всего, предложения должны быть в базе Фонда. Для этого нужно всего лишь в отчете по проекту РФФИ заполнить форму 511, которая информирует о использовании результата фундаментальных исследований в прикладной области.

Во-вторых, для того чтобы оказывать помощь в продвижении результата, конечно, информации, содержащейся в этой форме недостаточно. Необходимо более конкретный материал, который бы позволил начать деловые контакты с соответствующими заказывающими организациями. Форма представления такого материала имеется. На ее основе РФФИ ежегодно формирует сводный том предложений, который предоставляется нашим основным деловым партнерам (Минпромнауки, МЧС, Минобороны, различным фондам и т. д.)

В-третьих, имея постоянные хорошие контакты с рядом научно-инновационных организаций, Фонд поручает им определенную доводку ограниченного числа отобранных проектов до уровня, близкого к техническим предложениям.

Ниже приведены аннотационные отчеты, полученные в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики и поддержанные РФФИ по итогам конкурса 1997 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

Надеемся, что представленные результаты помогут ускорить развитие микросистемной техники в XXI веке.

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Численное моделирование ламинарных и турбулентных дозвуковых течений газовых смесей с учетом химических реакций и теплообмена в трехмерных областях сложной конфигурации

Номер проекта: 97-01-00770-а
Год предоставления отчета: 1997

Проект посвящен численному моделированию аэродинамики и теплообмена применительно к внутренним трехмерным течениям реагирующих

газовых смесей при учете смешанной конвекции. Уравнения записываются в обобщенных криволинейных координатах. В основе описания течений многокомпонентной газовой смеси при наличии физико-химических превращений лежат полные трехмерные нестационарные уравнения Навье—Стокса, которые затем уже дополняются законами сохранения вещества и энергии при наличии химических реакций и турбулентности. Поэтому в течение 1997 г. основное внимание уделялось численным алгоритмам решения уравнений Навье—Стокса. Акцент делался на применение неразнесенных сеток, поскольку использование таких сеток может существенно упростить программирование, уменьшить потребность в памяти и времени

счета, особенно при решении трехмерных задач в криволинейных координатах, при использовании неортогональных, адаптивных сеток или при многосеточных и многоблочных подходах. В качестве базового выбран алгоритм SMAC, хотя в ряде примеров использовался и ранее реализованный алгоритм SIMPLE-C. Проведены сравнительные тестовые расчеты для случая изотермических течений в трехмерных областях. Для решения линейных систем большой размерности реализован алгоритм на основе метода сопряженных градиентов, известный как CGSTAB.

Велась разработка учета многостадийных химических реакций в потоке. В качестве источников в уравнения баланса компонентов входят фактически уравнения химической кинетики, решение которых достаточно трудоемко в связи с их "жесткостью". Внедрен в программу ряд вариантов метода Розенброка в адаптации Е. А. Новикова.

При численном решении задач аэродинамики в трехмерных физических областях сложной конфигурации построение расчетной сетки становится важным и неизбежным промежуточным этапом решения всей задачи. В данном проекте разработаны два способа формирования сеток. Первый основан на решении уравнений Лапласа относительно искомым координат в физической области. Второй способ базируется на минимизации специально заданных функционалов гладкости и ортогональности.

В качестве одного из прикладных примеров рассмотрена задача моделирования распространения дыма (пока без учета горения) в схематической трехмерной модели высотного (20 этажей) здания при наличии в нем внутренних перегородок. Приведены поля скоростей и температур газа, концентраций дыма в различных сечениях.

Некоторые асимптотические задачи для нелинейных гиперболических уравнений и уравнений движения жидкости и газа

Номер проекта: 97-01-00541-а
Год предоставления отчета: 1997

За отчетный период получены следующие результаты.

1. Для сильно нелинейного возмущения гиперболического уравнения с постоянными коэффициентами установлено существование ограниченных, периодических и почти периодических по времени решений при условии, что полный символ невозмущенного уравнения не обращается в

нуль в некоторой открытой полосе, содержащей мнимую ось. Для линейных гиперболических уравнений высокого порядка установлены свойства экспоненциальной дихотомии и экспоненциального расщепления решений при условии, что в расположении корней полного символа имеются лакуны (т. е. полосы, свободные от корней). Получено описание подпространств данных Коши, которые соответствуют решениям определенного роста на бесконечности. В частности, показано, что каждое из этих подпространств представимо в виде графика некоторого линейного оператора, "старшая часть" которого является псевдодифференциальным оператором с явно вычисляемым символом. Для линейных эллиптических уравнений с параметром изучены проекторы Кальдерона. В частности, получено новое доказательство теоремы Кальдерона—Сили о разложении фазового пространства в прямую сумму двух подпространств, которые состоят из данных Коши решений, принадлежащих соболевским пространствам. Для квазилинейных и сильно нелинейных эллиптических уравнений с параметром построены устойчивое и неустойчивое многообразия и доказано, что они находятся в общем положении.

2. Задача Колмогорова о течении вязкой жидкости на плоском торе переформулирована в терминах теории пространственной динамики, в окрестности порога неустойчивости сведена к уравнению Кана—Хилларда. Изучены локализованные решения этих уравнений.

3. Предложен новый подход к исследованию взаимодействий в схеме Глимма. На основании этого подхода получены условные BV-оценки для приближенных решений уравнений газовой динамики. Построена система взаимодействующих частиц, соответствующая двумерной газовой динамике без давления.

4. Построены точные неотражающие граничные условия для волнового уравнения. Разработаны численные алгоритмы для уравнений акустики, использующие эти алгоритмы. Эффективность алгоритмов подтверждена численными экспериментами.

Исследование стабильности функциональных свойств сплавов с эффектом памяти формы на основе никелида титана и меди

Номер проекта: 97-01-00823-а
Год предоставления отчета: 1997

Сформулирована расширенная система уравнений структурно-аналитической теории прочности,

включающая соотношения, описывающие микропластическую деформацию и микронапряжения, связанные с аккомодацией мартенсита. Усреднение микродеформаций проводили в соответствии с кристаллографией фаз и превращения. Моделированием показано, что учет этих явлений позволяет качественно правильно описывать изменение деформации образца при термоциклировании и эффект многократно обратимой памяти формы. В экспериментальной части исследовали стабильность реактивных напряжений в сплаве медь—цинк—алюминий. Обнаружено, что в отличие от никелида титана, в образцах из которого напряжения практически не снижаются во времени, в исследованном сплаве наблюдается значительное уменьшение напряжений.

Математическое моделирование многомерных нестационарных процессов в областях с резко неоднородными свойствами

Номер проекта: 97-01-01016-а
Год предоставления отчета: 1997

Разработаны и исследованы вычислительные алгоритмы для численного решения динамической связанной задачи термоупругости в сферически-симметричном, одномерном и двумерном плоских случаях. Теоретически и на примерах исследованы их качественные (например, влияние полной консервативности) и количественные характеристики. Получены аналитические решения задачи о диффузии магнитного поля из межрельсового пространства в пространственно-двумерном случае. Рассмотрены случаи неподвижного и подвижного контактов. Получены результаты аналитического рассмотрения и численных экспериментов по нахождению порядка сингулярности физических полей: магнитного, теплового и поля упругих напряжений — в окрестности электрического контакта. Исследована зависимость порядка сингулярности от углов и вида материалов. В частности, показано наличие решений определенного типа для упругих напряжений в зависимости от угла. Проанализированы процессы, протекающие на контактных поверхностях. Основное внимание уделено явлению оплавления контакта и образования жидкометаллической пленки в результате действия трения.

Сингулярность напряжений в зоне соединения разномодульных материалов при действии тепловых и механических нагрузок

Номер проекта: 97-01-00429-а
Год предоставления отчета: 1997

Разработанные в ходе выполнения предыдущего проекта методы выделения сингулярных составляющих решения для однородных тел обобщены на случай составных тел, находящихся под действием физико-механических полей, в первую очередь температурной нагрузки. В плоском случае в широком диапазоне изменения растворов углов и свойств материалов получены числовые значения показателей особенности и коэффициентов интенсивности и проанализирована их зависимость от температурного фактора. Для трехмерного случая выведены расчетные формулы для определения показателей особенности в угловых точках биматериалов (два сцепленных трехгранных угла), программная и численная реализация которых предполагается в 1998 г.

Микромеханическая модель разрушения керамических материалов при высокоскоростном ударном нагружении

Номер проекта: 97-01-00218-а
Год предоставления отчета: 1997

В рамках проекта проведены исследования поведения керамик, композитных материалов в экстремальных условиях нагружения (удар, взрыв). С использованием экспериментальных данных разработаны математические модели поведения материалов при ударных нагрузках и созданы методики численного расчета высокоскоростных процессов методом конечных элементов в осесимметричной, плоской и трехмерной постановках.

Обнаружено и исследовано формирование вихревых структур в керамической пластине при ударе. Показано, что основным вихреобразующим фактором является распространение в керамической пластине волн давления противоположных знаков. Наибольшего развития достигает вихрь в области боковой поверхности керамической пластины. Изменение начальных параметров, таких как геометрические размеры, скорость удара, оказывает существенное влияние на формирование вихревых структур. При использовании стальной пластины

при тех же начальных параметрах вихрь в области боковой поверхности (наиболее выраженная вихревая структура в керамике) в стальной пластине не формируется вообще.

Численно исследованы процессы ударно-волнового компактирования в цилиндрических ампулах пористого карбида титана, полученного методом СВС. Помимо других начальных параметров в расчетах варьировался уровень пористости вплоть до 90 %. Использована единая модель разрушения материала, позволяющая описывать как процесс роста пор, трещин, так и процесс их схлопывания. Показано, что задание более высоких начальных скоростей нагружения не всегда является оптимальным с точки зрения достижения наиболее полного компактирования пористого керамического образца.

В трехмерной постановке исследована задача о несимметричном высокоскоростном взаимодействии медных цилиндрических ударников со стальной преградой с учетом влияния температурных эффектов и разрушения.

Экспериментальное исследование характеристик устойчивости и восприимчивости пограничного слоя с неблагоприятным градиентом давления по отношению к трехмерным нестационарным возмущениям

Номер проекта: 97-01-00638-а
Год предоставления отчета: 1997

В полном соответствии с планом исследований на 1997 г. за первый год выполнения настоящего проекта проделана следующая работа.

1. Разработана и изготовлена экспериментальная модель, включающая в себя гибкую ложную стенку оригинальной конструкции с перестраиваемой геометрией и плоскую пластину с вмонтированным в нее источником возмущений, создающим пространственную нестационарную неоднородность поверхности.

2. С помощью метода последовательных итераций при варьировании формы ложной стенки и положения закрылка экспериментально реализовано течение в пограничном слое с постоянным параметром Хартри $-0,115$. Подробно исследована структура среднего течения в потенциальном потоке и в пограничном слое; показана его двумерность и автомодельность. Сопоставлены измеренная форма профилей скорости с расчетной.

3. Проведено испытание локализованного источника возмущений, возбуждающего в исследуемом течении трехмерные волны неустойчивости. Выбраны режимы измерений, подходящие для исследований трехмерной устойчивости и восприимчивости течения. Подготовлено программное обеспечение для углубленного анализа экспериментальных данных.

4. Сверх работ, запланированных на 1997 г., проведено экспериментальное исследование распространения волновых поездов (состоящих из трехмерных волн неустойчивости) в исследуемом автомодельном пограничном слое. Получена обширная база экспериментальных данных, последующий анализ которых позволит определить все основные характеристики трехмерной устойчивости исследуемого течения.

Развитие механической модели, макроскопическое моделирование и микроисследование сверхглубокого проникания ускоренных частиц в твердое тело

Номер проекта: 97-01-01049-а
Год предоставления отчета: 1997

Разработана методика расчета параметров кумулятивных зарядов и параметров детонации ВВ, используемых для получения струй частиц, проведены теоретические и экспериментальные исследования образования системы трещин в сталях при кумуляции ударных волн. Разработана методика микроструктурных исследований каналов в стали в режиме сверхглубокого проникания

ИНФОРМАЦИЯ

5-й Международный семинар "Российские технологии для индустрии" по теме "НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ"

(из цикла "Результаты фундаментальных исследований для инвестиций")

Санкт-Петербург, 28—30 мая, 2001

Российский Фонд фундаментальных исследований (РФФИ) и Санкт-Петербургский Объединенный исследовательский центр проводят серию Международных семинаров "Результаты фундаментальных исследований для инвестиций", целью которых является предоставление потенциальным инвесторам (партнерам) информации о результатах фундаментальных исследований, имеющих прикладное значение и готовых для передачи в производство.

В работе семинара участвуют ученые, занимающиеся разработками в области высоких технологий и представляющие все сектора отечественной науки: Российскую Академию наук, высшие учебные заведения, отраслевые институты. Программа семинара формируется, исходя из интересов потенциальных партнеров (инвесторов). В работе семинара принимают участие отечественные и зарубежные предприятия и организации, заинтересованные в использовании новейших разработок.

Чрезвычайно важно также участие в таких семинарах представителей регионов, занимающихся формированием и реализацией научно-технической и инновационной политики в области освоения производств опережающего технологического уровня и имеющих приоритетное значение для решения социально-экономических задач региона.

5-й С.-Петербургский международный семинар "Российские технологии для индустрии" будет посвящен теме "Нетрадиционные возобновляемые источники энергии". Предлагаемая тематика включает как разработку новых, так и совершенствование

существующих технологий освоения нетрадиционных возобновляемых источников энергии солнца, ветра, биомассы, а также освоение геотермальной энергии, низкопотенциального тепла и др.

Кроме докладов по перечисленной выше тематике на семинаре предусматриваются доклады, посвященные организации инвестиционной деятельности и вопросам интеллектуальной собственности.

На семинаре предполагается работа следующих секций:

1. Солнечной энергетики (фотоэлектрической, тепловой);
2. Ветровой энергетики;
3. Малой гидроэнергетики;
4. Геотермальной энергетики;
5. Биоэнергетики (использование энергии биомассы);
6. Новых методов преобразования и аккумуляции энергии;
7. Экология использования нетрадиционной и возобновляемой энергии.

Организаторы:

Санкт-Петербургский Объединенный исследовательский центр,

Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе,

Санкт-Петербургский государственный технический университет,

Санкт-Петербургский научный центр РАН.

Спонсор: Российский Фонд фундаментальных исследований.

Официальный язык семинаров русский и английский, предусматривается синхронный перевод.

Оргкомитет планирует издание тезисов на русском и английском языках.

В рамках семинара будет проведена выставка изделий и посещение научных центров и промышленных предприятий С.-Петербурга.

Время и место проведения семинара

Семинар проводится в г. Санкт-Петербурге с 28 по 30 мая 2001 г. по адресу: Научно-образовательный Центр ФТИ им. А. Ф. Иоффе, С.-Петербург ул. Хлопина, д. 8