

# ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 53.088.3:62-752.4

**В. Э. Джашигов, В. М. Панкратов,**  
Институт проблем точной механики  
и управления РАН (Саратов),  
**А. М. Лестев, И. В. Попова,**  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения,  
АОЗТ "Гирооптика"

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

*Поставлены и решены задачи анализа влияния температурных воздействий и технологических погрешностей изготовления микромеханических гироскопов на их точностные характеристики. Рассмотрены различные конструктивные схемы микромеханических гироскопов — камертонная, карданова и с дополнительной рамкой. Построены и исследованы математические модели температурного и технологического дрейфа микромеханических гироскопов. Эти модели включают в себя системы возмущенных обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений движения, уравнения и соотношения, описывающие термоупругое состояние микромеханических гироскопов, формулы для составляющих угловой скорости дрейфа. Проведены компьютерные эксперименты и получены качественные и количественные оценки параметров дрейфа.*

### Введение

Важнейшее направление развития современных микромеханических датчиков инерциальной информации [1, 2] — повышение их точности [3]. Как показывает накопленный опыт исследований, решение этой проблемы представляется неразрывно связанным с изучением влияния на точность микромеханического гироскопа (ММГ) среды его функционирования (особенно температурных воздействий и обусловленного ими изменения термоупругого состояния ММГ и его характеристик), а также технологических погрешностей изготовления прибора.

В дальнейшем для краткости будем называть дрейф, обусловленный изменением термоупругого состояния ММГ, *тепловым*, а дрейф за счет техно-

логических погрешностей изготовления ММГ — *технологическим*.

**Цель настоящей статьи** заключается в постановке и исследовании проблемы влияния на точность различных конструктивных схем микромеханических гироскопов температурных возмущений и технологических погрешностей их изготовления.

**Постановка задачи** включает в себя следующие этапы:

- построение математических моделей теплового и технологического дрейфов, содержащих возмущенные уравнения движения микромеханических гироскопов, уравнения и соотношения, описывающие термоупругое состояние ММГ, формулы угловой скорости дрейфа, температурных и технологических погрешностей;
- аналитическое и компьютерное исследование построенной модели, получение качественных и количественных оценок рассматриваемых составляющих дрейфа различных конструктивных схем ММГ.

В данной статье предполагается, что в общем случае неоднородное температурное поле ММГ известно и имеет конфигурацию, определяемую температурой окружающей среды.

### Камертонный микромеханический гироскоп

Первой рассмотрим конструкцию ММГ, построенную по схеме камертонного гироскопа, содержащего две чувствительные массы, вынужденно колеблющиеся в упругом подвесе [2, 3]. Кинематическая схема такого ММГ показана на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Принцип действия рассматриваемого ММГ основан на измерении амплитуд угловых колебаний рамки или поступательных колебаний чувствительных масс, вызываемых кориолисовыми силами при вращении основания прибора относительно его оси чувствительности.

Температурно (или технологически) возмущенные уравнения движения ММГ имеют следующий вид [3, 4]:

$$\begin{aligned}
 J_z \ddot{\phi} + \mu_\phi \dot{\phi} + c_\phi \phi = & \sum_{i=1}^2 m_i [\ddot{x}_i(y_i + y_{iT}) - \\
 - \ddot{y}_i(x_i + x_{iT} + b_{iT})] - 2(\dot{\phi} + \Omega) & \sum_{i=1}^2 m_i [\dot{y}_i(y_i + y_{iT}) + \\
 + \dot{x}_i(x_i + x_{iT} + b_{iT})]; & \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + \mu_{1x} \dot{x}_1 + c_{1x}(x_1 + b) = \\ = m_1 \ddot{\varphi} (y_1 + y_{1T}) + 2m_1(\dot{\varphi} + \Omega)\dot{y}_1 + \\ + m_1(x_1 + x_{1T} + b_{1T})(\dot{\varphi} + \Omega)^2 + F \cos pt; \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + \mu_{2x} \dot{x}_2 + c_{2x}(x_2 - b) = \\ = m_2 \ddot{\varphi} (y_2 + y_{2T}) + 2m_2(\dot{\varphi} + \Omega)\dot{y}_2 + \\ + m_2(x_2 + x_{2T} + b_{2T})(\dot{\varphi} + \Omega)^2 - F \cos pt; \quad (3)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 + \mu_{1y} \dot{y}_1 + c_{1y}y_1 = -m_1(x_1 + x_{1T} + b_{1T})\ddot{\varphi} - \\ - 2m_1\dot{x}_1(\dot{\varphi} + \Omega) + m_1(y_1 + y_{1T})(\dot{\varphi} + \Omega)^2; \quad (4)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + \mu_{2y} \dot{y}_2 + c_{2y}y_2 = -m_2(x_2 + x_{2T} + b_{2T})\ddot{\varphi} - \\ - 2m_2\dot{x}_2(\dot{\varphi} + \Omega) + m_2(y_2 + y_{2T})(\dot{\varphi} + \Omega)^2; \quad (5)$$

$$J_{ci} = J_{ci0} + J_{ciT}; \quad J_{ci0} = m_i a^2/3;$$

$$J_3 = J_{30} + J_{3T}; \quad J_{30} = m_3 b^2/3;$$

$$c_{\varphi} = c_{\varphi 0} + c_{\varphi T}; \quad c_{ix} = c_{ix0} + c_{ixT}; \quad c_{iy} = c_{iy0} + c_{iT};$$

$$J_z = \sum_{i=1}^2 m_i [(y_i + y_{iT})^2 + (x_i + x_{iT} + b_{iT})^2] + \\ + J_{c1} + J_{c2} + J_3,$$

где  $\varphi$ ,  $x_i$ ,  $y_i$  — обобщенные координаты, характеризующие положение рамки и колеблющихся чувствительных элементов;  $m_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — массы колеблющихся чувствительных элементов и рамки;  $\Omega$  — входная измеряемая угловая скорость вращения основания;  $a$ ,  $b$  — геометрические параметры;  $J_{ci0}$ ,  $J_{30}$ ,  $J_{ciT}$ ,  $J_{3T}$  — номинальные и возмущенные моменты инерции чувствительных элементов и рамки;  $c_{ix0}$ ,  $c_{iy0}$ ,  $c_{\varphi 0}$ ,  $\mu_{ix}$ ,  $\mu_{iy}$ ,  $\mu_{\varphi}$ ,  $c_{ixT}$ ,  $c_{iyT}$ ,  $c_{\varphi T}$  — номинальные и возмущенные коэффициенты жесткости подвесов и демпфирования чувствительных элементов и рамки;  $F$ ,  $p$  — амплитуда и частота вынуждающих сил, действующих на чувствительные элементы;  $x_{iT}$ ,  $y_{iT}$  — смещения центров масс чувствительных элементов относительно их центров подвеса;  $b_{iT}$  — возмущения геометрии рамки.

Эти уравнения позволяют реализовать единый подход к исследованию влияния и взаимовлияния на точность ММГ температурных и технологических факторов.

При изучении действия температуры необходимо получить выражение для разбалансировок и изменений инерционных и жесткостных характеристик из решения соответствующей задачи термоупругости. В случае исследования "технологического" дрейфа значения этих параметров и характеристик задаются как исходные данные в виде системы допусков со своими знаками на номинальные значения параметров ММГ.

Получим приближенные выражения для угловой скорости "теплого" или "технологического" дрейфа. Для этого запишем, согласно (1), сумму моментов инерционных, упругих, вязких и кориолисовых сил инерции для ММГ на неподвижном

основании ( $\Omega = 0$ ) и находящемся под воздействием "температурных" или "технологических" факторов. Затем запишем эту же сумму моментов для ММГ на основании, вращающемся с постоянной угловой скоростью  $\Omega$  при отсутствии "температурных" или "технологических" возмущений. Приравняв после преобразований и упрощений [4] полученные выражения, будем иметь следующее выражение для угловой скорости "теплого" или "технологического" дрейфа (рис. 2, см. третью сторону обложки):

$$\Omega_{dr} \approx \frac{m_2(x_{2T} + b_{2T}) - m_1(x_{1T} + b_{1T})}{2A_x p b (m_1 + m_2)} \ddot{y} + \\ + \frac{c_{\varphi} T}{2A_x p b (m_1 + m_2)} \varphi + \frac{J_{zT}}{2A_x p b (m_1 + m_2)} \ddot{\varphi} + \\ + \frac{m_2(x_{2T} + b_{2T}) - m_1(x_{1T} + b_{1T})}{A_x p b (m_1 + m_2)} \dot{x} \dot{\varphi} - \\ - \frac{m_2 y_{2T} - m_1 y_{1T}}{2A_x p b (m_1 + m_2)} \ddot{x} + \frac{m_2 y_{2T} - m_1 y_{1T}}{A_x p b (m_1 + m_2)} \dot{y} \dot{\varphi}, \quad (6)$$

где  $A_x$  — заданная амплитуда возбуждаемых колебаний чувствительных элементов.

Для определения влияния температуры на характеристики исследуемой механической системы (изменение геометрии, моментов инерции, коэффициентов жесткости, положения центров масс и др.) рассмотрим следующую задачу термоупругости.

В качестве исходной примем ситуацию [5, 6], когда центры подвесов колеблющихся чувствительных элементов и рамки, изготовленных из однородного материала, совпадают с их центрами масс. Пусть эта ситуация имеет место при номинальной температуре  $T_{nom}$ . Результатом воздействия в общем случае неоднородного температурного поля на рассматриваемую систему являются перераспределение плотности по объему, искажения формы чувствительных элементов и, следовательно, изменения интегральных характеристик — моментов инерции и смещений центров масс, приводящих в итоге к погрешностям измерения входной угловой скорости.

На данном этапе температурное поле полагается заданным и изменяющимся по закону (см. рис. 1, б)

$$T(x) = T_0 + T_{00}|x|/(b+a), \quad (7)$$

где  $T_0$ ,  $T_{00}$  — максимальное превышение абсолютной температуры над  $T_{nom}$  и максимальный температурный перепад.

Зависимость плотности материала элементов системы от температуры представляется в виде

$$\rho(x) = \rho_0[1 - \beta_T T(x)], \quad (8)$$

где  $\beta_T$  — температурный коэффициент изменения плотности.

Выражения для моментов инерции и смещений центров масс элементов определяются согласно [7]:

$$J = \iiint_V \rho r^2 dV, \quad \bar{r}_c = \frac{1}{M} \iiint_V \rho \bar{r} dV, \quad (9)$$

где  $V = V_0 + \Delta V_T$  — объем тела с учетом малых температурных изменений его формы;  $M$  — масса тела.

Для определения  $\Delta V_T$  решается (с соответствующими граничными условиями) квазистатическая задача термоупругости в перемещениях [8]:

$$(1 - 2\nu)\nabla^2 \bar{u} + \text{grad div } \bar{u} - 2(1 + \nu)\alpha_T \text{grad } T = 0, \quad (10)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\bar{u}$  — вектор перемещения;  $\alpha_T$  — коэффициент теплового расширения.

На первом этапе элементы системы представим в виде стержневой конструкции (см. рис. 1, б) и будем рассматривать ее термоупругое деформированное состояние. После преобразований и решения задачи (9), (10) с учетом представлений (7), (8) получим следующие выражения для температурно-возмущенных характеристик камертонного ММГ:

- удлинения рамки

$$b_{1T} = b_{2T} = b_T = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \alpha_T b \left[ T_0 + \frac{T_{00} b}{2(b + a)} \right]; \quad (11)$$

- смещения центров масс

$$x_{1T} = x_{2T} = x_T = \frac{T_{00} a^2}{b + a} \left[ \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{\alpha_T}{2} - \frac{\beta_T}{3} \right]; \quad (12)$$

- температурные составляющие моментов инерции

$$J_{c1T} = \frac{m_1 a^2}{3} T_0 \left[ 3 \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \alpha_T - \beta_T \right];$$

$$J_{3T} = \frac{m_3 b^2}{3} \left[ T_0 \left( 3 \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \alpha_T - \beta_T \right) + \frac{3}{2} \frac{T_{00} b}{b + a} \left( \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \alpha_T - \frac{\beta_T}{2} \right) \right]. \quad (13)$$

Зависимость коэффициентов жесткости от температуры представляется в виде [8]

$$c_{\varphi} = c_{\varphi 0} (1 - \alpha_E T_0), \quad c_{ix} = c_{ix 0} (1 - \alpha_E T_0),$$

$$c_{iy} = c_{iy 0} (1 - \alpha_E T_0), \quad (14)$$

где  $\alpha_E$  — температурный коэффициент модуля упругости.

Полученные возмущенные уравнения (1)–(5) и соотношения (6), (11)–(14) представляют собой математическую модель "теплового" или "технологического" дрейфа камертонного ММГ.

Качественный анализ полученного для  $\Omega_{dr}$  выражения (6) и соотношений (11)–(14) для оценки

термоупругого состояния камертонного ММГ показывает следующее:

- на дрейф ММГ оказывают влияние температурные (или технологические) изменения характеристик прибора как в плоскости  $XOZ$  чувствительных элементов и рамки, так и в плоскости  $XOY$ , перпендикулярной плоскости чувствительного элемента;
- "температурные" или "технологические" факторы в плоскости  $XOZ$  чувствительных элементов ММГ определяют составляющие дрейфа, зависящие от измеряемой угловой скорости [первые четыре слагаемых в (6)];
- "температурные" или "технологические" разбалансировки в плоскости  $XOY$ , причем с разными знаками, определяют составляющую дрейфа, не зависящую от измеряемой угловой скорости [пятое слагаемое в (6)], а определяемую частотой  $\rho$  вынужденных колебаний и геометрией прибора;
- температурные разбалансировки  $y_{iT}$  в плоскости  $XOY$  следует ожидать весьма незначительными по сравнению с возможными "технологическими" разбалансировками в этой плоскости в силу малости "толщины" ММГ (порядка 20 мкм) и чрезвычайно малых ожидаемых температурных градиентов по "толщине" прибора.

Для получения количественных оценок параметров "теплового" и "технологического" дрейфа будем численно интегрировать приведенную к виду Коши исходную систему уравнений (1)–(5) с учетом полученных соотношений при решении термоупругой задачи (11)–(14) и формулы для угловой скорости дрейфа (6). Согласно [3, 4], рассматривается камертонный ММГ со следующими параметрами:

$$m_1 = m_2 = 3,94 \cdot 10^{-8} \text{ кг}; \quad b = 1500 \text{ мкм}; \quad A_x = 20 \text{ мкм};$$

$$\rho = 2\pi \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}; \quad \alpha_T = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$\alpha_E = 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad \nu = 0,2; \quad \beta_T \approx 3\alpha_T \text{ и др.}$$

**Влияние температурных возмущений на тепловой дрейф камертонного ММГ.** При оценке влияния температурных возмущений на тепловой дрейф ММГ важным является сравнение относительного влияния температурных градиентов и абсолютной температуры.

Согласно [3], диапазон изменений температуры окружающей среды для ММГ составляет  $-40 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T_c \leq 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Будем полагать номинальной температуру  $T_{nom} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Тогда для абсолютных температурных перепадов справедливо  $-60 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T_0 = T_c - T_{nom} \leq 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Вместе с тем малые геометрические размеры ММГ (единицы миллиметров в плане и десятки микрометров по толщине) позволяют предположить, что в нем могут иметь место только лишь малые температурные градиенты  $T_{00} \ll 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) показаны зависимости, полученные в результате проведения компьютерных экспериментов на построенной модели, отражающие влияние изменений абсолютной температуры ММГ на его относительный тепловой дрейф. При этом учитываются результаты решения термоупругой задачи (11)–(14) в плоскости  $XOZ$  ММГ.

Как видим, угловая скорость теплового дрейфа линейно зависит от абсолютной температуры. Максимальное отклонение теплового дрейфа ММГ составило  $\approx 11\%$  от измеряемой угловой скорости при абсолютном перепаде  $T_0 = 60^\circ\text{C}$  ( $b_{1T} = -b_{2T} \approx 0,6$  мкм).

Моделирование влияния температурных градиентов показало, что такое максимальное отклонение теплового дрейфа от измеряемой входной угловой скорости при  $T_{00} = 1^\circ\text{C}$  составило  $0,04\%$ .

Таким образом, влияние абсолютной температуры ММГ на его тепловой дрейф более существенно, чем температурных градиентов.

На этом же рисунке представлена диаграмма относительного вклада составляющих "теплового" дрейфа в суммарное значение угловой скорости дрейфа. Наибольший вклад в "тепловой" дрейф ( $53\%$  от суммарной  $\Omega_{dr}$ ) вносит составляющая, обусловленная появлением дополнительного момента сил инерции  $m\ddot{y}$  при наличии температурных разбалансировок ММГ в его плоскости  $XOZ$ . Второе и третье место по значимости занимают моменты за счет температурных изменений угловой жесткости подвеса  $c_{\phi T}$  и моментов инерции  $J_{zT}$  (соответственно  $37\%$  и  $9\%$  от суммарной  $\Omega_{dr}$ ).

Температурные разбалансировки  $\Delta y_T = y_{2T} - y_{1T}$  в плоскости  $XOY$ , как отмечалось, предполагаются чрезвычайно малыми ввиду ожидаемых крайне незначительных температурных перепадов по толщине ММГ, определяемой в несколько десятков микрометров, поэтому ими можно пренебречь.

Совершенно иначе обстоит дело, когда рассматриваются технологические разбалансировки  $\Delta y_T$  в плоскости  $XOY$ .

**Влияние погрешностей изготовления ММГ на его "технологический" дрейф.** Как показывает качественный анализ полученного выражения (6) наличие даже незначительных технологических разбалансировок  $\Delta y_T$  (но все равно существенно больших, чем температурных) может привести к значительному дрейфу ММГ. Причем этот дрейф не зависит от измеряемой угловой скорости, а определяется только силами инерции  $m\ddot{x}$ , обусловленными внешним возбуждением колебаний.

Дело в том, что только пятое слагаемое в суммарном дрейфе (6) не зависит от углового движения по  $\phi$  гироскопа, а определяется заданным инерционным членом  $m\ddot{x}$  (при наличии разбалансировок  $\Delta y_T$  в плоскости  $XOY$ ). Так, для ММГ с рассматри-

ваемыми параметрами эта постоянная составляющая дрейфа имеет значение  $\approx 0,1 \text{ c}^{-1}$  при  $\Delta y_T = 0,01$  мкм.

Таким образом, точность балансировки камертонного ММГ в плоскости  $XOY$  должна быть весьма высока, либо необходимо предусмотреть компенсацию этой составляющей дрейфа.

Более подробные результаты исследования влияния технологических разбалансировок в плоскости  $XOZ$  и  $XOY$  ММГ на его точность представлены на рис. 4 (см. третью сторону обложки). Здесь показаны нормированные кривые максимальных значений угловой скорости дрейфа  $\Omega_{dr}^{\max}$  и максимальных значений амплитуд  $A_{\phi}$  угловых колебаний рамки при различных разбалансировках  $\Delta y_T = y_{2T} - y_{1T}$  и  $\Delta b_T = b_{2T} - b_{1T}$  в плоскостях  $XOY$  и  $XOZ$ .

Как видим, даже достаточно малые разбалансировки  $\Delta y_T$  в плоскости  $XOY$  порядка сотых долей микрометров и разбалансировки  $\Delta b_T$  в плоскости  $XOZ$  порядка единиц микрометров приводят к существенному изменению угловой скорости дрейфа в десятки процентов от измеряемой угловой скорости  $\Omega = 1 \text{ c}^{-1}$  и к значительным изменениям амплитуды угловых колебаний рамки.

Для оценки влияния разбалансировок  $\Delta y_T$  в плоскости  $XOY$  на зависимости амплитуды  $A_{\phi}$  угловых колебаний рамки от измеряемой угловой скорости  $\Omega$ , в развитие [3], на рис. 5 по результатам компьютерных экспериментов построены графики этих зависимостей  $A_{\phi}(\Omega)$  при различных  $\Delta y_T$  и  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ . Из графиков видно, как эволюционирует закон изменения  $A_{\phi}(\Omega)$  от пропорционального при  $\Delta y_T = 0$  до нелинейного при  $\Delta y_T \neq 0$ .

Для анализа динамики влияния рассмотренных факторов на точность ММГ на рис. 6 показана эволюция временных зависимостей параметров дрейфа и других характеристик ММГ, а также фазовых портретов ( $\phi, \dot{\phi}$ ) исходной нелинейной системы при различных технологических разбалансировках прибора в плоскости  $XOZ$ . Как видим, эти разба-

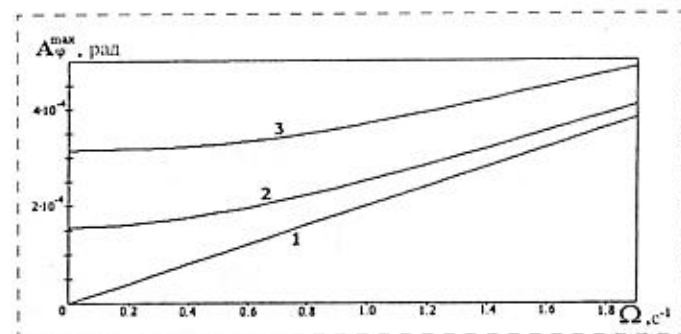


Рис. 5. Зависимости максимальных значений амплитуд угловых колебаний рамки ММГ от измеряемой угловой скорости при технологических разбалансировках в плоскости  $XOY$  ( $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ): 1 —  $\Delta y_T = 0$  мкм; 2 —  $\Delta y_T = 0,1$  мкм; 3 —  $\Delta y_T = 0,2$  мкм

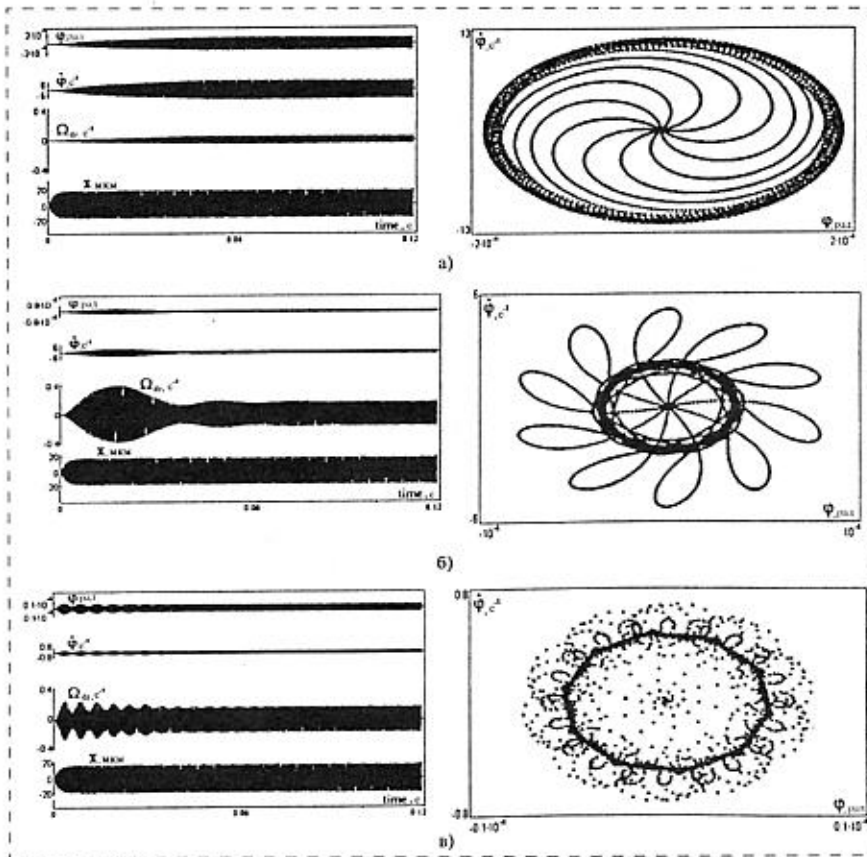


Рис. 6. Эволюция динамических характеристик и фазовых портретов при технологических разбалансировках камертонного ММГ в плоскости  $XOZ$  ( $\Omega = 1 \text{ с}^{-1}$ ,  $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta u_T = 0 \text{ мкм}$ ):  
 $a - \Delta b_T = -1 \text{ мкм}$ ;  $b - \Delta b_T = -16 \text{ мкм}$ ;  $v - \Delta b_T = -80 \text{ мкм}$

лансировки оказывают существенное влияние на текущие параметры дрейфа прибора. Эволюция этих изменений происходит от простого предельного цикла при малых разбалансировках (фазовый портрет рис. 6, а) до сложных переходных конфигураций фазовых портретов при значительных разбалансировках (рис. 6, б, в).

**Микромеханический гироскоп с кардановым подвесом чувствительного элемента**

Этот тип микромеханических гироскопов был создан одним из первых в Лаборатории им. Ч. Дрейпера [2, 3]. Конструкция осциллятора содержит массивный инерционный элемент 1 в кардановом подвесе (рис. 7). Наружная рамка 2 гироскопа совершает вынужденные упругие колебания с заданной амплитудой и частотой. Принцип действия такого типа ММГ основан на измерении амплитуд угловых колебаний внутренней рамки вместе с инерционным элементом. Эти колебания вызываются кориолисовыми силами при вращении основания прибора относительно его оси чувствительности с измеряемой угловой скоростью  $\Omega$ .

Температурно (или технологически) возмущенные уравнения движения ММГ имеют следующий вид:

$$\ddot{\beta} + 2n_1 \dot{\beta} + \omega_\beta^2 \beta + b_1 \dot{\alpha} = b_0; \quad (15)$$

$$\ddot{\alpha} + 2n_2 \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha - a_1 \dot{\beta} = M_0 \cos pt, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} 2n_1 &= \mu_\beta/B_1; \quad 2n_2 = \mu_\alpha/(A_1 + A_2); \\ \omega_\beta^2 &= [c_\beta - (A_1 - C_1)\Omega^2 - z_T m_1 g_z - \\ &- x_T m_1 g_x]/B_1; \quad \omega_\alpha^2 = [c_\alpha - (B_1 + B_2 - \\ &- C_1 - C_2)\Omega^2]/(A_1 + A_2); \\ b_1 &= (A_1 + B_1 - C_1)\Omega/B_1; \\ a_1 &= (A_1 + B_1 - C_1)\Omega/(A_1 + A_2); \\ b_0 &= m_1(x_T g_z - z_T g_x)/B_1; \\ M_0 &= L_0/(A_1 + A_2); \quad A_i = A_{i0} + A_{iT}; \\ B_i &= B_{i0} + B_{iT}; \\ C_i &= C_{i0} + C_{iT} \quad (i = 1, 2); \\ c_\alpha &= c_{\alpha 0} + c_{\alpha T}; \quad c_\beta = c_{\beta 0} + c_{\beta T}; \\ \mu_\alpha &= \mu_{\alpha 0} + \mu_{\alpha T}; \quad \mu_\beta = \mu_{\beta 0} + \mu_{\beta T}; \end{aligned}$$

$\alpha, \beta$  — углы поворота наружной и внутренней рамок;  $A_i, B_i, C_i$  — возмущенные моменты инерции внутренней рамки с инерциальной массой ( $i = 1$ ) и наружной рамки ( $i = 2$ );  $\mu_\alpha, \mu_\beta, c_\alpha, c_\beta$  — возмущенные коэффициенты демпфирования и жесткости торсионов;  $g_x, g_z$  — составляющие поля сил тяжести (или ускорений);  $x_T, z_T$  — смещения центра масс колеблющейся инерционной массы;  $L_0$  — амплитуда момента, возбуждающего вынужденные колебания наружной рамки;  $p$  — частота;  $m_1$  — масса инерционного колеблющегося элемента;  $\Omega = \text{const}$  — измеряемая угловая скорость вращения основания ММГ.

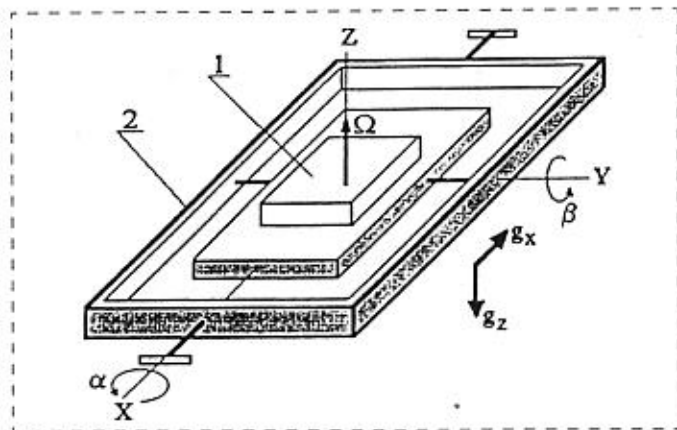


Рис. 7. Кинематическая схема карданового ММГ: 1 — инерционный элемент; 2 — наружная рамка

Индекс "0" у параметров системы означает, что это номинальное значение параметра, индекс "T" означает, что это температурная (или технологическая) добавка к номинальному значению.

Из первого (информационного) уравнения системы (15), (16) получим приближенное выражение для угловой скорости температурного или технологического дрейфа, как это было сделано для картерного ММГ:

$$\Omega_{dr} \approx \frac{B_{1T}}{A_{10}Ep} \ddot{\beta} + \frac{\mu_{\beta T}}{A_{10}Ep} \dot{\beta} + \frac{c_{\beta T}}{A_{10}Ep} \beta - \frac{m_1(z_T g_z + x_T g_x)}{A_{10}Ep} \beta - \frac{m_1(x_T g_z - z_T g_x)}{A_{10}Ep}, \quad (17)$$

где  $E$  — заданная амплитуда возбуждаемых колебаний наружной рамки.

Качественный анализ полученного выражения для  $\Omega_{dr}$  карданового ММГ показывает следующее:

- первые четыре слагаемые в (17) определяют составляющие дрейфа, зависящие от измеряемой угловой скорости ( $\beta, \dot{\beta}, \ddot{\beta}$ )  $\sim \Omega$ ;
- последнее слагаемое определяет составляющую дрейфа, не зависящую от измеряемой угловой скорости, а определяемую смещением центра масс инерционного элемента и зависящую от его геометрических параметров, амплитуды и частоты вынужденных колебаний;
- влияние температурных (или технологических) изменений момента инерции  $B_{1T}$  представляется наиболее существенным среди первых четырех слагаемых, поскольку  $\ddot{\beta} \sim p^2$ .

Для количественной оценки температурных и технологических погрешностей рассматриваемого типа ММГ будем искать частное решение системы (15), (16) в виде

$$\beta = \beta_0 + D_1 \cos pt + D_2 \sin pt = \beta_0 + D \sin(pt + \delta); \quad (18)$$

$$\alpha = E_1 \cos pt + E_2 \sin pt = E \sin(pt + \sigma), \quad (19)$$

где  $D = \sqrt{D_1^2 + D_2^2}$ ,  $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$ ,  $\text{tg } \delta = D_1/D_2$ ,  $\text{tg } \sigma = E_1/E_2$ .

Подставляя (18), (19) в (15), (16), после преобразований получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} D_1 &= \Delta_1/\Delta; & D_2 &= \Delta_2/\Delta; & E_1 &= \Delta_3/\Delta; \\ E_2 &= \Delta_4/\Delta; & \beta_0 &= b_0/\omega_{\beta}^2; \\ \Delta_1 &= -M_0(S_1 S_3 S_5 + S_2 S_3 S_6); \\ \Delta_2 &= -M_0(S_2 S_3 S_5 + S_3^2 S_4 - S_1 S_3 S_6); \\ \Delta_3 &= -M_0(S_1 S_3 S_4 - S_1^2 S_6 - S_2^2 S_6); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta_4 &= M_0(S_1^2 S_5 + S_2^2 S_5 + S_2 S_3 S_4); \\ \Delta &= S_1^2 S_5 + S_2^2 S_5 + 2S_2 S_3 S_4 S_5 + S_3^2 S_4^2 + S_1^2 S_6^2 - \\ &\quad - 2S_1 S_3 S_4 S_6 + S_2^2 S_6^2 + S_3^2 S_4^2; \end{aligned}$$

$$S_1 = \omega_{\beta}^2 - p^2; \quad S_2 = 2n_1 p; \quad S_3 = b_1 p; \quad S_4 = a_1 p;$$

$$S_5 = 2n_2 p; \quad S_6 = \omega_{\alpha}^2 - p^2.$$

При наличии температурных или технологических погрешностей имеем возмущенные амплитуду и фазу колебаний инерционного элемента, зависящие от температурных или технологических факторов:

$$D_{\beta T} = \beta_{0T} + D; \quad \text{tg } \delta_T = D_{1T}/D_{2T}. \quad (21)$$

При отсутствии температурных или технологических погрешностей будем иметь

$$D_{\beta} = D; \quad \text{tg } \delta = D_1/D_2. \quad (22)$$

Полагая амплитуду колебаний пропорциональной измеряемой угловой скорости (в соответствующем диапазоне измеряемых угловых скоростей это выполняется), получим следующие формулы для оценки температурных или технологических погрешностей карданового ММГ по амплитуде и фазе:

$$\varepsilon_{\beta} = (D_{\beta} - D_{\beta T})100\%/D_{\beta}, \quad \varepsilon_{\delta} = \delta_T - \delta. \quad (23)$$

Для получения количественных оценок параметров дрейфа ММГ численно интегрируется система (15), (16) и используются полученные формулы (18)–(23).

Согласно [3, 4] будем рассматривать кардановый ММГ с параметрами:

$$\begin{aligned} m_1 &= 10^{-8} \text{ кг}, & E &= 0,0159 \text{ рад}, \\ B_{10} &= A_{10} = C_{10} = 0,005 \text{ кг} \cdot \text{мкм}^2, \\ B_{20} &= A_{20} = C_{20} = 0,0175 \text{ кг} \cdot \text{мкм}^2, \\ c_{\alpha 0}/(A_{10} + A_{20}) &= c_{\beta 0}/B_{10} = p^2, & p &= 2\pi \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \text{ и др.} \end{aligned}$$

На рис. 8 представлены диаграммы относительного вклада составляющих теплового (или технологического) дрейфа (17) в суммарное значение уг-

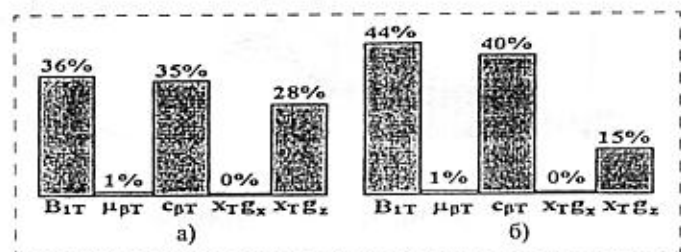


Рис. 8. Диаграммы составляющих дрейфа карданового ММГ ( $\Omega = 1 \text{ с}^{-1}$ ,  $x_T = 1 \text{ мкм}$ ,  $g_x = g_z = 9,8 \text{ м/с}$ ): а —  $B_{1T}/B_{10} = c_{\beta T}/c_{\beta 0} = \mu_{\beta T}/\mu_{\beta 0} = 10\%$ ; б —  $B_{1T}/B_{10} = c_{\beta T}/c_{\beta 0} = \mu_{\beta T}/\mu_{\beta 0} = 1\%$

ловой скорости дрейфа. Полагалось, что температурные или технологические возмущения на моменты инерции, коэффициенты демпфирования и жесткости  $B_{1T}$ ,  $\mu_{\beta T}$ ,  $c_{\beta T}$  не превосходят 10 % номинальных значений, а температурные или технологические смещения центров масс не более 1 мкм (что соответствует абсолютным температурным перепадам на уровне  $T_0 \approx 100^\circ\text{C}$ ).

Наибольший вклад в суммарный дрейф (до 44 %  $\Omega_{dr}$ ) вносит составляющая, обусловленная появлением дополнительного момента сил инерции за счет появления  $B_{1T}$ . Второе и третье места по значимости занимают моменты за счет изменений жесткости  $c_{\beta T}$  подвеса внутренней рамки и смещения центра масс в направлении, перпендикулярном направлению ускорений.

На рис. 9 представлены топограммы погрешностей по амплитуде и фазе карданового ММГ, рассчитанные по формулам (18)–(23), как функции относительных изменений момента инерции и жесткости подвеса внутренней рамки гироскопа.

Как видим, при температурном или технологическом изменении моментов инерции  $B_{1T}$  и жесткости подвеса  $c_{\beta T}$  внутренней рамки карданового ММГ в пределах до  $\pm 10\%$  от номинальных значений изменения погрешностей гироскопа носят нелинейный характер как по амплитуде, так и по фазе. Максимальные значения погрешности по амплитуде при этом составляют  $\epsilon_{\beta} = 86\%$ , по фазе  $\epsilon_{\delta} = 81^\circ$ .

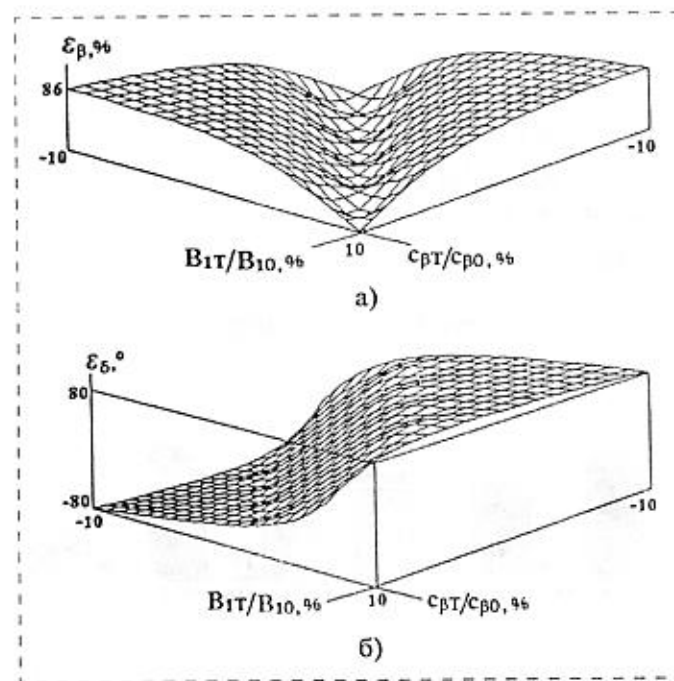


Рис. 9. Топограммы погрешностей карданового ММГ ( $\Omega = 1 \text{ c}^{-1}$ ): а — по амплитуде  $\epsilon_{\beta}$ ; б — по фазе  $\epsilon_{\delta}$

### Микромеханический гироскоп с дополнительной рамкой

В этом типе ММГ для измерения угловой скорости вращения основания используются поступательные колебания чувствительного элемента [9]. Конструкция осциллятора содержит чувствительный элемент 1, упруго соединенный с рамкой 2, которая упруго соединена с основанием (рис. 10). Рамка 2 гироскопа совершает вынужденные поступательные колебания в направлении  $X$  с заданной амплитудой и частотой. Принцип действия такого типа ММГ основан на том, что при вращении основания вокруг оси  $Z$ , перпендикулярной плоскости чувствительного элемента и рамки, кориолисовы силы вызывают колебания чувствительного элемента в направлении  $Y$ . Эти колебания регистрируются емкостными датчиками и служат мерой входной угловой скорости  $\Omega$ .

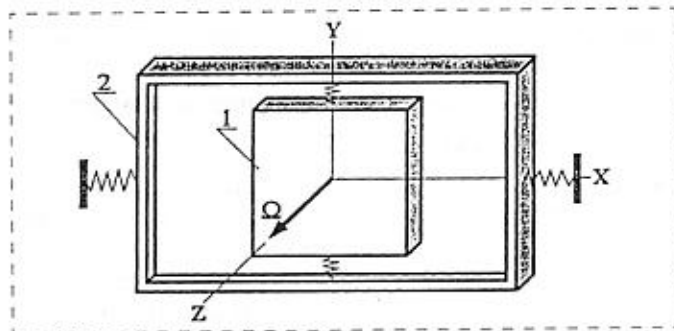


Рис. 10. Кинематическая схема ММГ с дополнительной рамкой: 1 — чувствительный элемент; 2 — рамка

Температурно (или технологически) возмущенные уравнения движения ММГ, имеют следующий вид:

$$\ddot{y}_1 + 2h_1 \dot{y}_1 + (k_{1T}^2 - \Omega^2)y_1 - \Omega^2(y_{1T} + y_{2T}) + 2\Omega \dot{x}_2 = 0; \quad (24)$$

$$\ddot{x} + 2h_2 \dot{x}_2 + (k_{2T}^2 - \Omega^2)x_2 - \Omega^2(dx_{1T} + x_{2T}) - 2d\Omega \dot{y}_2 = F \cos pt, \quad (25)$$

где  $2h_1 = \mu_1/m_1$ ;  $2h_2 = \mu_2/(m_1 + m_2)$ ;  $k_{10}^2 = c_{10}/m_{10}$ ;  $k_{1T}^2 = (c_{10} + c_{1T})/(m_{10} + m_{1T})$ ;  $k_{20}^2 = c_{20}/(m_{10} + m_{20})$ ;  $k_{2T}^2 = (c_{20} + c_{2T})/(m_{10} + m_{1T} + m_{20} + m_{2T})$ ;  $F = F^*/(m_{10} + m_{1T} + m_{20} + m_{2T})$ ;  $d = (m_{10} + m_{1T})/(m_{10} + m_{1T} + m_{20} + m_{2T})$ ;  $m_i = m_{i0} + m_{iT}$ ;  $\mu_i = \mu_{i0} + \mu_{iT}$ ;  $c_i = c_{i0} + c_{iT}$  ( $i = 1, 2$ );  $y_1, x_2$  — координаты, характеризующие перемещения чувствительного элемента 1 относительно рамки 2 и перемещения рамки 2 относительно основания;  $y_{iT}, x_{iT}$  — технологические или температурные смещения

центров масс чувствительного элемента 1 и рамки 2;  $m_{i0}$ ,  $m_{iT}$  — номинальные и технологически измененные значения масс;  $\mu_{i0}$ ,  $c_{i0}$ ,  $\mu_{iT}$ ,  $c_{iT}$  — номинальные и возмущенные коэффициенты демпфирования и жесткости упругих элементов;  $k_{i0}$ ,  $k_{iT}$  — номинальные и возмущенные значения частот собственных колебаний;  $F^*$ ,  $p$  — амплитуда и частота вынуждающей силы;  $\Omega = \text{const}$  — угловая скорость основания.

Из первого (информационного) уравнения системы (24), (25) получим приближенное выражение для угловой скорости дрейфа, как это было сделано для камертонного ММГ:

$$\Omega_{dr} \approx \frac{m_{1T}}{2m_{10}A_x p} \ddot{y}_1 + \frac{\mu_{1T}}{2m_{10}A_x p} \dot{y}_1 + \frac{c_{1T}}{2m_{10}A_x p} y_1, \quad (26)$$

где  $A_x$  — заданная амплитуда возбуждаемых колебаний рамки 2.

Качественный анализ полученного выражения для  $\Omega_{dr}$  показывает следующее:

- слагаемые в (26) определяют составляющие дрейфа, зависящие от измеряемой угловой скорости ( $y_1$ ,  $\dot{y}_1$ ,  $\ddot{y}_1$ )  $\sim \Omega$ ;
- влияние технологических изменений массы чувствительного элемента 1 представляется наиболее существенным, поскольку  $\ddot{y}_1 \sim p^2$ .

Для количественной оценки температурных и технологических погрешностей рассматриваемого типа ММГ будем искать частное решение системы (24), (25) в виде

$$y_1 = y_{10} + G_1 \cos pt + G_2 \sin pt = y_{10} + G \sin(pt + \delta); \quad (27)$$

$$x_2 = x_{20} + H_1 \cos pt + H_2 \sin pt = H \sin(pt + \sigma), \quad (28)$$

где  $G = \sqrt{G_1^2 + G_2^2}$ ,  $H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2}$ ,  $\text{tg } \delta = G_1/G_2$ ,  $\text{tg } \sigma = H_1/H_2$ .

Подставляя (27), (28) в (24), (25), после преобразований получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} G_1 &= \Delta_4/\Delta; \quad G_2 = \Delta_3/\Delta; \quad H_1 = \Delta_2/\Delta; \quad H_2 = \Delta_1/\Delta; \\ y_{10} &= \Omega^2(y_{1T} + y_{2T})/(k_{1T}^2 - \Omega^2); \\ x_{20} &= \Omega^2(dx_{1T} + x_{2T})/(k_{2T}^2 - \Omega^2); \\ \Delta_1 &= F(-a_1 a_3 b_1 - a_2^2 b_3 - a_3^2 b_3); \\ \Delta_2 &= F(a_1 a_2 b_1 - a_2^2 b_2 - a_3^2 b_2); \\ \Delta_3 &= F(a_1^2 b_1 - a_1 a_2 b_2 + a_1 a_3 b_3); \\ \Delta_4 &= F(a_1 a_2 b_3 + a_1 a_3 b_2); \end{aligned} \quad (29)$$

$$\Delta = -a_1^2 b_1^2 + 2a_1 a_2 b_1 b_2 - 2a_1 a_3 b_1 b_3 - a_2^2 b_2^2 - a_2^2 b_3^2 - a_3^2 b_2^2 - a_3^2 b_3^2;$$

$$a_1 = 2\Omega p; \quad a_2 = k_{1T}^2 - \Omega^2 - p^2; \quad a_3 = 2h_1 p;$$

$$b_1 = 2d\Omega p; \quad b_2 = k_{2T}^2 - \Omega^2 - p^2; \quad b_3 = 2h_2 p.$$

При наличии температурных или технологических погрешностей имеем возмущенные амплитуду и фазу колебаний чувствительного элемента, зависящие от температурных или технологических факторов:

$$G_{yT} = y_{10} + G, \quad \text{tg } \delta_T = G_{1T}/G_{2T}. \quad (30)$$

При отсутствии температурных или технологических погрешностей будем иметь

$$G_y = G, \quad \text{tg } \delta = G_1/G_2. \quad (31)$$

Полагая амплитуду колебаний чувствительного элемента пропорциональной измеряемой угловой скорости, получим следующие формулы для оценки температурных или технологических погрешностей по амплитуде и фазе рассматриваемого ММГ:

$$\varepsilon_y = (G_y - G_{yT})100\%/G_y; \quad \varepsilon_\delta = \delta_T - \delta. \quad (32)$$

Для получения количественных оценок параметров дрейфа ММГ численно интегрируется система (24), (25) и используются полученные формулы (27)–(32).

Согласно [3, 4, 9] будем рассматривать ММГ с параметрами:

$$\begin{aligned} m_{10} &= m_{20} = 10^{-8} \text{ кг}, \quad A_x = 20 \text{ мкм}, \\ c_{10}/m_{10} &= c_{20}/(m_{10} + m_{10}) = p^2, \\ p &= 2\pi \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \text{ и др.} \end{aligned}$$

На рис. 11 представлены диаграммы относительного вклада составляющих дрейфа (26) в суммарное значение угловой скорости дрейфа. Пола-

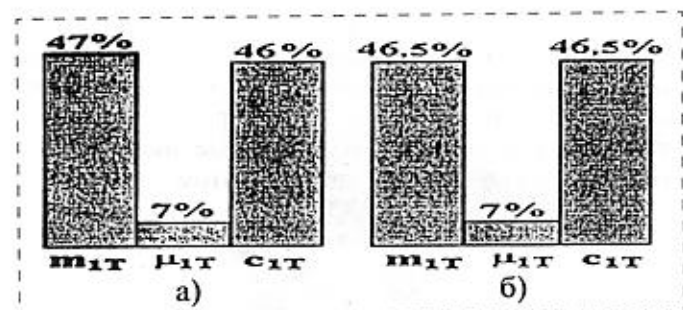


Рис. 11. Диаграммы составляющих дрейфа ММГ с дополнительной рамкой ( $\Omega = 1 \text{ с}^{-1}$ ): а —  $m_{1T}/m_{10} = c_{1T}/c_{10} = \mu_{1T}/\mu_{10} = 10\%$ ; б —  $m_{1T}/m_{10} = c_{1T}/c_{10} = \mu_{1T}/\mu_{10} = 1\%$



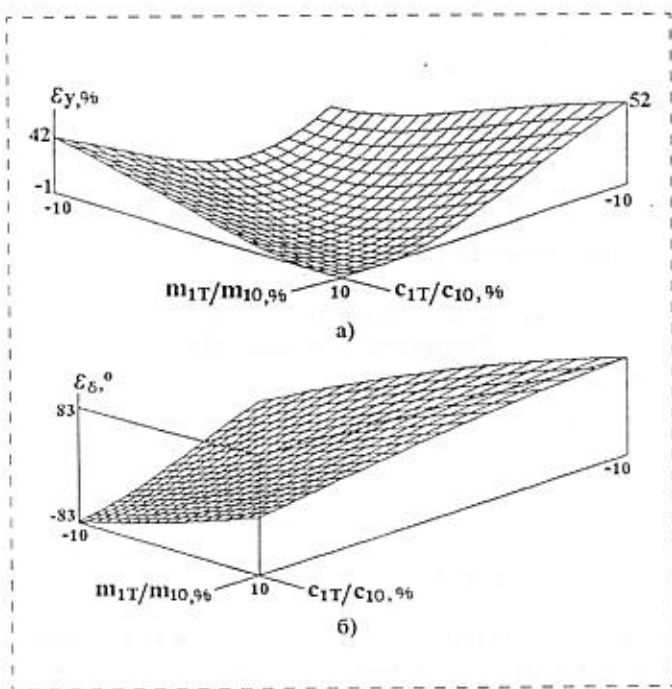


Рис. 12. Топограммы погрешностей ММГ с дополнительной рамкой ( $\Omega = 1 \text{ c}^{-1}$ ):  
 а — по амплитуде  $\epsilon_\gamma$ ; б — по фазе  $\epsilon_\delta$

галось, что температурные или технологические возмущения на коэффициенты демпфирования, жесткости и массу  $\mu_{1T}$ ,  $c_{1T}$ ,  $m_{1T}$  не превосходят 10 % от номинальных значений. Наибольший вклад в суммарный дрейф (до 47 % от суммарной  $\Omega_{dr}$ ) вносит составляющая, обусловленная появлением дополнительного момента сил инерции при технологическом изменении массы  $m_{1T}$  чувствительного элемента. Второе место по значимости занимают моменты за счет изменений жесткости  $c_{1T}$ .

На рис. 12 представлены топограммы погрешностей по амплитуде и фазе рассматриваемого ММГ, рассчитанные по формулам (28)–(32), как функции относительных изменений массы чувствительного элемента и жесткости его подвеса. Как видим, при изменениях массы и жесткости подвеса чувствительного элемента в пределах до  $\pm 10\%$  от номинальных значений изменения погрешностей гироскопа носят нелинейный характер как по амплитуде, так и по фазе. Максимальные значения погрешности по амплитуде при этом составляют  $\epsilon_\gamma = 52\%$ , по фазе  $\epsilon_\delta = 83^\circ$ .

## Выводы

1. Проведенные исследования показали, что микромеханический гироскоп, выполненный по рассмотренным конструктивным схемам — прибор достаточно чувствительный к температурным и технологическим возмущениям.

2. Наибольшее число разнообразных факторов, вызывающих температурный (или технологический) дрейф микромеханического инерциального датчика при постоянной угловой скорости вращения основания, имеет место в камерном ММГ, меньшее число этих факторов — в кардановом ММГ и еще меньшее — в ММГ с поступательными движениями чувствительного элемента.

3. Влияние "технологических" и "температурных" факторов на характеристики выходного сигнала рассмотренных схем ММГ обусловлено действием возникающих дополнительных сил и моментов инерционных, упругих и кориолисовых сил относительно измерительной оси прибора, нарушениями условия резонансной настройки и смещениями центров масс чувствительных элементов.

## Список литературы

1. Пешехонов В. Г. Ключевые задачи современной автономной навигации // Гироскопия и навигация. 1996. № 1. С. 48–55.
2. Barbure N., Connelly L., Gilmore L., Greiff P., Kourepnis A., Weinberg M. Micro-electromechanical instrument and systems development at Draper laboratory // 3-r St.-Petersburg International conference on gyroscopic technology and navigation, May, 1996. P. 3–10.
3. Лестев А. М., Попова И. В. Современное состояние теории и практических разработок микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 1998. № 3. С. 81–94.
4. Джашитов В. Э., Лестев А. М., Панкратов В. М., Попова И. В. Влияние температурных и технологических факторов на точность микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 1999. № 3. С. 3–16.
5. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. О возмущении нестационарным температурным полем движения тела с одной закрепленной точкой // Механика твердого тела. 1997. № 4. С. 21–24.
6. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Динамика температурно-возмущенных гироскопических приборов и систем. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1998. 236 с.
7. Кильчевский Н. А. Курс теоретической механики. М.: Наука, 1977. 544 с.
8. Коваленко А. Д. Основы термоупругости. Киев: Наукова думка, 1970. 308 с.
9. Збруцкий А. В., Апостолов А. В. Динамика чувствительного элемента микромеханического гироскопа с дополнительной рамкой // Гироскопия и навигация. 1998. № 3. С. 13–23.
10. Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Лестев А. М., Попова И. В. Температурные и технологические погрешности микромеханических гироскопов // Материалы VII Санкт-Петербургской международной конф. по интегрированным навигационным системам (29–31 мая 2000 г.). 2000. С. 60–71.

УДК 621.3.085.332

С. Ш. Рехвишвили,

Институт прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН

(г. Нальчик),

Д. С. Гаев,

Кабардино-Балкарский госуниверситет (г. Нальчик)

## КОНСТРУКЦИЯ АКТИВНОГО ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

*Предлагается конструкция датчика для атомно-силового микроскопа. Датчик представляет собой монокристалльный кристалл (чип), комбинирующий в себе чувствительный элемент и интегральную схему. Проведены расчеты основных характеристик датчика. Применение нового датчика исключает оптическую систему регистрации.*

В настоящее время атомно-силовой микроскоп (АСМ) является одним из наиболее перспективных приборов для исследования поверхности твердых тел на атомарном уровне разрешения. Важнейшей составляющей прибора является чувствительный датчик, смещения которого, как правило, детектируются оптическими или электрическими методами. Существует несколько типов таких датчиков. Самым простым из них является тонкая проволока (обычно используются W, Mo или Pt-Ir-сплав) толщиной 10–50 мкм, кончик которой дополнительно подвергается электрохимической заточке в щелочной среде [1]. Другой способ основан на использовании микро-технологии, заимствованной из полупроводниковой электроники, где основными материалами являются кремний и его соединения [2]. Существуют также и "нетрадиционные" методы изготовления игл. Так, например, авторами [3] предложен метод "построения" игл с использованием поверхностной диффузии атомов в электрическом поле с большим градиентом вблизи поверхности иглы. При одновременном действии полевого испарения и поверхностной диффузии достигается конический профиль иглы. На кончике иглы формируется

микроигла, выступающая примерно на 5 нм. В качестве исходного материала применялся W (111).

Несмотря на определенные успехи в данной области разработка зондирующих элементов по-прежнему остается очень актуальной задачей. В настоящей работе впервые предлагается конструкция и технология однокристалльного кремниевого тензорезистивного датчика для АСМ, состоящего из интегральной схемы (ИС) и чувствительного элемента. Датчик может применяться как отдельно, так и в составе многозондового картриджа, конструкция и технология которого в данный момент разрабатывается фирмой "НТ-МДТ" [4].

Основной частью датчика, определяющей разрешающую способность АСМ, является гибкий

кронштейн. Его резонансная частота  $f$  (Гц) и жесткость  $C$  (Н/м) могут быть рассчитаны по формулам:

$$f = 0,162 \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad (1)$$

$$C = \frac{Eb}{4} \left(\frac{d}{L}\right)^3, \quad (2)$$

где  $L$ ,  $b$  и  $d$  — длина, ширина и толщина кронштейна;  $\rho$  и  $E$  — плотность и модуль упругости материала. В нашем случае геометрические размеры кронштейна имели следующие значения:  $L = 150$  мкм;  $b = 35$  мкм;  $d = 2$  мкм. При этом резонансная частота и жесткость составляли 100 кГц и 2,3 Н/м. Отметим, что данные значения являются характерными для большинства конструкций кронштейнов.

На рис. 1 показана электрическая схема тензодатчика, принцип работы которой состоит в следующем. Диффузионный резистор  $R1$  встроен в кронштейн (этот резистор должен быть  $n$ -типа для обеспечения большой длины), а остальная часть схемы расположена на кремниевой подложке. При деформации кронштейна происходит изменение сопротивления резистора, которое в линейной области можно оценить по следующей формуле:

$$\Delta R = \frac{3kRd}{L^2} \Delta z, \quad (3)$$

где  $R$  — сопротивление резистора;  $\Delta z$  — отклонение кронштейна

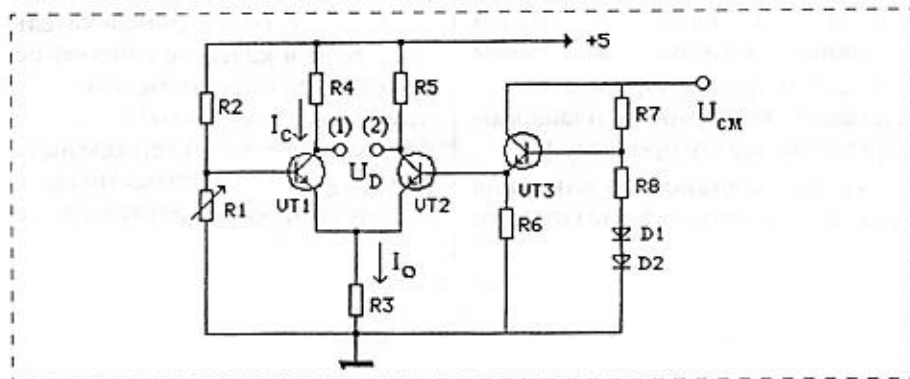


Рис. 1. Принципиальная схема ИС тензодатчика

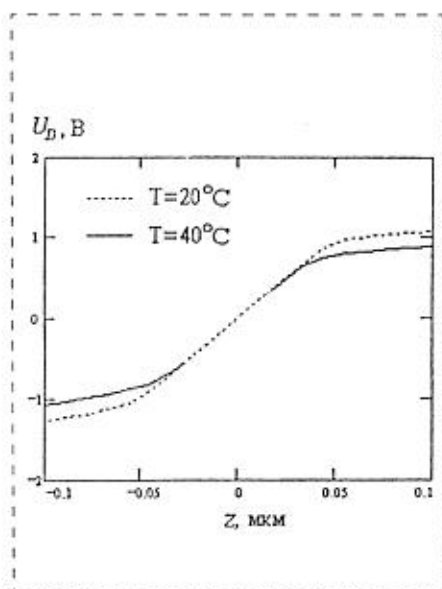


Рис. 2. Зависимость напряжения на выходе схемы от вертикального смещения кантилевера

в вертикальном направлении;  $k$  — коэффициент тензочувствительности (для кремния  $k = 150\div 200$  [5]). Изменение  $\Delta R$  регистрируется активной мостовой схемой на основе дифференциального каскада  $R2-R5$ ,  $VT1$ ,  $VT2$ .

При изготовлении датчика неизбежны отклонения параметров элементов схемы от их номиналов. Для устранения этого недостатка в схему включен каскад  $R6-R8$ ,  $D1$ ,  $D2$ ,  $VT3$ , обеспечивающий смещение нуля на выходе и температурную стабилизацию схемы.

На рис. 2 показаны результаты моделирования тензорезистивного датчика, проведенного с помощью программы PSpice [6] и формул (1)–(3). Параметры моделей активных компонентов схемы (диодов и транзисторов) соответствовали стандартному планарно-эпитаксиальному процессу [7].

Из рис. 2 видно, что линейная область изменения выходного

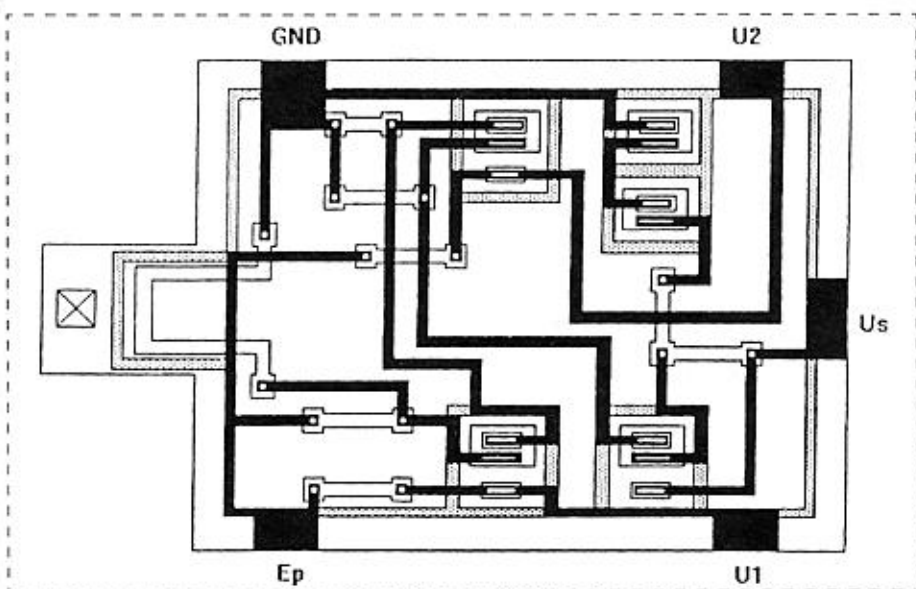


Рис. 3. Вариант топологии ИС тензодатчика (не в масштабе)

напряжения  $U_D$  соответствует смещениям  $\Delta z \approx 0,05$  мкм, что является вполне приемлемым (при необходимости рабочий диапазон смещений может быть увеличен путем подбора номиналов). Примечательным является также то, что изменение температуры в данной области практически не влияет на работу схемы. Все вместе это делает активный тензодатчик предпочтительней.

На рис. 3 показан один из возможных вариантов топологии тензодатчика. При ее прорисовке предполагалось, что технология изготовления является планарно-эпитаксиальной с изоляцией элементов  $p$ -переходом.

В заключение отметим, что идея активного тензодатчика выглядит еще более привлекательной, если в качестве сенсора использовать тонкую мембрану. В этом случае несколько (как правило, два или четыре) тензорезисторов могут быть расположены по ее периферии, что значительно по-

высит эффективность преобразования "смещение—напряжение".

#### Список литературы

1. Bryant P. J., Kim H. S., Zheng Y. C., Yang R. // Rev. Sci. Instrum. 1987. 58. N 6. P. 115.
2. Рехвиашвили С. Ш., Дедков Г. В. // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 2. С. 158–160.
3. Binh Yu Thien, Marien J. // Surface Sci. 1988. V. 22. N 1–2. L539–L549.
4. Быков В. А., Саунин С. А. // Зондовая микроскопия 99: Материалы всероссийского совещания. Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород, 1999. С. 132–133.
5. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 выпусках. Вып. 2, 3. М.: Радио и связь, 1992.
7. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы: Материалы, приборы, изготовление / Пер. с англ. М.: Мир, 1995.
8. Рехвиашвили С. Ш., Гаев Д. С. Активный тензорезистивный датчик для атомно-силового микроскопа // Зондовая микроскопия-2000 (Мат-лы совещания 28 февраля — 2 марта 2000 г., Нижний Новгород). 2000. С. 270–272.

# ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.3:623.827

М. Д. Агеев, акад. РАН,  
Институт проблем морских технологий  
(г. Владивосток)

## МИКРОСЕНСОРЫ ДЛЯ СОЛНЕЧНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

*Рассматривается возможность создания малогабаритного подводного аппарата с питанием от солнечных преобразователей и оснащения его сенсорами.*

Коллектив Института проблем морских технологий начал разработку подводных роботов (по ГОСТу — автономные необитаемые подводные аппараты — АНПА) в начале семидесятых годов. За прошедшие годы было создано несколько аппаратов (табл. 1), многие из которых использовались в

реальных операциях в океане на глубинах до 6000 м [1] (см. четвертую сторону обложки).

Практически все обзорно-поисковые, обследовательские и научно-исследовательские задачи, решаемые с помощью АНПА, могут быть так или иначе использованы в военных целях. Как показывает анализ, выполненный в работе [1], в создании специальных военных АНПА в настоящее время можно выделить следующие направления (табл. 2):

- создание аппаратов большого радиуса действия;
- создание аппаратов и их систем для патрулирования и инспекции подводных объектов, постановки мин и противоминной обороны;
- создание систем наблюдения и освещения подводной обстановки на основе малогабаритных платформ и аппаратов.

По данным [1], в разработке концепции АНПА большого радиуса действия (до 1000 миль) участвуют многие крупные ведомства: NASA, DARPA (Defence Advance Research Projects Agency), ВМФ, ВВС и Национальное бюро стандартов США. Принятая в начале 80-х годов программа MAUV (Multiple Autonomous Underwater Vehicle) была ориен-

Таблица 1

Автономные необитаемые подводные аппараты ИПМТ ДВО РАН

Наименование аппарата	Технические характеристики						
	Год создания	Размеры, м	Масса, кг	Глубина, м	Скорость, м/с	Автономность, ч	Полезная нагрузка (сменное оборудование)
"Скат"	1974	2,2 × 0,96 × 0,68	400	300	1,0	4,0	Фотокамера, датчики температуры и ионосодержания
"Скат-гео"	1978	2,26 × 0,96 × 0,68	450	300	1,0	6,0	Видеосистема, фотокамера, датчики STD
"Л-1"	1980	4,50 × 1,2 × 1,2	1140	2000	1,0	6,0	Датчики STD, фотокамера, ГБО
"Л-2"	1980	4,30 × 1,2 × 1,2	1180	6000	1,0	6,0	Датчики STD, фотокамера, ГБО, магнитометр, радиометр
"MT-88"	1988	3,81 × 1,12 × 1,19	1150	6000	1,0	6,0	Видеосистема, фотокамера, ГБО, STD
"MT-ГЕО"	1990	3,70 × 1,12 × 1,30	960	6000	1,0	6,0	STD, видеосистема, фотокамера, ГБО
"Тифлонус"	1990	3,50 × 0,80 × 0,80	750	2000	2,0	35,0	3-компонентный магнитометр, гравиметр, видеосистема, фотокамера, ГБО, датчики STD
"P-1", "P-2"	1992	3,70 × 1,12 × 1,30	960	6000	1,0	6,0	ГБО, фотокамера, STD
"TSL"	1994	3,03 × 0,64 × 0,64	320	300	1,25	8,0	Сканирующий гидролокатор, ГБО, видеосистема
"CR-01"	1995	4,38 × 0,80 × 0,93	1300	6000	1,5	10,0	Акустический профилограф, ГБО, видеосистема, фотокамера, STD
"ОКРО-6000"	1997	3,94 × 0,70 × 0,88	975	6000	1,5	8,0	STD, ГБО, видеосистема, фотокамера
"САНПА"	1998	1,80 × 0,73 × 0,31	90	1000	0,8	Не ограничена	Океанографическая измерительная аппаратура

Таблица 2

## Зарубежные автономные подводные аппараты

Назначение, область применения	Название	Страна, разработчик, год
Обзорно-поисковые и обследовательские работы	"AUSS" "XP-21" "AE-1000" "AE-2"	США, NOSC, 1991 США, ART, 1998 Япония, Токийский университет, 1992
Геологоразведка, картографирование	"Eraulard" "NDRE" "Hugin" "R1"	Франция, IFREMER, 1980 Норвегия, NDRE, Япония, Токийский университет, 1992—1998
Подледные работы	"ARCS" "Theseus"	Канада, ISE, 1993—1995
Океанографические исследования, мониторинг водной среды	"Odyssey" "Ocean Voyager" "Ocean Explorer" "REMUS" "MARIUS" "Autosub-1"	США, MIT, 1992 США, NAVOCEANO, FAU США, WHOI США, WHOI Европейский консорциум Великобритания, SOC, 1995
Военная область	"SMSP" "MUST" "SAUV" "SPUR" "EAVE"	США, ART (проект) США, ART, 1989 США, BMS, DARPA, 1993—1997 Великобритания, Scicon Ltd (проект) США, N-HU, DARPA

тирована на создание автономных подводных аппаратов для совместных действий с подводными лодками, радиоэлектронной разведки, обеспечения противоминных работ. В рамках программы MAUV при поддержке управления DARPA в конце 80-х годов разрабатывались два проекта — SHARS и MUST. Для оценки возможностей проекта SHARS (Submarine with Hierarchical Autonomous Realtime System) лабораторией морских систем Нью-Хемпширского университета были разработаны два образца многоцелевого автономного аппарата "EAVE" (Experimental Autonomous Vehicle-East), в системе управления которого были реализованы некоторые элементы искусственного интеллекта. По проекту MUST (Mobil Undersee System Test) по заказу фирмы Martin-Marietta фирмой ART (Applied Remote Technology) был разработан аппарат для обследования военных объектов, противовоздушной обороны и минных заграждений. Аппарат должен был иметь модульное исполнение, позволяющее изменять массо-габаритные характеристики и состав аппаратуры в зависимости от задачи.

В продолжение программы MAUV под руководством ВМФ США была принята программа UUV

(Unmanned Underwater Vehicle), в которой рассматривались возможности создания боевых аппаратов для оснащения ими подводных лодок. При участии ряда ведущих фирм США осуществляются проекты MARS (Multimission AUV Prototype System), Pathfinder, SCOUT, реализация которых планируется на начало 2000 г. Одним из возможных прототипов для аппаратов подобного назначения служит AUV "XP-21".

ВМФ США придает приоритетное значение созданию систем освещения подводной обстановки на основе малогабаритных аппаратов и платформ, базирующихся на подводных лодках. Пространственная сеть таких аппаратов может обеспечить наблюдение за прохождением подводных лодок в Арктике, а также выполнение других разведывательных и патрульных задач. Проектом SMSP (Small Mobil Sensors Platform) планируется создание серийных аппаратов, эксплуатируемых с подводной лодкой и способных ориентироваться по топографическим особенностям рельефа дна. Основой системы наблюдения служат гидроакустический комплекс и магнитометрическая аппаратура для обнаружения и идентификации подводной лодки по шумам гребных винтов, магнитным аномалиям и другим сигналам.

Рядом других программ США и Великобритании, в том числе SOMSS (Submarine off Board Mine Search System), SAUV (Semi Autonomous Undersea Vehicle), SPUR (Scicon's Patrolling Underwater Robot), планируется также создание боевых и патрульных аппаратов с применением новейших компьютерных и энерготехнологий.

В настоящее время совместно с Институтом автономных подводных систем (AUSI, США) нами разработан, изготовлен и испытан в реальных морских условиях солнечный автономный необитаемый подводный аппарат (САНПА) [2—8]. Основное достоинство такого аппарата — потенциально неограниченное время автономной работы. Разумеется, реально оно ограничено надежностью аппаратуры и другими эксплуатационными факторами. Тем не менее, можно предполагать, что такие аппараты смогут разрешить проблему недостаточности измерений в океане, что позволит надежно прогнозировать погоду и климат планеты.

САНПА обладает весьма интересным в смысле миниатюризации свойством — его дальность хода не зависит от размеров аппарата [2]. Остановимся на этом факте более подробно. Сначала рассмотрим обычный подводный аппарат с внутренним источником энергии. Для простоты будем считать, что вся энергия расходуется на движение. Мощность  $P$ , необходимая для преодоления сопротивления среды, определяется формулой

$$P = 0,5 \rho C_x v^3 V^{2/3} = K_1 v^3 V^{2/3},$$

где  $\rho$  — плотность среды;  $v$  — скорость движения;  $V$  — водоизмещение;  $C_x$  — коэффициент гидродинамического сопротивления;  $K_1$  — коэффициент, не зависящий от размеров аппарата. Если  $E$  — емкость внутреннего источника, то время движения до исчерпания энергии составит  $T = E/P$ , а дальность хода  $D = Tv$ . Величину  $E$  можно считать пропорциональной водоизмещению аппарата, т. е. принять  $E = K_2 V$ . Теперь можно рассчитать зависимость водоизмещения от заданной дальности хода:

$$D = (K_2/K_1 v^2) V^{1/3} \quad \text{или} \quad V = (K_1 v^2/K_2)^3 D^3.$$

Таким образом, для геометрически подобных аппаратов водоизмещение пропорционально кубу заданной дальности хода.

Доступная энергия для солнечного аппарата будет определяться площадью  $S$  солнечных панелей, т. е.  $E = K_3 S$ . Выполнив необходимые подстановки, можно найти:

$$D = (K_3/K_1 v^2)(S/V^{2/3}).$$

Для геометрически подобных аппаратов соотношение  $S/V^{2/3}$  постоянно, что свидетельствует о том, что дальность хода солнечного аппарата не зависит от его размеров.

Приведенные оценки характеризуют лишь основные свойства рассмотренных зависимостей без учета затрат энергии на систему управления, измерительные и прочие системы и устройства. Впрочем, при применении современной элементной базы эти затраты могут составлять лишь небольшую долю от энергии, требуемой для движения аппарата.

Упомянутый выше солнечный аппарат проектировался как прототип для подтверждения идеи и получения данных, необходимых для последующих разработок. После успешных испытаний, естественно, возникло желание оснастить его океанографическими датчиками. В состав выбранной измерительной аппаратуры входили: датчики температуры и электропроводности воды, содержания  $O_2$ , флюориметр и измеритель прозрачности, датчики освещенности сверху и снизу. Нельзя сказать, что габариты аппарата очень малы, тем не менее размещение выпускаемых промышленностью сенсоров потребовало удлинения прочного корпуса

и подвешивания под "крыльями" двух датчиков. В результате увеличилось гидродинамическое сопротивление аппарата, заметно возросло потребление энергии. Естественно, возникла необходимость обратиться к специалистам в области микросистемной техники.

Известно, что стоимость изделий одного класса пропорциональна их массе. Ожидаемая область применения солнечных аппаратов — массовые измерения в океанах. Очевидно, что важным фактором является их стоимость. Снижение стоимости САНПА возможно за счет уменьшения размеров аппарата и применения набора микросенсоров с малым потреблением энергии. При этом потребуются также электродвигатели малой мощности, но с возможно высоким КПД. Для систем управления и навигации нужны акселерометры и гироскопы. Твердотельные акселерометры имеют удовлетворительную точность и нами применяются во всех новых разработках. К сожалению, микрогироскопы пока имеют недостаточную точность для сравнительно медленно маневрирующих объектов, какими являются АНПА.

#### Список литературы

1. Автономные необитаемые подводные аппараты / Под общ. ред. М. Д. Агеева. Владивосток, Дальнаука, 2000. 271 с.
2. Ageev M. D. An Analysis of Long-Range AUV, Powered by Solar Energy // OCEANS'95 Conference Proceedings. San Diego: IEEE.
3. Агеев М. Д. Управление распределением энергии при работе АНПА с питанием от солнечных батарей // Морские технологии. Вып. 1. Владивосток: ДВО РАН, 1996. С. 21—36.
4. Ageev M. D., Jalbert J. C., Blidberg D. R. Description and Analysis of a Solar Autonomous Underwater Vehicle // MTS Journal. Vol. 32. N 4. Winter 1998—99.
5. Blidberg D. R., Jalbert J. C., Ageev M. D., Darwin J. Solar Powered Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Sampling Systems for the 21st Century. May 1997. Oceanology International'97 Pacific Rim.
6. Blidberg D. R., Jalbert J. C., Darwin J. and Ageev M. D. Some Design Considerations for a Solar Powered AUV; Energy Management and its Impact on Operational Characteristics" Proceedings of the 10th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, P 50—59.
7. Blidberg D., Jalbert J. C. and Ageev M. D. A Solar Autonomous Underwater Vehicle Systems. Oct. 97 Proceedings of Oceans'97 MTS/IEEE.
8. Агеев М. Д., Горняк В. Е., Хмельков Д. Б. О разработке экспериментального образца солнечного автономного подводного аппарата // Вестник ДВО РАН. 1998. № 3.

С. А. Гамкрелидзе, д-р техн. наук, В. А. Телец, д-р техн. наук,  
22 ЦНИИ Минобороны России,  
Ю. А. Котов, канд. техн. наук, МГУЛ

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ЭЛЕМЕНТАМИ "ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА"

*Рассмотрена концепция построения высокопроизводительных отказоустойчивых иерархических систем сбора и обработки информации в реальном масштабе времени с элементами "искусственного интеллекта" на основе перспективной элементной базы микросистемотехники*

Концепция широкомасштабной электронизации и компьютеризации информационно-измерительных систем (ИИС) промышленного и специального назначения предполагает непрерывное совершенствование используемых в них электронных средств сбора, преобразования, обработки и распределения информации в направлениях конструктивно-технологической и функциональной интеграции, повышения архитектурной и алгоритмической эффективности, производительности, качества и надежности.

Такого рода совершенствование ИИС основано на внедрении в них новых классов изделий электронной техники (прежде всего — микроэлектроники), перспективных технологий проектирования и производства, конструкционных материалов и компонентов, методов и средств испытаний.

С этой целью уже на начальных этапах внедрения в ИИС больших и сверхбольших интегральных микросхем (БИС, СБИС), выполняющих функции сбора, преобразования и цифровой обработки информации в реальном масштабе времени, было предложено — в качестве предпочтительного — иерархическое построение электронных средств, при котором выполняемые ими алгоритмиче-

ские задачи разделяются на классы при условии совмещенного во времени исполнения [1].

На современном этапе развития микроэлектроники, когда минимальные топологические размеры активных элементов СБИС смещаются в субмикронную и нанозлектронную области, стало возможным качественное изменение конструктивно-технологического и архитектурно-алгоритмического облика электронных устройств в составе ИИС, в том числе — за счет введения элементов и алгоритмов "искусственного интеллекта".

В значительной степени это отразилось на подсистемах первичного и вторичного преобразования формы и вида информации или, как их еще называют в технической литературе, подсистемах первичной обработки (предобработки) информации.

Особенности конструктивно-технологического исполнения этих подсистем таковы, что они могут объединять в своем составе все основные функциональные электронные узлы тракта предобработки информации (ТПИ) канала ИИС, такие как (рис. 1):

— входные чувствительные элементы (в составе преобразователей физических величин и компонентов датчиков, осуществляющих

первичное преобразование параметров внешней среды в электрические сигналы);

— устройства нормализации сигнала (устройства выборки и хранения, аналоговые мультиплексоры, логарифмические и измерительные усилители, фильтры и др.);

— устройства аналого-цифрового (вторичного) преобразования сигнала;

— схемы компенсации уходов параметров преобразования под воздействием дестабилизирующих факторов (температурных, радиационных и т. п.).

Очевидно, что все перечисленные функциональные узлы ТПИ канала ИИС могут быть спроектированы и изготовлены на основе единых (или подобных) алгоритмических принципов и технологических процессов, используемых в микроэлектронике.

Микроэлектронные технологии изготовления ТПИ открывают принципиально новые возможности по одновременному измерению (преобразованию) нескольких видов физико-химических величин (мультидатчиковые ТПИ), дальнейшей цифровой обработке информации и ее передаче на исполнительные (оконечные) устройства в реальном масштабе времени.

Тем самым обеспечивается функциональное и алгоритмическое разделение ТПИ на тракты сбора и обработки информации о входных измеряемых величинах и тракты мониторинга (непрерывного контроля) влияющих величин, являющихся, по сути, внешними воздействующими факторами (климатическими, механическими, радиационными, биологическими).

Совмещенное исполнение ТПИ в едином микроэлектронном устройстве (например, в виде СБИС, гибридной интегральной схемы, многокристального модуля и т. п.) придает им новые целевые свойства, обеспечивающие адаптивное функционирование

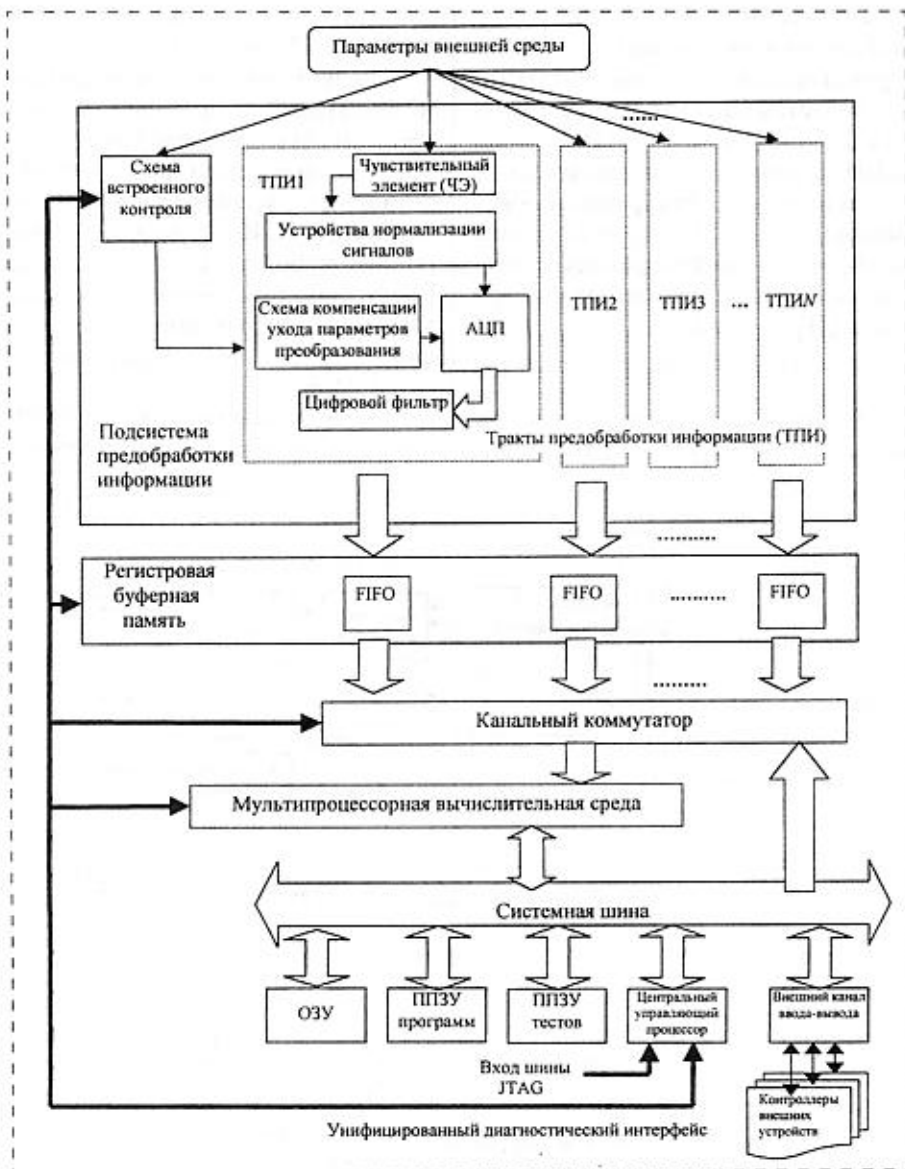


Рис. 1. Иерархическая структура приемной части ИИС (вариант)

ние в условиях влияния внешних дестабилизирующих факторов.

Создаются предпосылки для появления и развития "интеллектуальных" систем сбора и обработки информации ("интеллектуальных" ИИС, прообразы которых называются также "интеллектуальными датчиковыми системами").

В обобщенном виде признаки "интеллектуальности" ИИС и их комплектующих (в соответствии с которыми определяется иерархический уровень ИИС) можно представить совокупностью следующих функциональных свойств:

— выполнение первичного преобразования информации о входной физической (химической) величине, что соответствует первому иерархическому уровню системы;

— нормализующая обработка (выборка и хранение, усиление, согласование сопротивлений и уровней, фильтрация и т. п.) и аналого-цифровое (вторичное) преобразование сигналов, что соответствует второму иерархическому уровню системы;

— наличие внешней двусторонней шины для связи с

процессорными управляющими и периферийными устройствами;

- программируемость, совместимость и способность к выполнению команд и логических операций, задаваемых по цифровым входам;

- наличие элементов и устройств самоконтроля и диагностики, автокалибровки и масштабирования, автокомпенсации погрешностей;

- устойчивость к внешним дестабилизирующим факторам, не относящимся к категории входных преобразуемых (измеряемых) величин.

Свойства системы, не отнесенные выше к конкретному иерархическому уровню, могут перераспределяться между ними в зависимости от функциональной сложности СБИС ТПИ канала ИИС.

В целом рассматриваемые электронные устройства представляют собой динамические системы [2, 3], для которых характерны:

- многовариантность конструктивно-технологического исполнения  $V_i(T)$ , определяемая уровнем развития в данный период и критериями реализуемости в составе СБИС ТПИ, выраженными через  $R$ -систему целевых функций [4]:

$$R = \begin{cases} \Phi = \{V_i, S_{tr}, [h_j, I_{npj}], r, N\}; \\ t_c = \{S_{tr}, n_{tr}, \Phi, r\}; \\ \Psi = \{N_{tot}, [h_j, I_{npj}], r, N\}; \\ \dots \dots \dots \\ S_{кр} = \{S_{tr, min}, \Phi, r, N\}; \\ P = \{S_{tr}, t_c, \Phi, r, N\}; \\ r = \{S_{tr}, S_{кр}, \Phi, n_{tr}, V_i\}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $V_i$  — выбранный вариант структурно-алгоритмического построения ТПИ;  $t_c$  — быстродействие (время преобразования, измерения);  $\Phi$  — показатель функциональной сложности системы (в баллах);  $\Psi$  — показатель конструктивно-технологической сложности;  $S_{кр}$ ,  $S_{tr}$  — площади кристалла и транзистора;  $n_{tr}$  —



число транзисторов (степень интеграции);  $[h_j, l_{пр. j}]$  — параметры и проектные нормы транзисторов;  $N_{то}$  — число технологических операций;  $P$  — мощность, рассеиваемая кристаллом;  $r$  — разрешающая способность преобразования ( $r = 1/b$  — величина, обратная числу разрядов преобразования  $b$ , 1/бит) или чувствительность системы по входу;  $N$  — число каналов (преобразования, измерения);

- изменение значений параметров-критериев качества  $K = k_1, \dots, k_n$ , влияющих на реализацию варианта конструктивно-технологического исполнения  $V(t)$  СБИС ТПИ в данный период времени (или на данном этапе развития микроэлектроники);
- иерархичность структуры проектирования;
- многовариантность развития элементарно-технологического базиса СБИС, описываемая вектором функционалов:

$$f[V_i(T)] = f_{i1}[V(T)], \dots, f_{in}[V(T)],$$

где  $i$  — номер показателя качества ( $i = \overline{1, n}$ ), характеризующий данный уровень развития технологии СБИС;  $T$  — продолжительность по времени оцениваемого периода развития;

- стохастичность развития, оцениваемая вероятностными мерами на множестве значений каждого из показателей  $f[V_i(T)]$ , которые выступают в виде числовых характеристик для интегральной оценки вариантов  $V(T)$  исполнения системы за период  $T$ .

Как следует из состава аргументов целевых функций  $R$ -системы критериев реализуемости, она устанавливает зависимости между электрофизическими, топологическими и конструктивно-технологическими характеристиками СБИС ТПИ канала ИИС. При этом учитываются фундаментальные физические ограничения,

накладываемые на полупроводниковый материал и технологию их проектирования и производства.

В составе функций  $R$ -системы (1) реализуемости ТПИ в виде СБИС, помимо технологических характеристик, фигурируют аргументы  $r, t_c$  и  $N$ , которые в прямом и обратном соотношениях характеризуют производительность канала ( $\Pi_{ТПИ}$ , бит/с):

$$\Pi_{ТПИ} = bN/t_c. \quad (2)$$

Величина, обратная производительности ( $1/\Pi_{ТПИ} = N/(rt_c)$ ), ха-

рактеризует пропускную способность ТПИ канала ИИС [4].

Следует отметить, что применение мультидатчиковой (многоканальной) подсистемы преобразования информации позволяет обслуживать уровень производительности ИИС порядка 10 млрд опер/с и более. В связи с этим предъявляются высокие требования к скорости обработки информации на третьем иерархическом уровне.

Техническая реализация ИИС для удовлетворения этих требова-

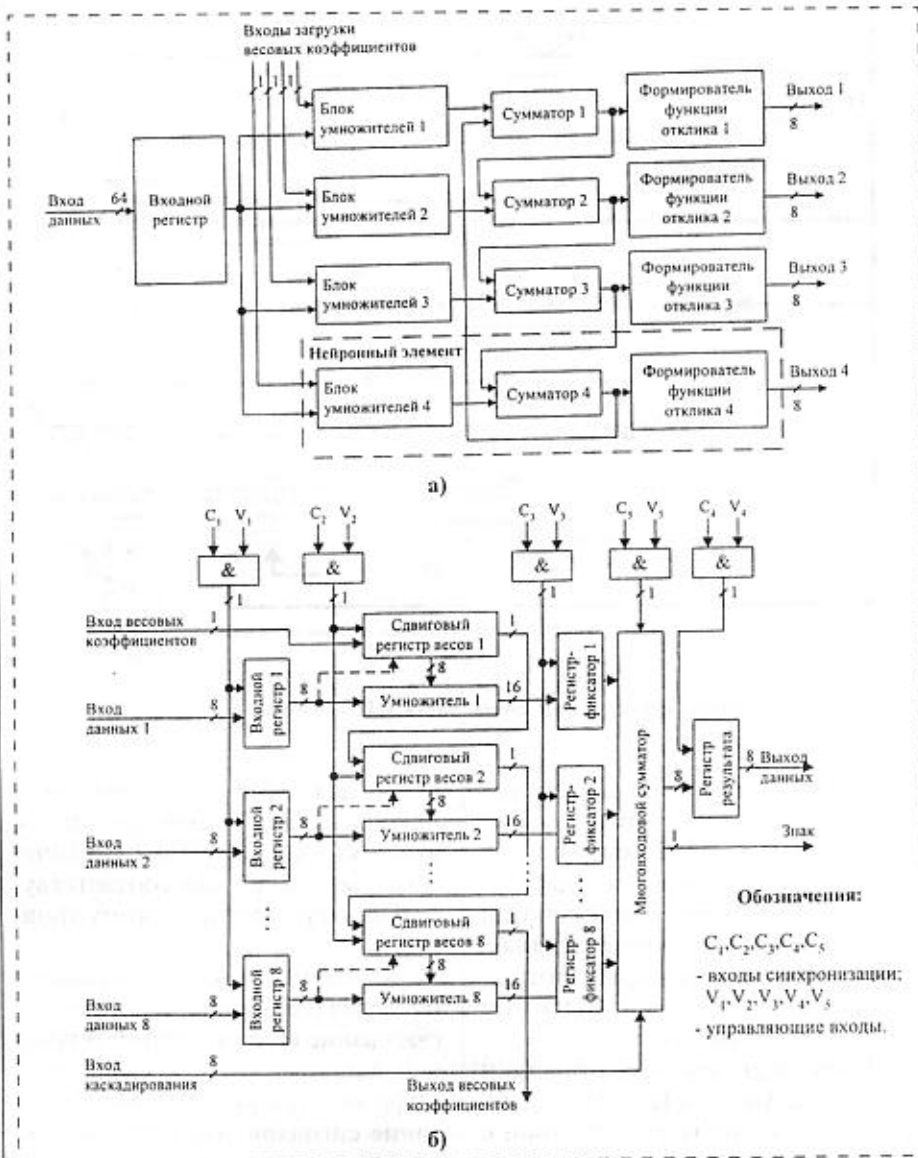


Рис. 2. Структурное построение СБИС "Нейрон-1" (разработчик "Научный центр нейрокомпьютеров", г. Москва): а — общая структурная схема кристалла; б — структурная схема одного нейронного элемента

ний возможна на основе перспективного направления развития изделий микроэлектроники — мультипроцессорных вычислительных сред, архитектурно-структурной базой которых могут служить нейронные сети и однородные вычислительные среды (ОВС).

С точки зрения максимального распараллеливания процесса обработки первично преобразованной информации предпочтительна аппаратная реализация нейронной сети в многослойных структурах, образуемых процессорными элементами и моделирующими цифровой нейрон. Их настройка и обучение осуществляется через центральный процессор.

Принципиальное преимущество нейронных структур состоит в их устойчивости к внезапным отказам, поскольку по мере выхода из строя отдельных нейронных процессорных элементов наблюдается деградиационный процесс, позволяющий до определенного предела выполнять задачу обработки.

Возможность обучения, а в перспективе и самообучения, нейронной сети дает возможность адаптировать вычислительную технику к различным внешним сигналам и дестабилизирующим воздействиям, распознавать и восстанавливать образы в реальном масштабе времени.

Элементной базой такой нейронной сети являются заказные и полузаказные СБИС со специализированной структурой, являющейся составляющим фрагментом слоя процессорных нейронных элементов (рис. 2) [5].

Другим направлением создания мультипроцессорных устройств с требуемыми техническими характеристиками является использование ОВС, образуемых прямоугольными программно-коммутируемыми матрицами процессорных элементов с разрядностью 1 бит и более, обладающих четырьмя портами ввода-вывода данных.

Для построения ОВС в середине 90-х годов была создана отечественная СБИС 1839ВМ5, содер-

жащая на кристалле более 100 одноразрядных процессорных элементов (рис. 3).

Благодаря высокой степени параллелизма и поточной обработке ОВС обладают большой пропускной способностью, а их производительность в процессе вычислений прямо пропорциональна размеру матрицы процессорных элементов и не имеет явных архитектурно-структурных ограничений [6]:

$$P_{\text{ОВС}} = \alpha_{\text{ОВС}} C_{\text{ОВС}} M_{\text{пэ}} n_{\text{пэ}} \times F_c (f_T n_d)^{-1}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{ОВС}}$  — производительность, млн опер/с;  $\alpha_{\text{ОВС}}$  — коэффициент, равный 0,7;  $C_{\text{ОВС}}$  — число СБИС ОВС в модуле;  $M_{\text{пэ}}$  — число процессорных элементов на кристалле СБИС ОВС;  $n_{\text{пэ}}$  — разрядность процессорного элемента, бит;  $F_c$  — тактовая частота СБИС ОВС, МГц;  $f_T$  — число тактов выполнения операции в процессорном элементе;  $n_d$  — разрядность обрабатываемых данных, бит.

Матрица ОВС обеспечивает также возможность перекоммутаций при организации прохождения информации "в обход" отка-

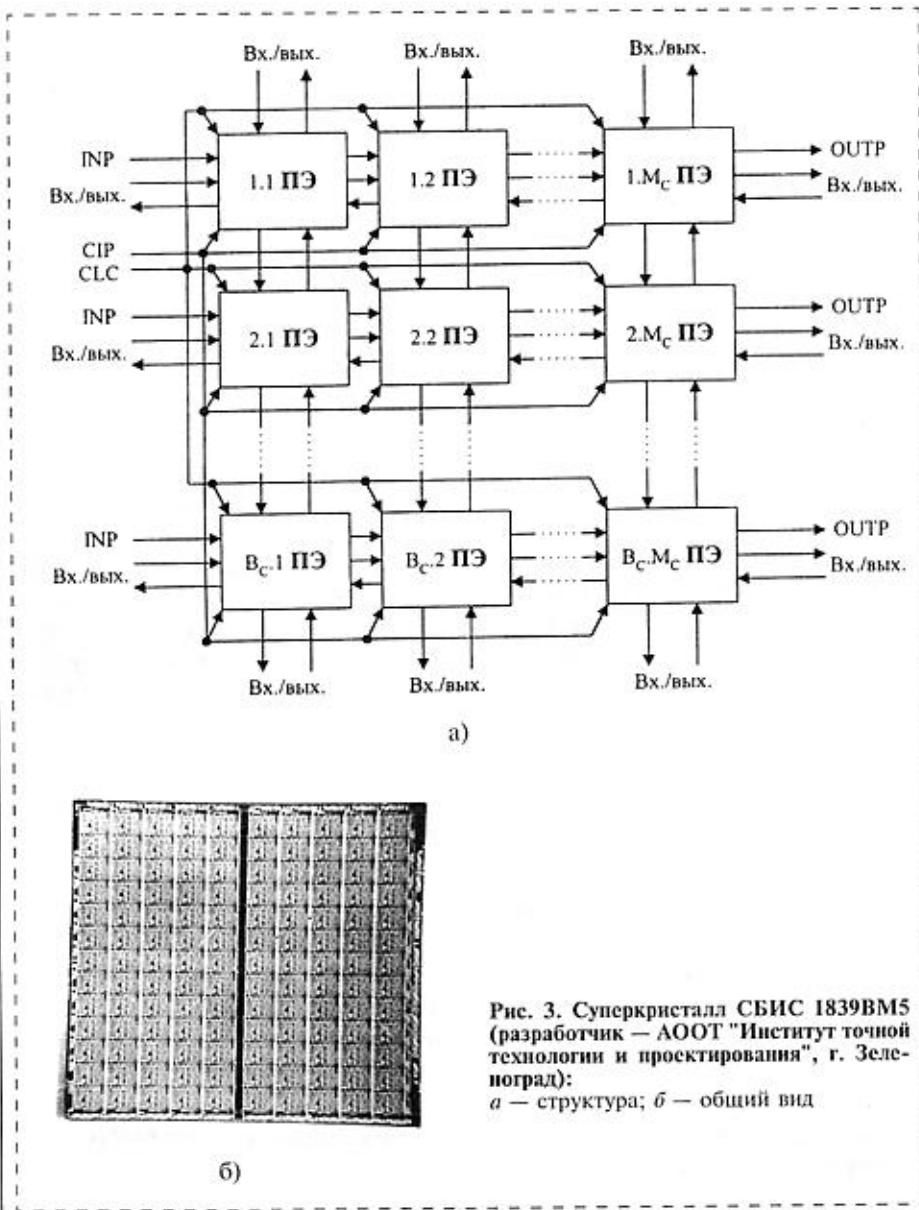


Рис. 3. Суперкристалл СБИС 1839ВМ5 (разработчик — АОТ "Институт точной технологии и проектирования", г. Зеленоград): а — структура; б — общий вид

завших процессорных элементов, что в значительной степени повышает отказоустойчивость системы.

В оптимальном варианте матрица ОВС делится на кластеры, внутри которых формируется распределенная схема резервных процессорных элементов. Часть из них используется на этапе изготовления кристаллов СБИС для повышения выхода годных, а оставшиеся позволяют парировать отказы непосредственно в процессе эксплуатации, реализуя принципиально новое качество СБИС — свойство самовосстановления [7].

В структуре ОВС может эмулироваться нейронная сеть [8], что позволяет создавать сверхпроизводительные высоконадежные мультипроцессорные устройства обработки сигналов и изображений, в которых сбое- и отказоустойчивость нейронной сети сочетается со свойством самовосстановления ОВС.

Очевидно, что в канале ИИС, построенном оптимальным образом, точность и быстродействие процессов в ТПИ должны быть сопоставимы с аналогичными характеристиками последующих трактов цифровой обработки информации. Другими словами, используя функции и аргументы (1)–(3), имеем:  $P_{ТПИ} \approx P_{ОВС}$ .

В то же время алгоритмические и программные возможности цифровой обработки информации в целом и ОВС или нейронной сети — в частности, позволяют корректировать результаты первичного и вторичного преобразования в ТПИ канала ИИС. Тогда допустимым становится определенное снижение технических требований к параметрам и характеристикам ТПИ.

В то же время перераспределение вычислительной мощности в системе обработки информации при ужесточении требований к производительности на третьем иерархическом уровне позволяет снизить требования по произво-

дительности центрального управляющего процессора системы.

Тогда вместо СБИС с суперскалярной архитектурой можно использовать RISC-процессоры со средним уровнем производительности (порядка 20...25 млн опер./с). Это могут быть, например, СБИС R3000 фирмы MIPS Computer Systems (США) или аналогичные отечественные микропроцессоры.

Выбор СБИС RISC-процессоров связан также с тем, что их архитектура предусматривает, как правило, возможность мультипроцессорной организации (типовое число процессоров 2...4). Тем самым, требуемая вероятность безотказной работы обеспечивается "горячим" резервированием на уровне центральных процессоров.

В системе на рис. 1 можно выделить четвертый уровень обработки информации, реализуемый на основе программируемых контроллеров внешних устройств и исполнительных механизмов. В качестве элементной базы этого иерархического уровня могут использоваться СБИС микроконтроллеров и встроенные или автономные функциональные элементы микроэлектроники [9].

Свойство контролепригодности ИИС как важная составляющая эксплуатационной надежности может быть обеспечено средствами встроенного контроля СБИС и унифицированного диагностического интерфейса (шины GTAG) [10]. Эффективной представляется реализация этого свойства путем синтеза распределенной системы тестового диагностирования, охватывающей все иерархические уровни ИИС и ее элементов.

"Интеллектуальность" ИИС с позиции современного восприятия этого термина может быть определена, исходя из трех существующих поколений систем.

К первому поколению относятся микропроцессорные ИИС, реализующие программные функции самоконтроля и диагностики, а

также адаптации алгоритмов и режимов функционирования по данным о реальных условиях применения.

Ко второму поколению относятся системы, алгоритмы функционирования которых учитывают параметры адекватных аналитических моделей и зависимостей, содержащих результаты измерений не в виде данных, а в виде совокупных "знаний" о значениях и характере изменений параметров входных измеряемых и влияющих контролируемых величин внешней среды.

К третьему поколению относятся системы с выраженными способностями к самообучению и принятию решений, которые обладают большим объемом экспертной памяти (базы данных и "знаний") и развитыми функциями планирования поведения, автоматического перепрограммирования в процессе коррекции программ, выработки корректирующих действий.

Изложенные выше концептуальные подходы к построению высокопроизводительных отказоустойчивых ИИС с элементами "искусственного интеллекта" основаны, таким образом, на сочетании принципов иерархической организации электронных систем и адаптивной обработки информации по распределенным алгоритмам в реальном масштабе времени.

Техническая реализация данных принципов предполагает использование в ИИС нового поколения элементной базы микроэлектроники, включая классы функционально сложных устройств:

- первичного и вторичного преобразования информации (преобразователи физических величин и компоненты датчиков, мультидатчиковые структуры, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи);
- высокопроизводительные отказоустойчивые мультипроцессорные схемы и модули с

нейронной архитектурой (или построенные в виде ОВС);

- элементы микросистемотехники (исполнительные устройства микроэлектроники, наноструктуры).

Необходимая для построения отказоустойчивых иерархических ИИС элементная база микроэлектроники общего и специального назначения обеспечивается современными и перспективными возможностями электронной отрасли России и отвечает требованиям к производительности и устойчивости к воздействию внешних факторов.

#### Список литературы

1. Гамкрелидзе С. А., Завьялов А. В., Мальцев П. П., Соколов В. Г. Цифровая обработка информации на основе быст-

родействующих БИС / Под ред. В. Г. Домрачева. М.: Энергоатомиздат, 1988. 136 с.

2. Телец В. А., Комаров Д. А. Датчики в системах управления технологическими процессами // Сб. тез. докладов межрегиональной научно-технической конференции "Комплексное математическое и физическое моделирование. Обеспечение надежности электронных приборов и аппаратуры". Бердянск, 1994.

3. Телец В. А., Гамкрелидзе С. А., Комаров Д. А. Интеллектуальные датчики как новый класс элементной базы нейронных систем // Доклады 2-й Всероссийской конференции "Нейрокомпьютеры и их применение" (Москва, 1996).

4. Телец В. А. Синтез показателей качества микросистемных преобразователей информации // Избранные труды научной сессии МИФИ. М.: МИФИ. Ч. 5. 1998. С. 219—221.

5. Галушкин А. И. Некоторые исторические аспекты развития элементной базы вычислительных систем с массовым параллелизмом (80-е и 90-е годы) // Нейрокомпьютеры. Разработка. Применение. 2000. № 1. С. 68—82.

6. Степанов Ю. И., Гамкрелидзе С. А. Оценка производительности БЦВМ для робототехнических комплексов // Обзорно-аналитический сборник СПП РАН "Воснная робототехника". М.: СПП РАН, 1998. С. 28—30.

7. Гамкрелидзе С. А., Дорошевич В. К. Определение надежных характеристик суперкристаллов на этапе производства и эксплуатации // Труды 22 ЦНИИ МО. Вып. 46. 1994. С. 107—118.

8. Гамкрелидзе С. А. Применение однородных вычислительных сред для реализации нейрокомпьютеров // Сб. докладов 5-й Всероссийской конференции "Нейрокомпьютеры и их применение" (Москва, 1999).

9. Никифоров А. Ю., Телец В. А. Микроэлектронные преобразователи физических величин и компоненты датчиков как основа элементной базы микросистемной техники // Тез. докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Сенсоры и микросистемы" (Санкт-Петербург, 2000).

10. IEEE Std. 1149.1. Standart Test Access Port and Boundary — Scan Architecture // IEEE Computer Press. New York, 1989.



Министерство промышленности науки и технологий РФ, Администрация Санкт-Петербурга, Российский союз промышленников и предпринимателей, Союз промышленников и предпринимателей (работодателей) Санкт-Петербурга, Санкт-Петербургский центр международного сотрудничества, ООО "Выставки-Семинары-Бизнес", Выставочное объединение "РЕСТЭК"

## ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. ИНВЕСТИЦИИ.

М и х а й л о в с к и й  
М а н е ж  
Санкт-Петербург

**Тематика**  
**дней**  
**перспективных**  
**технологий:**

- Аэрокосмические технологии.
- Новые технологии эффективного использования генетических ресурсов растений в сельскохозяйственном производстве.
- Прогнозирование и ликвидация последствий техногенных катастроф

**ОРГАНИЗАТОР**  
**КОНГРЕССА:** ООО "ВСБ"

Тел./факс:  
(812) 327-5574  
E-mail:  
hitech@esb.spb.su



**ОРГАНИЗАТОР**  
**ВЫСТАВКИ:**



Дирекция научно-промышленных выставок ВО "РЕСТЭК"

Телефон: (812) 320-8092, 235-0497 Факс: (812) 320-8090  
E-mail: sci&ind@restec.spb.su Internet: <http://www.restec.ru>

# МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ MST

УДК 621.3

**А. В. Ларионов, В. Б. Тимофеев,**  
Институт физики твердого тела РАН  
(Черноголовка),  
**J. M. Hvam, C. B. Soerensen,**  
Microelektronik Centret (Denmark)

## КОЛЛЕКТИВНОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕЖЪЯМНЫХ ЭКСИТОНОВ В ДВОЙНЫХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ СОЕДИНЕНИЙ GaAs/AlGaAs

*В двойных GaAs/AlGaAs квантовых ямах (n-i-n структуры) исследованы спектры фотолюминесценции (ФЛ) межъямных экситонов, у которых связанные электрон и дырка пространственно разделены узким AlAs барьером. При резонансном возбуждении циркулярно поляризованным светом обнаружено значительное сужение линии люминесценции межъямных экситонов с ростом их концентрации и сильное увеличение степени циркулярной поляризации ФЛ. Установлено, что в этих условиях существенно возрастает скорость излучательной рекомбинации. Обнаруженное явление наблюдается при температурах ниже критической и интерпретируется в терминах коллективного поведения межъямных экситонов.*

### Введение

Туннельно связанные квантовые системы, сверхрешетки и двойные квантовые ямы (ДКЯ) давно являются объектами интенсивных исследований [1–8]. Интерес к таким двумерным системам обусловлен принципиальной возможностью пространственного разделения фотовозбужденных электронных и дырочных носителей заряда. В ДКЯ с приложенным электрическим смещением, наклоняющем зоны, можно возбуждать экситоны, в которых электрон и дырка находятся в разных квантовых ямах (КЯ), разделенных туннельно прозрачным барьером. Такие экситоны называются *пространственно непрямыми* (I), или *межъямными* (MЭ), в отличие от *прямых внутриямных экситонов* (D), у которых электрон и дырка расположены в одних и тех же КЯ. Межъямные экситоны по сравнению с внутриямными являются долгоживущи-

ми, поэтому их нетрудно накапливать, а сам газ таких экситонов может быть охлажден до достаточно низких температур. Из-за нарушенной инверсной симметрии MЭ имеют дипольный момент уже в основном состоянии. Теория предсказывает различные возможные сценарии коллективного поведения в системе пространственно разделенных электронов и дырок [1, 9–14]. Так, в работе Бермана и Лозовика [14] показано, что, несмотря на диполь-дипольное отталкивание MЭ при определенных критических параметрах — дипольном моменте MЭ, их плотности и температуре — устойчивым состоянием в электрон-дырочной системе может оказаться жидкая диэлектрическая фаза таких экситонов. Ранее в работе [11] указывалось, что конденсированная диэлектрическая экситонная фаза может возникать только при наличии латерального конфайнмента (случайного или искусственно приготовленного) в плоскости КЯ. Такой конфайнмент и связанное с ним внешнее сжатие позволяют реализовать в газе межъямных экситонов достаточно большие плотности.

В реальных туннельно-связанных квантовых системах на основе полупроводниковых гетероструктур всегда присутствует случайный потенциал из-за разнообразных структурных дефектов — остаточных примесей (заряженных и нейтральных), флуктуаций ширины барьера и ширин самих КЯ и пр. Эти флуктуации создают случайный потенциальный рельеф в плоскостях КЯ, поэтому фотовозбужденные и пространственно разделенные между соседними КЯ электроны и дырки, а также экситоны оказываются сильно локализованными на этих флуктуациях, если температуры достаточно низкие. Такой эффект локализации в связанных квантовых системах проявляется, в частности, в латеральном термоактивационном туннелировании носителей заряда и обнаруживается в экспериментах по спектральному сужению с ростом температуры линии люминесценции, соответствующей межъямной излучательной рекомбинации [7].

Исследовалась ФЛ межъямных экситонов в ДКЯ с барьером, содержащим четыре монослоя AlAs, разделяющих КЯ. При столь узких барьерах межъямные экситоны являются достаточно сильно связанными. В этих условиях MЭ оказываются локализованными на латеральных флуктуациях случайного потенциала без существенных изменений своей внутренней структуры, если линейные масштабы флуктуаций  $l > a_B$  (боровский радиус экс-

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 98-02-16656 и грантом межведомственной программы "Наноструктуры".

тона  $a_B \approx 100 \text{ \AA}$ ), а амплитуды флуктуаций  $\Delta > kT$ . Известно, что в структурах с узкими AlAs барьерами флуктуации размеры ширины барьера имеют крупномасштабный характер, а значит, крупномасштабными будут соответствующие им флуктуации латерального потенциального рельефа. Естественно ожидать, что МЭ при достаточно низких температурах будут находиться в таких случайных латеральных потенциальных ямках большого масштаба. Интересно знать, будет ли система МЭ в условиях такого случайного латерального конфайнмента демонстрировать критическое поведение при увеличении плотности и низких температурах. Попытаемся ответить на затронутые вопросы.

### Образцы и техника эксперимента

Исследовалась  $n-i-n$  GaAs/AlGaAs гетероструктура с двойной квантовой ямой GaAs/AlAs/GaAs (ширина GaAs ям  $\approx 120 \text{ \AA}$  и шириной AlAs барьера  $\approx 11 \text{ \AA}$ ). Структура выращивалась с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии на легированной GaAs подложке  $n$ -типа (концентрация легирующей примеси Si составляет  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) с кристаллографической ориентацией (001). На подложку сначала наращивался буферный слой  $0,5 \text{ мкм}$  GaAs, легированный Si ( $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Затем располагался изолирующий слой AlGaAs ( $x = 0,33$ ) толщиной  $0,15 \text{ мкм}$ . Далее наращивались ДКЯ GaAs/AlAs/GaAs. За ДКЯ располагался изолирующий слой AlGaAs толщиной  $0,15 \text{ мкм}$ . Далее шел слой  $0,1 \text{ мкм}$  GaAs, легированный Si ( $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Вся структура закрывалась  $100 \text{ \AA}$  слоем GaAs. На структуре литографическим способом изготавливались мезы размером  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ . Металлические контакты из сплава Au + Ge + Pt наносились на буферный слой и легированный слой на верхней части мезы.

Спектры люминесценции исследовались в условиях резонансного возбуждения внутриямных прямых экситонов на тяжелых дырках с помощью перестраиваемого Ti-сапфирового лазера. В целях оптической ориентации углового момента в экситоне использовалось циркулярно поляризованное резонансное возбуждение. Кинетика спектров люминесценции исследовалась при импульсном возбуждении пикосекундным лазером (длина волны  $6200 \text{ \AA}$ , длительность импульса  $30 \text{ пс}$ , частота следования  $0,8 \text{ МГц}$ ), регистрация временной эволюции спектров и кинетики интенсивностей велась с помощью системы время-скоррелированного счета фотонов.

### Экспериментальная часть

♦ На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) представлены спектры люминесценции межъямных  $I_{ex}$  экситонов, измеренные при резонансном возбуж-

дении IsHH экситона и различных приложенных электрических смещениях. В области внутриямной люминесценции при нулевом электрическом смещении видны две линии — свободного, IsHH и связанного экситона ( $T$ ). При отрицательном электрическом смещении, начиная с  $-0,4 \text{ В}$ , в спектрах появляется линия межъямной излучательной рекомбинации, которая линейно смещается в сторону меньших энергий при увеличении приложенного напряжения (см. вставку к рис. 1). При этом в спектре внутриямной рекомбинации остается только линия заряженного экситонного комплекса  $T$  [15]. При больших отрицательных смещениях  $U < -0,8 \text{ В}$  и стационарном возбуждении в спектрах остается заметной только линия люминесценции межъямных экситонов, а люминесценция прямых внутриямных экситонов и экситонных комплексов на несколько порядков слабее по интенсивности. Интенсивность линии МЭ в зависимости от приложенного отрицательного смещения ведет себя немонотонным образом. Она возникает в спектре люминесценции при электрических смещениях, когда шарковский сдвиг превышает разность энергий связи внутриямного и межъямного экситонов:

$$eFz \geq E_D - E_I.$$

При  $U \approx -0,7 \text{ В}$  интенсивность этой линии максимальна, а затем монотонно падает с ростом электрического поля (см. рис. 1). Такое поведение трудно понять, учитывая что с ростом поля растет эффективный дипольный момент межъямного экситона в направлении роста структуры (ось  $z$ ), при этом перекрытие волновых функций электрона и дырки в экситоне монотонно уменьшается.

♦ Линия люминесценции МЭ при достаточно низких температурах ( $T = 2 \text{ К}$ ) и небольших накачках имеет большую ширину ( $\text{FWHM} = 4 \div 5 \text{ мэВ}$ ), а сама форма линии асимметрична с достаточно протяженным длинноволновым "хвостом" и относительно резкой фиолетовой границей (рис. 2, см. вторую сторону обложки). Такие особенности линии ФЛ межъямных экситонов являются следствием их сильной локализации на флуктуациях случайного потенциала. В этом случае ширина линии отражает статистическое распределение амплитуд случайного потенциала (подразумеваются столь низкие накачки,  $n_{e-h} < 10^9 \text{ см}^{-2}$ , что заполнение межъямными экситонами латеральных случайных потенциальных ям с линейными масштабами  $l < 1 \text{ мкм}$  не превышает единицы). Ширина и форма линии люминесценции МЭ существенно изменяется при увеличении мощности резонансного возбуждения прямых, IsHH, внутриямных экситонов циркулярно поляризованным светом. Линия  $I$  сужается с ростом накачки вплоть до  $1,5 \text{ мэВ}$ , т. е. более чем в 3 раза. Сужение линии сопровождается сильным

сверхлинейным ростом ее интенсивности (см. вставку к рис. 2). Только при больших накачках ( $P > 6 \text{ Вт/см}^2$ ) эта линия начинает сдвигаться в сторону больших энергий и несколько уширяться. Сдвиг линии в сторону больших энергий свидетельствует об экранировании приложенного электрического поля, когда плотность МЭ становится достаточно большой. Отсюда по величине сдвига можно оценить сверху плотность МЭ, когда ширина линии люминесценции становится минимальной. Эта оценка для концентрации дает  $n = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Мы наблюдали значительное сужение линии люминесценции МЭ при различных приложенных отрицательных напряжениях смещения от  $-0,5 \text{ В}$  до  $-1,2 \text{ В}$ . При больших отрицательных смещениях сужение линии люминесценции межъямных экситонов происходило при заметно меньших накачках.

♦ Интересно ведет себя степень циркулярной поляризации  $\gamma$  линии межъямных экситонов при увеличении мощности резонансного возбуждения (см. вставку рис. 2). В наших экспериментах при резонансном возбуждении циркулярно поляризованным светом рождались прямые,  $1s_{HH}$ , полностью спин-ориентированные экситоны ( $J_h = +3/2$  и  $S_z = -1/2$ ). В результате туннелирования носителей и связывания в межъямные экситоны, а также вследствие спин-решеточной релаксации и сильного для дырок спин-орбитального взаимодействия спиновая "память" МЭ частично теряется, но, тем не менее, остается высокой, и составляет почти 15–20 % при низкой плотности возбуждения. При увеличении мощности резонансного возбуждения, когда происходит сильное сужение линии люминесценции МЭ, степень циркулярной поляризации соответствующей линии возрастает более чем в 2 раза. Если предположить, что с ростом накачки скорость спиновой релаксации  $\tau_s$  изменяется незначительно (скорее всего она только возрастет), то увеличение степени циркулярной поляризации естественно связать с уменьшением времени жизни  $\tau_d$  МЭ. Это следует из простого кинетического выражения, связывающего степень циркулярной поляризации с временами жизни и спиновой релаксации [16]:

$$\gamma = \gamma_0 / (1 + \tau_d / \tau_s).$$

При резонансном возбуждении линейно поляризованным светом (поляризация параллельна плоскости слоев) было обнаружено пороговое увеличение с ростом накачки циркулярной поляризации узкой линии ФЛ межъямных экситонов.

Когда же плотности возбуждения не велики и межъямные экситоны сильно локализованы на флуктуациях случайного потенциала, спектры ФЛ в таких условиях оставались полностью деполаризованными. Детали экспериментов с линейно поляризованным возбуждением будут опубликованы

отдельно. Итак, с ростом концентрации МЭ соответствующая линия ФЛ сужается, а степень ее поляризации увеличивается, что косвенно свидетельствует об укорочении времени излучательного распада. Это явление оказалось очень чувствительным к температуре. При увеличении температуры выше критических значений и фиксированной большой накачке ширина линии МЭ скачком возрастает, а степень циркулярной поляризации уменьшается до прежних значений (рис. 3, см. вторую сторону обложки). Критическая температура, при которой происходили столь драматические спектральные изменения в рассматриваемом случае составляла  $T_c \leq 6 \text{ К}$  ( $\Delta T = \pm 1 \text{ К}$ ).

♦ Нами исследована кинетика спектров ФЛ в условиях импульсного возбуждения с помощью пикосекундного лазера. При таком возбуждении в момент действия лазерного импульса горячие фотовозбужденные электроны и дырки рождаются в каждой из КЯ с равной плотностью и пространственно не разделены. На рис. 4 представлена временная эволюция спектров при импульсном возбуждении, измеренных с различными задержками от-

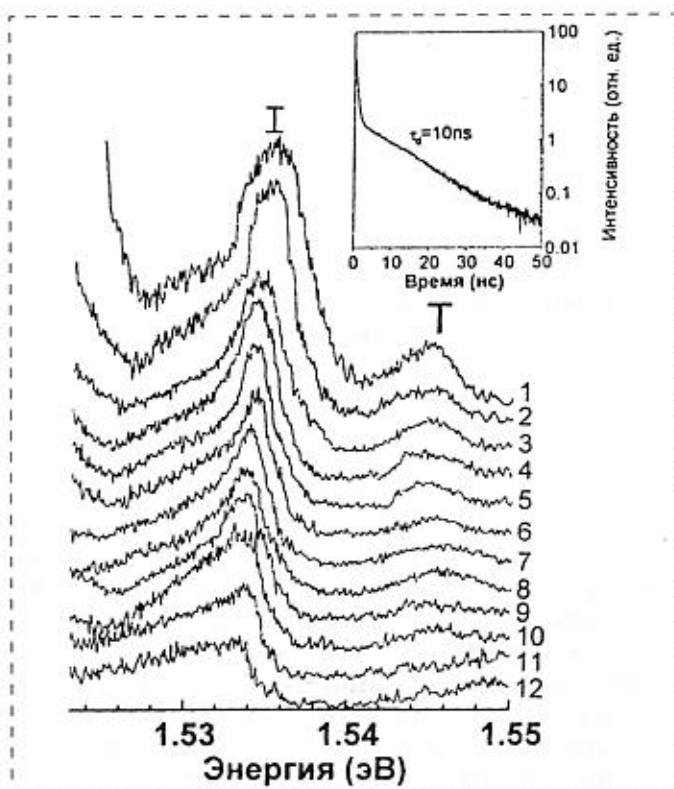


Рис. 4. Временная эволюция спектров и кинетика затухания люминесценции межъямных экситонов (см. вставку) в условиях импульсного возбуждения при  $T = 5 \text{ К}$  и смещении  $-0,7 \text{ В}$ . Спектры 1–8 измерены с временными задержками 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 нс и интегрированием 2 нс. Спектры 9–12 соответствуют задержкам 12, 16, 20, 25 нс и интегрированиям 4, 4,5 и 6 нс соответственно. Время затухания интенсивности узкой линии МЭ  $\tau_d = 10 \text{ нс}$

носителем возбуждающего лазерного импульса при  $T = 5$  К и приложенном напряжении  $U = -0,7$  В. При нулевых задержках в спектрах видна только область прямой внутриямной люминесценции. Спектр ФЛ межъямных экситонов формируется при задержках  $\tau \geq 2$  нс. Эта задержка является следствием туннелирования носителей через барьер, сопровождающегося пространственным разделением носителей заряда между КЯ, их внутриямной релаксацией по энергии и, одновременно, рекомбинацией. На рис. 4 видно, что при небольших задержках ( $< 10$  нс) на фиолетовой границе спектров межъямной ФЛ доминирует достаточно узкая линия. С ростом задержки эта линия существенно сужается. Ее ширина достигает 1,5 мэВ при задержке 6 нс, т. е. уменьшается почти в 3 раза по сравнению с ее шириной при начальных задержках. Интенсивность этой линии затухает во времени гораздо быстрее, чем бесструктурный спектр межъямной люминесценции под ней. При задержках более 20 нс эта линия уже не разрешается и сливается с бесструктурной частью спектра, который практически не меняет своей формы и наблюдается при задержках более 40 нс. Такое поведение очень хорошо видно в кинетике интенсивностей, измеренной непосредственно в спектральной позиции узкой линии (см. вставку к рис. 4). Следует отметить, что узкая полоса, отличающаяся коротковременной кинетикой затухания интенсивности в условиях импульсного возбуждения, наблюдается, как и в случае стационарного возбуждения, только при достаточно низких температурах. Так, в случае задержек 12 нс узкая линия при увеличении температуры начинает уширяться и сливается с бесструктурным фоном под ней при  $T \geq 6$  К. При меньших задержках, а значит, большей плотности МЭ эта линия исчезает в спектре при заметно больших температурах. Например, при задержке 7 нс узкая линия исчезает в спектрах при  $T \geq 10$  К. Такое же поведение время-разрешенных спектров и кинетики межъямной люминесценции наблюдается при различных приложенных напряжениях в интервале  $(-0,4; -0,9$  В).

### Обсуждение результатов и заключение

Всю совокупность представленных выше экспериментальных результатов не удастся объяснить в рамках простой одночастичной картины излучательной аннигиляции МЭ, локализованных на флуктуациях случайного потенциала. Так, если связать появление узкой линии в спектре ФЛ с межъямными делокализованными экситонами, которые появляются выше порога протекания, то остается совершенно непонятным, почему это явление столь критично к температуре и отсутствует при  $T > T_c$ . Неясным остается пороговое возраста-

ние степени циркулярной поляризации и сверхлинейный рост интенсивности этой линии. Вместе с тем эти результаты могут быть, по крайней мере, качественно объяснены как следствие коллективного поведения делокализованных МЭ при достижении критической температуры и концентрации. Можно предполагать, что в исследованных структурах с узким АІАс барьером присутствуют крупномасштабные флуктуации потенциала, в частности, обусловленные вариациями ширины барьера. Такие флуктуации потенциала плохо экранируются, в отличие от случайного потенциала из-за остаточных заряженных примесей, который также присутствует в исследованных структурах. Благодаря крупномасштабным флуктуациям потенциального рельефа в плоскости КЯ фотовозбужденные МЭ могут накапливаться в макроскопически больших областях с латеральным конфайнментом, вплоть до десятых долей микрометра. Именно в этих областях и происходят основные события, связанные с фотовозбужденными МЭ. Эти события могут развиваться по независимым сценариям, но в основе каждого из них предполагается коллективное взаимодействие в системе МЭ, делокализованных в пределах макроскопически больших латеральных областей.

В рамках одного из сценариев можно предположить, что МЭ при достижении критических плотностей и температуры конденсируются в металлическую  $e-h$  жидкость с пространственно разделенными электрон-дырочными слоями. Если связать узкую линию в спектре с возникающей жидкой фазой, то по ширине линии, которая в таком случае должна равняться сумме фермиевских энергий электронов и дырок, легко оценить сверху ее плотность. Таким образом определенная плотность равна  $3 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>, а соответствующий этой плотности безразмерный параметр  $r_s = 1/\sqrt{\pi n a_B^2} = 4$ . Конденсированная фаза в рамках этого подхода оказывается слишком рыхлой, чтобы кулоновское взаимодействие в межъямном экситоне оказалось полностью заэкранированным, т. е. экситоны при таких концентрациях должны сохранять свою индивидуальность, поэтому конденсированная фаза не может быть металлической. Это заключение подтверждают исследования спектров ФЛ в магнитном поле в геометрии Фарадея. Было установлено, что узкая линия, подобно свободному экситону, расщепляется на зеемановский дублет с соотношением интенсивностей  $\sigma^+/\sigma^-$  компонент, соответствующим температуре и спиновому расщеплению, т. е. индивидуальные свойства экситона сохраняются в конденсированной фазе. Детали этих экспериментов будут изложены в отдельной публикации.



Мы предполагаем, что эффект сильного сужения линии ФЛ МЭ и критичность этого явления к плотности и температуре могут быть связаны с конденсацией МЭ в диэлектрическую жидкость. В работе [14] показано, что достаточно плотная система МЭ при определенных величинах дипольного момента межъямного экситона может конденсироваться в диэлектрическую жидкость несмотря на диполь-дипольное отталкивание между такими экситонами. В работе [11] указывается, что такая конденсация скорее всего может происходить в областях с латеральным конфайнментом. Согласно нашим экспериментам, при стационарном возбуждении конденсация происходит при  $T < 6$  К и средней концентрации экситонов  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Сконденсировавшаяся часть экситонов должна быть сфазирована в пределах когерентной длины. Пространственная когерентность должна возникать по меньшей мере на масштабах де-Бройлевской длины волны МЭ  $\lambda_{ex}$ , которая при  $T = 2$  К составляет  $\lambda_{ex} = h/\sqrt{\pi mkT} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ \AA}$  и более чем на порядок превосходит борковский радиус экситона. В этих же условиях безразмерный параметр  $r = n\lambda_{ex}^2 = 4$ . На увеличение пространственной когерентности в конденсированной фазе косвенно указывает обнаруженное пороговое возрастание циркулярной поляризации межъямных экситонов. Далее, излучательный распад скоррелированных по фазе межъямных экситонов в конденсате должен отличаться заметно большими излучательными вероятностями по сравнению с ФЛ экситонов вне конденсата. Это заключение также согласуется с экспериментом. Тем не менее, существенный вопрос в обосновании предположения о конденсации МЭ в диэлектрическую жидкую фазу, который остается открытым и требует экспериментального ответа, связан с установлением линейных масштабов пространственной когерентности. Эта задача может быть решена экспериментально, в частности, с помощью измерений корреляций интенсивности в условиях, когда предполагаемая экситонная конденсация происходит.

\*\*\*

В заключение авторы благодарят В. Ф. Гантмахера, С. В. Иорданского, А. С. Иоселевича, В. Д. Кулаковского, Ю. Е. Лозовика, В. Г. Лысенко и Р. А. Суриса за интересные обсуждения.

#### Список литературы

1. Lozovik E. Yu. and Yudson V. I. // *Sov. Phys. JETP* 1976. V. 44. P. 389.
2. Fukuzawa T., Mendez E. E. and Hong J. M. // *Phys. Rev. Lett.*, 1990. N. 64. P. 3066.
3. Golub J. E., Mendez E. E., Harbison J. P. and Flores L. T. // *Phys. Rev. B* 1990. V. 41. P. 8564.
4. Kash J. A., Zachau M., Mendez E. E., Hong J. M., Fukuzawa T. // *Phys. Rev. Lett.*, 1991. V. 68. P. 247.
5. Butov L. V., Zrenner G. A., Abstreiter G. A., Boem G. and Weinmann // *Phys. Rev. Lett.*, 1994. V. 73. P. 04.
6. Bitov L. V. // *Proceedings of 23 Intern. Conf. Phys. Semiconductors*, p. Berlin, 1996.
7. Timofeev V. B., Fikin A. I., Larionov A. V., Martinez G., Zeman J., Hvam J. M. // *Europhys. Lett.*, 1998. V. 41. P. 435.
8. Timofeev V. B., Larionov A. V., Ioselevich A. S., Martinez G., Zeman J., Hvam J. // *JETP Lett.*, 1998. V. 67. P. 630.
9. Krivolapchuk V. V., Moskalenko E. S., Zhmodikov A. L., Cheng T. S., Foxon C. T. *Solid State Commun.*, 1999. V. 111. P. 49–54.
10. Yoshioka D. and MacDonald A. H. // *J. Phys. Soc. Japan* 1990. V. 59. P. 4211.
11. Chen X. M. and Quinn J. J. // *Phys. Rev. B* 1991. V. 67. P. 895.
12. Zhu Xuejun, Littlewood P. B., Hybersen M. S. and Rice T. // *Phys. Rev. Lett.*, 1995. V. 74. P. 1633.
13. Fernandes-Rossier J. and Tejedor C. // *Phys. Rev. Lett.*, 1997. V. 78. P. 4809.
14. Liu Lerwen, Swierkowski L. and Nelson D. // *Physica B*, 1998. V. 249–251. P. 594.
15. Лозовик Ю. Е., Берман О. Л. // *ЖЭТФ*, 1997. V. 111. P. 1879.
16. Timofeev V. B., Larionov A. V., Grassi Alessi M., Capizzi M., Frova A., Hvam J. M. // *Phys. Rev. B* 1990. V. 60. P. 8897.
17. Optical orientation, *Modern Problems in Condensed Matter Sciences* / Edited by F. Meyer and B. P. Zhakharchenya (Elsevier, Amsterdam, 1984), Vol. 8.
18. Ларионов А. В., Тимофеев В. Б. Коллективное поведение межъямных экситонов в GaAs/AlGaAs двойных квантовых ямах // *Нанофотоника. Мат-лы совещания (20–23 марта 2000 г., Нижний Новгород)*. М.: Ин-т физики микроструктуры РАН. 2000. С. 219–226.

УДК 620.186.12

**С. Ф. Ломаева, В. И. Повстугар, С. Г. Быстров, С. С. Михайлова,** Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск. Тел.: (3412) 21 2655, Fax (3412) 25 0614, e-mail: povst@uds.fti.udmurtia.su

## ВОЗМОЖНОСТИ АСМ-ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ЖЕЛЕЗА

*Работа посвящена исследованию методом атомной силовой микроскопии (АСМ) размеров, формы и микроструктуры поверхности высокодисперсных нанокристаллических порошков железа (ВПЖ), полученных тремя различными способами: электрическим осаждением, восстановлением в токе водорода и механоактивацией.*

### Введение

Многие свойства изделий из высокодисперсных порошков, такие как механические, теплофизические, магнитные определяются не только химическим составом и структурой материалов, но также размерами и формой исходных частиц.

Так, микроструктура и топографические особенности поверхности в решающей степени определяют адсорбционные и фрикционные свойства материалов. Кроме того, поверхностный слой по своим характеристикам может существенно отличаться от объема, причем эти различия становятся принципиальными при поверхностной модификации порошков, широко используемой для решения ряда прикладных задач. На размеры, форму частиц, топографические особенности поверхности в первую очередь влияют способы их получения.

Данная работа посвящена исследованию методом атомной силовой микроскопии (АСМ) размеров, форм и микроструктуры поверхности высокодисперсных нанокристаллических порошков железа (ВПЖ), полученных тремя различными способами: электролитическим осаждением, восстановлением в токе водорода и механоактивацией. Предварительно были получены данные о дисперсности и структуре этих порошков с использованием методов электронной микроскопии и рентгеновской дифракции [1, 2]. Эти методы позволяют получить плоское изображение частиц и усредненное по объему всех частиц значение размера зерна, однако не дают возможности получить трехмерное изображение частиц и исследовать топографические особенности поверхности частиц. Для исследования этих характеристик был использован метод АСМ,

который имеет высокое разрешение и чувствительность, и кроме того, дает возможность измерять различные свойства поверхности. Например, различие коэффициентов трения на разных участках поверхности (зерно, граница зерен) позволяет исследовать нанометровые особенности микроструктуры, не обнаруживаемые другими методами [3].

### Образцы и методика эксперимента

ВПЖ были получены тремя способами:

1. Электролитическое осаждение из водного раствора соли железа в присутствии олеиновой кислоты в качестве стабилизатора.

2. Высокотемпературное восстановление  $FeOON$  в токе водорода с последующей стабилизацией поверхности порошков олеиновой кислотой.

3. Измельчение в шаровой планетарной мельнице порошка карбонильного железа в среде гептана в присутствии небольших добавок (0,3 вес.%) олеиновой кислоты.

Поскольку поверхность исследуемых порошков гидрофобна вследствие стабилизации ее поверхностно-активным веществом (ПАВ), образцы для исследования готовились следующим образом: подложку из ситалла опускали в раствор полистирола в ацетоне, высушивали, затем на нее насыпали порошок, выдерживали 5 мин при  $T = 100^\circ C$ , остатки сдували сжатым воздухом. После этого образец 20 мин выдерживали под ультрафиолетовым облучением (УФ). Проходящие под действием УФ-облучения химические реакции между молекулами ПАВ и полистирола приводят к образованию между ними прочного межфазного слоя, который надежно закрепляет частицы на подложке.

Исследования выполнены на сканирующем зондовом микроскопе P4-SPM-MDT фирмы НТ-МДТ. Использовались кремниевые кантилеверы с радиусом кривизны иглы меньше 10 нм и углом схождения иглы при вершине менее  $20^\circ$ . Измерения выполнены на воздухе в режимах измерения топографии и боковых сил трения.

### Результаты и обсуждение

По данным электронной микроскопии и рентгеновской дифракции ВПЖ, полученные способом 1, имеют форму дендрида со средним размером 0,5 мкм. Средний размер блоков мозаики — 100 нм. ВПЖ, полученные способом 2, имеют форму, близкую к эллипсоидной, со средним размером частиц 80–90 нм и такими же размерами блоков мозаики. ВПЖ, полученные способом 3, имеют форму чешуек со средними размерами 2–4 мкм и средними размерами блоков мозаики — 4 нм.

С помощью АСМ было установлено, что полученные способом 1 частицы имеют неправильную, несколько вытянутую форму (рис. 1, а, б). Размеры частиц в длину составляют от 250 до 500 нм (средний размер — 350 нм), в ширину от 150 до 400 нм

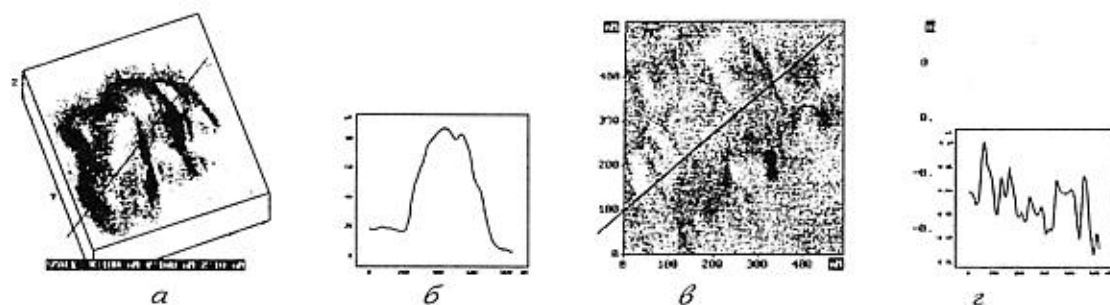


Рис. 1. АСМ-изображения частицы, полученные способом 1:

*a* — топография частицы; *б* — профиль частицы (плоскость сечения указана линией на рис. 1, *a*); *в* — изображение частицы в режиме боковых сил; *г* — профиль боковых сил (плоскость сечения указана линией на рис. 1, *a*)

(средний размер — 250 нм), в высоту — от 40 до 90 нм (средний размер — 50 нм). Размеры частиц, определенные с помощью АСМ, меньше, чем по данным электронной микроскопии. Это связано с тем, что частицы, форма которых из электронно-микроскопических снимков была определена как дендритная, оказались скоплениями нескольких частиц, выстроившихся в виде цепочек или веточек. После многократного сканирования такие скопления разделялись на отдельные частицы. На рис. 1, *a* приведено изображение поверхности частицы в режиме боковых сил, на котором четко различима зеренная структура. Длина зерен изменяется в пределах 60–220 нм, что совпадает с данными рентгеноструктурного анализа. Однако из представленного на рис. 1, *г* профиля боковых сил (сечение сделано поперек зерен), видно, что на поверхности имеются два вида образований с размерами 120–200 нм и более мелкие элементы структуры с размерами 30–50 нм. Как и авторы работы [3] мы полагаем, что более мелкие элементы структуры могут быть блоками с малоугловыми границами. Величина их разориентировки может не превышать минимальной чувствительности использованных рентгеновских методов.

На рис. 2, *a, б* представлены изображение и профиль частиц, полученных способом 2. Частицы имеют эллипсоидную форму, размеры эллипсоидов изменяются в пределах 200–500 нм (среднее

значение 270 нм) в длину, 60–150 нм (среднее значение 90 нм) в ширину и 25–50 нм (среднее значение 35 нм) в высоту. Средний размер частиц по данным электронной микроскопии составляет 80–90 нм, что совпадает только с одним из размеров, полученных методом АСМ. Разница в значениях может появляться в результате того, что на электронно-микроскопических снимках получается только проекция частицы, а под действием магнитных полей ферромагнитные частицы могут принимать различную ориентацию. На рис. 2, *в* дано изображение частиц в боковых силах. На профиле боковых сил (рис. 2, *г*) видно, что каждая частица состоит из одного зерна. Некоторые частицы состоят максимум из двух зерен. Средний размер зерен составляет  $200 \times 70$  нм и это значение довольно близко к данным рентгеновского структурного анализа.

Частицы, полученные способом 3, имеют большой разброс по размерам. Встречаются частицы более 7 мкм, и частицы, размер которых 0,1–0,2 мкм. Поскольку максимальный размер кадра, который можно получить на приборе, равен  $7 \times 7$  мкм, подробно были исследованы только те частицы, которые полностью помещались в кадр. Типичный вид частицы и ее профиль изображены на рис. 3, *a, б*. Частицы имеют вид неправильных круглых (чешуек), диаметр которых изменяется от 400 до 3000 нм (среднее значение 1000 нм) и высотой от 70 до 250 нм (среднее значение 130 нм). Исследование микро-

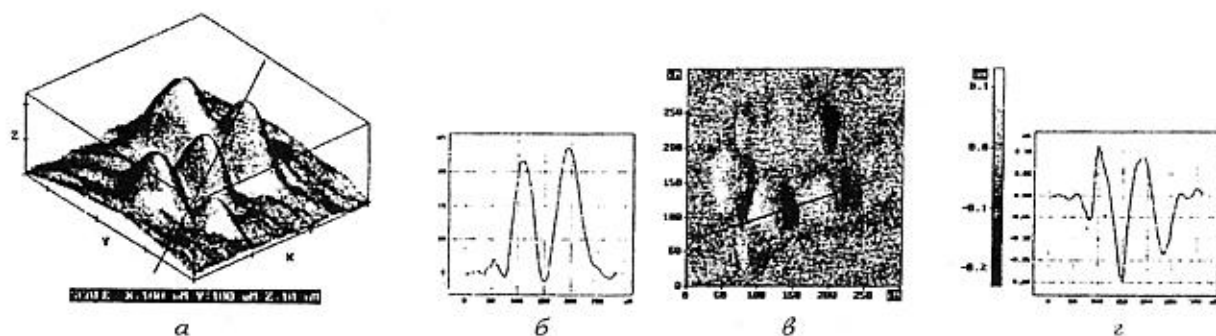


Рис. 2. АСМ-изображения частиц, полученных способом 2 (*a, б, в, г* — аналогично рис. 1)

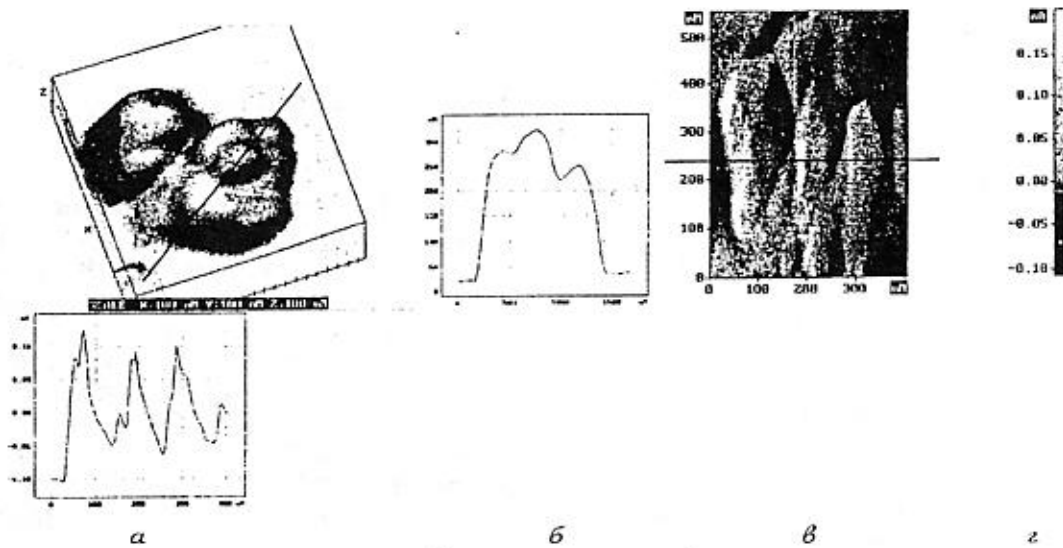


Рис. 3. АСМ-изображения частиц, полученных способом 3 (а, б, в, г — аналогично рис. 1)

структуры поверхности (рис. 3, в) показало, что имеется большое разнообразие зерен по форме и размеру. Большинство зерен имеет вытянутую форму с размерами от 100 до 400 нм в длину и от 30 до 100 нм в ширину. На профиле боковых сил (рис. 3, г) наблюдаются более мелкие элементы структуры с характерными размерами 20–30 нм, которые также можно отнести к блокам с малоугловыми границами. В случае с этими частицами наблюдается очень сильное расхождение с данными рентгеноструктурного анализа, который дает размер зерна 4 нм. Такое несовпадение в размерах поверхностных и объемных зерен мы объясняем воздействием ПАВ в процессе получения частиц. Адсорбируясь на поверхности деформируемого металла, ПАВ снижает поверхностную энергию, тем самым облегчая дислокациям выход на поверхность зерна [4]. Поскольку под непосредственным воздействием ПАВ оказываются только поверхностные зерна, они дробятся меньше, чем объемные. Кроме того, в процессе механического измельчения в шаровой планетарной мельнице частицы испытывают сильную пластическую деформацию. ПАВ, пластифицируя металл в тончайшем поверхностном слое, способствует равномерному распределению деформации по всему сечению деформируемого металла за исключением этого слоя [4]. В результате зерна, расположенные в этом слое, вытягиваются, превращаясь в тонкие пластинки, расположенные параллельно поверхности.

\*\*\*

Использование атомной силовой микроскопии в исследовании высокодисперсных порошков железа, полученных различными способами (элек-

тролитическим осаждением, восстановлением в токе водорода и измельчением в шаровой планетарной мельнице в среде жидких углеводородов), впервые позволило определить истинные форму и размеры частиц, а также форму и размеры поверхностных зерен.

Исследование микроструктуры поверхности показало, что:

- при получении частиц методами электролитического осаждения и механического измельчения на поверхности формируются два вида структуры;
- при получении частиц восстановлением в токе водорода сформировавшиеся частицы в большинстве своем состоят из одного зерна;
- использование ПАВ в процессе механического измельчения приводит к тому, что частица становится двуслойной. Ее объем имеет нанокристаллическую структуру с размером зерен 4 нм, а верхний слой зерен, более крупный — размером от 20 до 400 нм.

#### Список литературы

1. Yelsukov E. P., Mikhailik O. M., Konygin G. N., Mikhailova S. S., Povstugar V. I. // Nanostruct. Mater. 1999. Vol. 12. P. 211.
2. Lomayeva S. F., Yelsukov E. P., Konygin G. N., Dorofeev G. A., Zagainov A. V., Mikhailova S. S., Povstugar V. I., Kadikova A. H. // Abstr. Intern. Conf. on Colloid Chemistry and Physical-Chemical Mechanics. M.: МГУ, 1998. С. 296.
3. Шуров А. Ф., Круглов А. В., Перевощиков В. А., Апрельков О. Н. // Материалы Всерос. совещания "Зондовая микроскопия-99". Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 1999. С. 276.
4. Лихтман В. И., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
5. Ломаева С. Ф., Повстугар В. И., Быстров С. Г., Михайлова С. С. АСМ-исследование высокодисперсных нанокристаллических порошков железа // Материалы совещания "Зондовая микроскопия-2000" (28 февраля — 2 марта 2000 г., Нижний Новгород). С. 75–78.

Е. А. Голубев, Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

## ПРОЦЕССЫ НАДМОЛЕКУЛЯРНОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ В ПРИРОДНЫХ НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВАХ ПО ДАННЫМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

*Приведены результаты изучения надмолекулярной организации на микро- и наноуровне некоторых некристаллических веществ различного состава и генезиса, которое проводилось с использованием сканирующей туннельной (СТМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопии.*

### Введение

Среди объектов изучения минералогии значительную часть составляют некристаллические образования: различные коллоиды, стекла, твердые углеводороды (битумы), углеродистые вещества и т. д. Для строения рентгеноаморфных твердых тел часто является характерным структурообразование на молекулярном и надмолекулярном уровнях. Известны вещества с регулярной надмолекулярной организацией (например, благородные опалы), однако преимущественно ее упорядоченность локализуется в рамках ближнего или среднего порядка, изученность которого во многих случаях остается неудовлетворительной. Исследование данного структурирования вызывает интерес в связи с его влиянием на многие свойства веществ (в частности, на их каталитическую и адсорбционную активность, механические свойства и т. д.) и зависимостью от геологических условий нахождения, механизмов и факторов образования.

Среди наиболее информативных методов изучения структуры вещества на нано- и микрометровом уровнях выделяются высокоразрешающие методы прямого наблюдения, такие как растровая и просвечивающая электронная микроскопия. Получившие развитие в последние годы методы сканирующей зондовой микроскопии, которые дают возможность осуществлять прямое наблюдение структурных элементов веществ на нанометровом уровне в различных средах, показывают себя наиболее адекватными при изучении наноструктурирования для ряда природных рентгеноаморфных веществ, поскольку являются более щадящими для

их часто метастабильной структуры и позволяют визуализировать ее элементы [1, 2],

### Материал и методы исследования

Исследования проводились на СТМ ARIS-2200 (максимальное поле сканирования  $7 \times 7$  мкм) и АСМ ARIS-3500 (применялись модули с максимальным полем сканирования  $70 \times 70$  и  $7 \times 7$  мкм фирмы *Burleigh Instrument Co*). В качестве зондов использовались иглы из платино-иридиевой проволоки (в СТМ) и стандартные кремниевые кантилеверы (*Burleigh*) пирамидальной формы с радиусом закругления кончика 10 нм и жесткостью 0,1 Н/м (в АСМ). Все изображения поверхности были получены на воздухе при нормальной температуре. На АСМ съемки проводились как при постоянной высоте, так и при постоянной силе взаимодействия зонд—образец в контактном режиме (уровень сил  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  Н). На СТМ для съемки использовался режим постоянной высоты. Для получения точных метрических данных в плоскости XY осуществлялась калибровка масштабов изображения по тестовым образцам.

Материалом для исследования служили высококонцентрированный (содержание в образцах свыше 90 %) некристаллический углерод шунгитовых пород Карелии из авторской коллекции как первично-осадочный [месторождения Максово (М), Шуньга (Ш), Чеболакша (Ч)], так и переотложенный [месторождения Загогино (З), Нигозеро (Н)], рентгеноаморфный коллоидный фосфат иттрия [КФИ, идеализированная формула  $(Y, Yb)(PO_4) \times 3H_2O$ ] из амазонитовых рандпегматитов Кольского полуострова (коллекция А. В. Волошина). Шунгитовый углерод исследовался методами как СТМ, так и АСМ, съемки КФИ проводились методом АСМ. Поверхность готовилась скалыванием, съемка проводилась на свежеприготовленных сколах. В некоторых случаях для очистки поверхности использовалось ультразвуковое диспергирование в спирте.

### Результаты

**Шунгиты.** По данным электронографии В. В. Ковалевским была создана структурная модель, в которой основным элементом надмолекулярной организации высокоуглеродистых шунгитов является глобула, представляющая собой шарообразное многослойное углеродное образование (слои на основе гексагональной графитоподобной сетки) размером порядка 10 нм, предположительно с порой внутри [3]. Сопоставление общих особенностей структурного строения шунгитовой глобулы и фуллеренов, особенно их высших разновидностей и суперфуллеренов, позволило рассматривать глобулы как сложные многослойные образования типа фуллероидов [4].

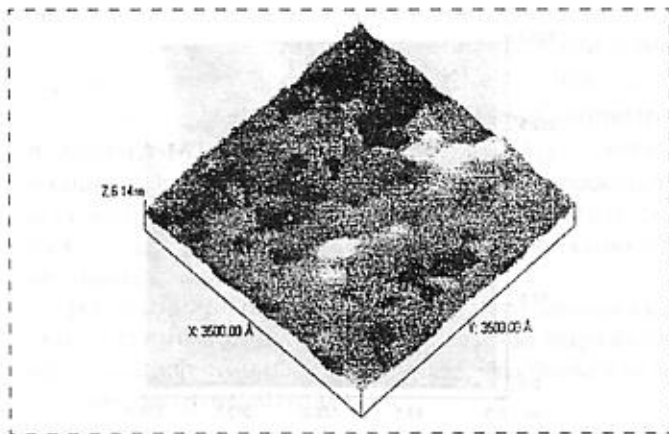


Рис. 1. АСМ-изображение шунгита 3 (3500 × 4500 Å)

Характерное для шунгитов 3, М, Н, Ш изображение поверхности приведено на рис. 1. Форма и размеры позволяют интерпретировать визуализируемые на СТМ и АСМ снимках элементы морфоструктуры (округлые и эллипсоидальные объекты) в рамках модели В. В. Ковалевского как глобулы. Их модальные видимые размеры составляют от 15,8 нм для шунгитов 3 до 39,0 нм для шунгитов М. Последовательность изменения размеров по месторождениям в целом соответствует последовательности изменения давления в породах согласно геологическим данным. Среди факторов, объясняющих некоторое превышение размеров глобул над модельными, можно отметить следующие:

- области когерентного рассеяния (порядка 10 нм) окружены неупорядоченным углеродом, которые увеличивает наблюдаемые размеры глобул;
- влияние конечных размеров зонда.

На снимках поверхности шунгитов Ч отдельные глобулы практически не визуализируются, они настолько плотно расположены, образуя блоки, что границы едва просматриваются (рис. 2).

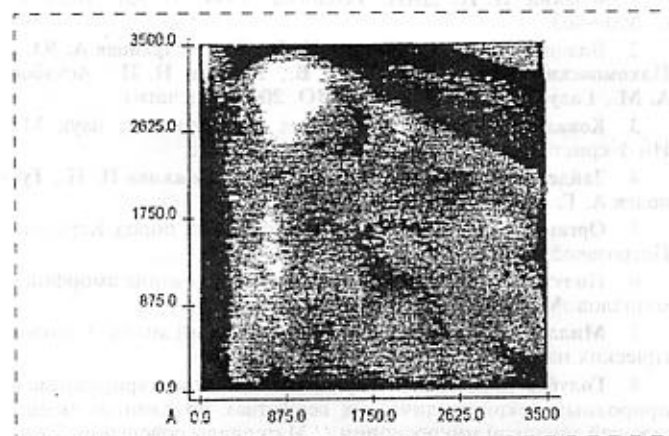


Рис. 2. АСМ-изображение шунгита Ч (3500 × 3500 Å)

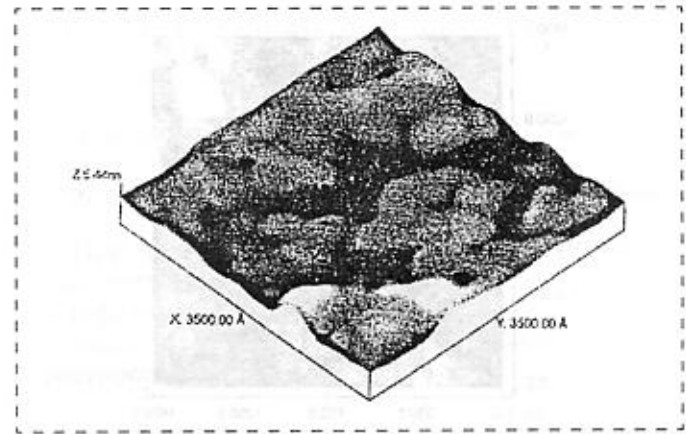


Рис. 3. АСМ-изображение шунгита Ш (3500 × 3500 Å)

Преобладающим структурным мотивом шунгитов является линейный, при этом длина линейных агрегатов-цепочек варьируется от трех—пяти звеньев до нескольких десятков. Фрагменты цепочек переплетаются, образуя дендритоподобные структуры, располагаются параллельными рядами, сворачиваются в круглые или эллипсоидальные кольца и т. д. (рис. 3). Наиболее масштабные цепочечные упорядоченные структуры наблюдаются в углероде М (рис. 4). Вероятными причинами подобного рода структурирования может служить природа шунгитовых глобул, сворачивающихся из цепочечных молекул углеводородов в клубки, и влияние электроповерхностных сил [5].

**Коллоидный фосфат иттрия.** При изучении строения КФИ, являющегося высокопроводной фазой, использование электронной микроскопии затруднялось тем, что под действием вакуума и электронного пучка, вероятнее всего способствовавшего удалению связанной воды и другим структурным переменам, образцы растрескивались.

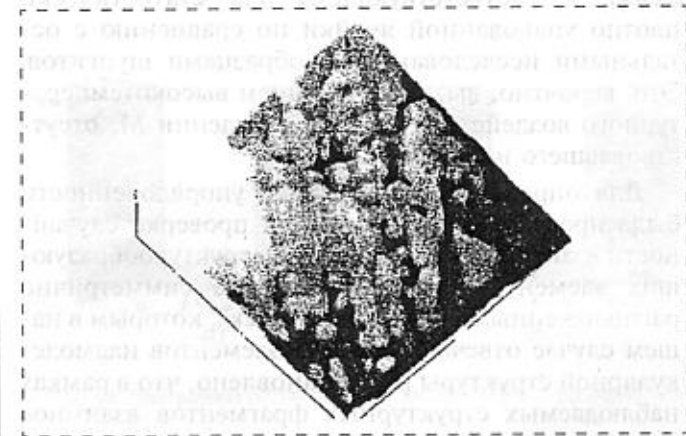


Рис. 4. СТМ-изображение шунгита М (5000 × 5000 Å)

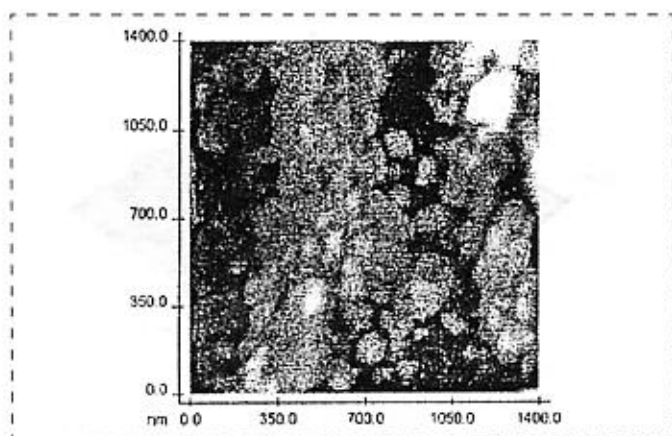


Рис. 5. АСМ-изображение КФИ (14 000 × 14000 Å)

Методами АСМ установлена глобулярная структура КФИ (рис. 5, 6), что не противоречит данным ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа [2]. Модальные видимые размеры глобул вдоль длинной оси составляют 78,8 нм. В надмолекулярной структуре преобладающего мотива не прослеживается. Глобулы часто сплюснуты, их длинные оси ориентированы преимущественно в одном направлении. Хотя упаковка в целом незакономерна, наблюдаются локальные области с фрагментами как гексагональной, так и кубической упаковок.

**Статистико-геометрический анализ.** На основании двумерных проекций СТМ- и АСМ-изображений был проведен статистико-геометрический анализ взаимного положения структурных элементов по двумерным проекциям в целях выявления элементов упорядоченности. Для его проведения центры частиц заменялись точками и анализировалась их система.

Среднее число геометрических соседей, определенное с помощью полигонов Дирихле—Вороного [6], в структуре шунгитового углерода М находится ближе к соответствующему для статистически плотно упакованной ячейки по сравнению с остальными исследованными образцами шунгитов. Это, вероятно, вызвано наличием высокотемпературного воздействия на месторождении М, отсутствовавшего на остальных [5],

Для определения масштабов упорядоченности была проведена статистическая проверка случайности взаимного расположения структурообразующих элементов методом подсчета симметрично расположенных ближайших "точек", которым в нашем случае отвечают центры элементов надмолекулярной структуры [7]. Установлено, что в рамках наблюдаемых структурных фрагментов взаимное расположение ближайших "точек" в двумерной проекции не отвечает соответствующему пуассо-

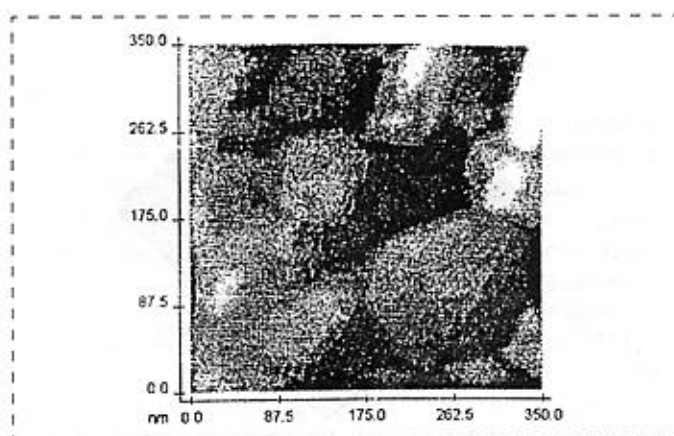


Рис. 6. АСМ-изображение КФИ (3500 × 3500 Å)

новскому случайному распределению и у всех исследованных веществ в пределах некоторого числа ближайших соседей имеет тенденцию к взаимному отталкиванию, что отвечает упорядоченному состоянию. Области упорядочения составляют: у шунгитов М — шесть, З — пять, Ш — три, у КФИ — две ближайшие точки соответственно. Последующие ближайшие точки располагаются в зоне, свидетельствующей о наличии для них тенденции к группированию.

\*\*\*

Были выделены характерные для исследованных веществ локальные структуры, которые составляют основной структурный мотив на надмолекулярном уровне. Определены масштабы упорядоченности этой структуры. На основании полученных данных выявлены закономерности образования и упорядочения исследованных веществ в зависимости от геологических условий нахождения.

#### Список литературы

1. Юшкин Н. П. ДАН. Геология. 1994. Т. 337. Вып. 6. С. 800—803.
2. Волошин А. В., Сорохтина Н. В., Бахчисарайцев А. Ю., Пахомовский Я. А., Чуканов Н. В., Юшкин Н. П., Асхабов А. М., Голубев Е. А. Записки ВМО, 2000 (в печати).
3. Ковалевский В. В. Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: Ин-т кристаллографии АН СССР, 1986. 188 с.
4. Зайденберг А. З., Ковалевский В. В., Рожкова Н. Н., Туполев А. Г. ЖФХ. 1996. Вып. 1. С. 107—110.
5. Органическое вещество шунгитоносных пород Карелии. Петрозаводск, 1994. 208 с.
6. Полухин В. А., Ватолин Н. А. Моделирование аморфных металлов. М.: Наука, 1985. 288 с.
7. Миллер Р. Д., Кан Д. С. Статистический анализ в геологических науках. М.: Мир, 1965. 483 с.
8. Голубев Е. А. Надмолекулярное наноструктурирование в природных некристаллических веществах по данным сканирующей зондовой микроскопии // Материалы совещания "Зондовая микроскопия-2000", 28.02 — 02.03.2000 г., Нижний Новгород. С. 97—101.

УДК 681.7

Б. А. Аронзон, В. В. Рыльков,  
 Российский Научный Центр  
 "Курчатовский Институт",  
 А. К. Сарычев, Е. А. Бондарь, Л. П. Шадрин,  
 Институт теоретической и прикладной  
 электродинамики,  
 О. М. Драченко, Д. В. Смирнов, Ж. Леотин,  
 LPMC and SNCMP,  
 Complexe Scientifique de Ranguel INSA (Франция)

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАЗИ-2D- И 3D-СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОКОМПОЗИТОВ В ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

*Описано экспериментальное определение оптического поглощения квази-3D- и 2D-объектов на основе наноконструктивных пленок с содержанием металла, близким к порогу перколяции, и их интерпретации с использованием современных моделей.*

Металл-диэлектрические композиты представляют собой совокупность хаотически расположенных малых металлических включений размером 1–10 нм и диэлектрика, заполняющего промежутки между ними. Существует некоторое критическое содержание металла  $x = x_c$  (порог протекания), выше которого эти материалы обладают металлическими свойствами. Ниже порога перколяции проводимость композита определяется туннельными переходами электронов между отдельными гранулами металла и подобна прыжковой проводимости легированных некомпенсированных полупроводников [1]. С физической и практической точек зрения наибольший интерес представляет ряд уникальных явлений, наблюдаемых в этих материалах при содержании металла, близком к порогу протекания. Значительный интерес, в частности, вызывают исследования аномального поглощения и рассеяния излучения, нелинейных явлений в оптическом диапазоне и на постоянном токе [2–4], а в случае магнитных наноконструктивов — гигантского отрицательного магнитосопротивления и гигантского эффекта Холла [5–7].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (99-02-16955 и 00-02-17191), Российско-Французского Фонда PICS (98-02-22037) и Межотраслевой научно-технической программы "Физика твердотельных наноструктур" (грант 97-1081).

Хотя оптические явления в наноконструктивных пленках исследуются сравнительно давно, многие их свойства, особенно вблизи порога перколяции, практически до сих пор не поняты. Существующие подходы к описанию оптических свойств базировались в основном на представлениях об эффективной среде [8], в которых не учитываются эффекты взаимодействия поляризованных гранул и структурно-топологические особенности пленок, связанные, в частности, с формированием фракталов из гранул и эффектами самоорганизации при их кластеризации. Лишь сравнительно недавно теоретически было показано, что отмеченные выше факторы кардинальным образом могут определять оптические свойства гранулированных систем [2–4].

Квази-3D-структуры представляли собой достаточно толстый слой (0,2–0,5 мкм) пленки Fe/SiO<sub>2</sub>, нанесенный на Si-подложку, покрытую буферным слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 0,1 мкм. Пленки были получены путем совместного ионно-лучевого распыления Fe и SiO<sub>2</sub> с использованием составной мишени. Температура подложек поддерживалась равной 300 К. Параллельно изготавливались четырехзондовые образцы-свидетели, которые использовались для определения температурной зависимости проводимости, а также для контроля толщины пленок и содержания в них железа. Объемная доля  $x$  Fe определялась методом рентгеновского микроанализа на растровом электронном микроскопе. Соотношение Fe и SiO<sub>2</sub> в мишени было подобрано таким, чтобы получить  $x \approx 0,6$ . Было установлено, что при такой доле Fe в пленках происходит перколяционный переход [9]. В исследованных образцах сопротивление увеличивалось приблизительно на два порядка при уменьшении температуры от нормальной до  $T = 4,2$  К, что свидетельствовало об относительно слабом диэлектрическом характере их проводимости. Квази-2D-структуры были получены путем напыления островковой пленки Co эффективной толщиной 10–20 Å на Si-подложку, покрытую тонким (200 Å) буферным слоем SiO<sub>2</sub>. Сверху островковая пленка стабилизировалась слоем SiO<sub>2</sub> толщиной ~30 Å. Перколяционный переход в данных системах наблюдался при эффективной весовой толщине Co, приблизительно равной 20 Å [10].

Поглощение  $A$  в структурах определялось стандартным образом из измерений их пропускания  $T_t$  и отражения  $R_r$ :

$$A = 1 - T_t - R_r.$$

Отдельно контролировалось также поглощение в подложках. Измерения были выполнены с помощью Фурье-спектрометра Bruker IFS 113 в диапазоне длин волн  $\lambda = 1,2\div 70$  мкм при температуре  $T = 300$  К. Результаты исследований для пленок Co/SiO<sub>2</sub> и Fe/SiO<sub>2</sub> представлены на рис. 1 и 2 со-



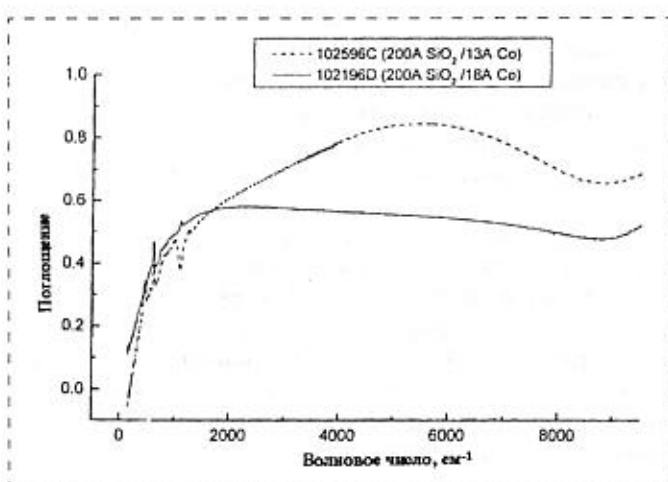


Рис. 1. Спектры поглощения в квази-2D-структурах на основе пленок  $\text{Co}/\text{SiO}_2$  с промежуточным коэффициентом заполнения (N102596C;  $x \approx 0,33$ ) и коэффициентом заполнения, близким к перколяционному переходу (N102196D;  $x \approx 0,45$ )

ответственно. В квази-2D-структурах с содержанием металла, близким к перколяционному переходу, поглощение  $A$  достигает 0,5 и практически не зависит от энергии квантов на частотах выше некоторой  $\omega_p$ , определяемой обратным временем релаксации электронов  $\tau$ , как и предсказывается в [2, 3]. Согласно [2, 3], по экспериментально найденной величине  $\omega_p$ , получим  $\tau \approx 1,7 \cdot 10^{-14}$  с, согласующуюся с известными данными [8]. При  $\omega < \omega_p$  коэффициент поглощения падает, причем его зависимость от частоты имеет аномальный характер ( $\alpha \propto \omega^{0,9}$ ), т. е. заметно отличается от случая друдевского металла ( $\alpha \propto \omega^2$ ). В диэлектрических пленках  $\text{Co}/\text{SiO}_2$  с концентрациями  $\text{Co}$ , меньшими порога протекания, обнаружен максимум поглощения.

Частота максимума  $\omega \approx 0,7$  эВ существенно меньше частоты возбуждения поверхностных плазмонов в частицах  $\text{Co}$  ( $\omega_p \approx 3,7$  эВ). Отметим, что поглощение в максимуме достигает 0,8, тогда как в случае гранулированных 2D-пленок на основе благородных металлов оно не превышает в ИК области спектра 0,5 [11]. Проявление максимума в поглощении невозможно также объяснить интерференционными эффектами в силу малой толщины пленок  $\text{Co}/\text{SiO}_2$ . Исследования "толстых" пленок  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  показали, что интерференционные эффекты могут проявляться вблизи порога перколяции лишь при толщинах  $> 0,1$  мкм, что почти на два порядка превышает толщину пленок  $\text{Co}/\text{SiO}_2$ .

В случае 3D-пленок на основе  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  наблюдаются полосы поглощения (рис. 2), положение которых в спектре смещается в коротковолновую область с уменьшением толщины пленок или концентрации  $\text{Fe}$ , что явно указывает на их интерфе-

ренционную природу. Вместе с тем попытки описания интерференции в данных объектах в рамках моделей эффективной среды (метода Максвелл—Гарнетта и Бруггемана [8]) приводят к заниженным в 2—3 раза значениям содержания металла, что указывает на неприменимость данных моделей в нашем случае. В этой связи нами был развит метод определения диэлектрической функции по измеренным значениям коэффициентов пропускания и отражения, основанный на решении обратной задачи для матричных соотношений феноменологической теории оптических свойств тонких пленок с использованием метода непрерывного дифференциального спуска. Найденные значения мнимой части диэлектрической проницаемости проанализированы с позиций моделей [2, 3].

Из [2, 3] следует, что увеличение поглощения излучения в композитах обусловлено возбуждением поверхностных плазмонов, которое наиболее эффективно на частотах  $\omega$ , меньших плазменной частоты  $\omega_p$ , когда диэлектрическая функция в объеме металла становится отрицательной [2, 3], т. е. при  $\omega < \omega_p / (\epsilon_b)^{1/2}$ , где  $\omega_b$  — вклад в диэлектрическую проницаемость внутризонных переходов. В случае изолированных гранул (при малом содержании металла) максимум поглощения сосредоточен в узкой области частот вблизи плазменной резонансной частоты отдельной гранулы и расположен в видимой либо в УФ области спектра [2, 3]. С приближением доли металла  $x$  к критической величине  $x_c$  характер спектра кардинально меняется. Аномальное поглощение простирается в ИК область спектра, слабо зависит от частоты возбуждающего излучения и достигает максимального значения приблизительно 50 % [2,3]. Расчеты по-

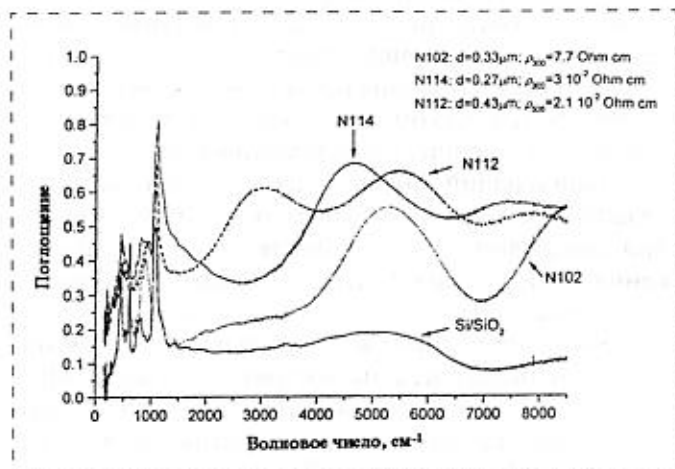


Рис. 2. Спектры поглощения в квази-3D-структурах на основе пленок  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  с промежуточным содержанием  $\text{Fe}$  (N102;  $x \approx 0,4$ ) и содержанием, близким к перколяционному переходу (N114 и N112;  $x \approx 0,6$ ). Структуры N114 и N112 различаются толщиной пленки;  $d = 0,27$  и  $0,43$  мкм соответственно

казывают, что данное обстоятельство может быть связано с фрактальным распределением металлических включений и возбуждением коллективных плазменных мод, охватывающих в этих условиях широкую область спектра [2, 3]. Другой особенностью перколяционных систем вблизи порога протекания является наличие слабых мест (горячих точек), в которых амплитуда электрического поля электромагнитной волны на несколько порядков превышает среднее значение. Это приводит к очень большому усилению нелинейных оптических свойств композитов, в частности, к генерации высших гармоник и гигантскому рассеянию излучения [3, 4]. Причем предсказывается проявление этих эффектов вплоть до частот, соответствующих времени рассеяния носителей (приблизительно на два порядка меньших, чем плазменная частота  $\omega_p$ ), т. е. в ИК области спектра.

\*\*\*

В заключение отметим, что достаточно сильное поглощение (~40 %) в пленках Fe/SiO<sub>2</sub> на кремниевой подложке наблюдалось нами вплоть до  $\lambda = 70$  мкм. Поэтому эта система представляет также практический интерес с точки зрения изучения болометрического эффекта и создания на ее основе датчика ИК диапазона.

#### Список литературы

1. Mott N. F., Davis E. A. Electron processes in non-crystalline materials // Clarendon Press, Oxford, 1979.
2. Gresillon S., Aigouy L., Boccaro A. C., Rivoal J. C., Quelin X., Desmarest C., Gadenne P., Shubin V. A., Sarychev A. K. and Shalaev V. M. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 4520.
3. Shalaev V. M., Sarychev A. K. // Phys. Rev. D. 1998. V. 57. N 20. P. 13265.
4. Brouers F., Blacher S., Sarychev A. K. // Phys. Rev. D. 1998. V. 58. N 23. P. 15897.
5. Milner A., Gerber A., Groisman B., Karpovsky M., Gladkikh A. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 475.
6. Pakhomov A. B., Yan X., Zhao B. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 3497.
7. Аронзон Б. А., Ковалев Д. Ю., Лагарьков А. Н., Мейлихов Е. З., Рыльков В. В., Седова М. В., Негре М., Горан М. и Леотин Ж. // Письма ЖЭТФ. 1999. Т. 70. № 2. С. 87.
8. Петров Ю. И. Физика малых частиц. М.: Наука, 1982.
9. Аронзон Б. А., Варфоломеев Е. А., Ковалев Д. Ю., Ликальтер А. А., Рыльков В. В., Седова М. А. // ФТТ. 1999. Т. 41. № 6. С. 944.
10. Diery B., Sankar S., Carthey M. Mc., Smith D., Bayle-Guillemend P., Berkowitz A. // J. M. M. M. 1998. V. 185. P. 283.
11. Berthier S., Peiro J., Fagnent S., Gadenne P. // Physica A. 1997. V. 241. N 1-2. P. 1.
12. Sarychev A. K., Bergman D. J., Yagil Y. // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. N 8. P. 5366.
13. Аронзон Б. А., Рыльков В. В., Сарычев А. К., Бондарь Е. А., Шадрин Л. П. Оптические свойства квази-2D- и 3D-систем на основе металл-диэлектрических нанокомпозитов в ИК-области спектра // Материалы совещания "Нанофотоника" (Нижний Новгород, 20-23 марта 2000 г.). М.: Институт физики микроструктур РАН, 2000. С. 192-195.

## СТРАНИЧКА РФФИ

*В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1, 2, 2001 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.*

### АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

#### Исследование структурных свойств и стабилизация механических систем

Номер проекта: 97-01-00735-а  
Год предоставления отчета: 1997

Исследования по проекту велись в двух направлениях.

1. Стабилизация установившихся движений голономных и неголономных механических систем — разработан подход к анализу управляемости механических систем общего вида (стационар-

ных и нестационарных), основанный на исследовании условий существования в этих системах линейного интеграла определенного вида. Приведены конструктивные условия существования линейных интегралов и на их базе сформулированы новые эффективные критерии управляемости, отличные от известных ранговых критериев.

2. Исследование особенностей областей устойчивости и задачи максимизации собственных частот линейных механических систем, зависящих от параметров — получены необходимые условия максимума минимального собственного значения линейной механической системы с учетом произвольной кратности и наличия ограничений на параметры системы. Исследованы характерные особенности областей устойчивости линейных систем, зависящих от параметров. Дан полный анализ областей устойчивости, флаттера и дивергенции в трехмерном пространстве для модели вращающегося спутника. Решена задача нахождения положения подкоса, максимизирующего критическую скорость потери аэроупругой устойчивости.

казывают, что данное обстоятельство может быть связано с фрактальным распределением металлических включений и возбуждением коллективных плазменных мод, охватывающих в этих условиях широкую область спектра [2, 3]. Другой особенностью перколяционных систем вблизи порога протекания является наличие слабых мест (горячих точек), в которых амплитуда электрического поля электромагнитной волны на несколько порядков превышает среднее значение. Это приводит к очень большому усилению нелинейных оптических свойств композитов, в частности, к генерации высших гармоник и гигантскому рассеянию излучения [3, 4]. Причем предсказывается проявление этих эффектов вплоть до частот, соответствующих времени рассеяния носителей (приблизительно на два порядка меньших, чем плазменная частота  $\omega_p$ ), т. е. в ИК области спектра.

\*\*\*

В заключение отметим, что достаточно сильное поглощение (~40 %) в пленках Fe/SiO<sub>2</sub> на кремниевой подложке наблюдалось нами вплоть до  $\lambda = 70$  мкм. Поэтому эта система представляет также практический интерес с точки зрения изучения болометрического эффекта и создания на ее основе датчика ИК диапазона.

#### Список литературы

1. Mott N. F., Davis E. A. Electron processes in non-crystalline materials // Clarendon Press, Oxford, 1979.
2. Gresillon S., Aigouy L., Boccaro A. C., Rivoal J. C., Quelin X., Desmarest C., Gadenne P., Shubin V. A., Sarychev A. K. and Shalaev V. M. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 4520.
3. Shalaev V. M., Sarychev A. K. // Phys. Rev. D. 1998. V. 57. N 20. P. 13265.
4. Brouers F., Blacher S., Sarychev A. K. // Phys. Rev. D. 1998. V. 58. N 23. P. 15897.
5. Milner A., Gerber A., Groisman B., Karpovsky M., Gladkikh A. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 475.
6. Pakhomov A. B., Yan X., Zhao B. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 3497.
7. Аронзон Б. А., Ковалев Д. Ю., Лагарьков А. Н., Мейлихов Е. З., Рыльков В. В., Седова М. В., Негре М., Горан М. и Леотин Ж. // Письма ЖЭТФ. 1999. Т. 70. № 2. С. 87.
8. Петров Ю. И. Физика малых частиц. М.: Наука, 1982.
9. Аронзон Б. А., Варфоломеев Е. А., Ковалев Д. Ю., Ликальтер А. А., Рыльков В. В., Седова М. А. // ФТТ. 1999. Т. 41. № 6. С. 944.
10. Diery B., Sankar S., Carthey M. Mc., Smith D., Baylle-Guillemend P., Berkowitz A. // J. M. M. M. 1998. V. 185. P. 283.
11. Berthier S., Peiro J., Fagnent S., Gadenne P. // Physica A. 1997. V. 241. N 1-2. P. 1.
12. Sarychev A. K., Bergman D. J., Yagil Y. // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. N 8. P. 5366.
13. Аронзон Б. А., Рыльков В. В., Сарычев А. К., Бондарь Е. А., Шадрин Л. П. Оптические свойства квази-2D- и 3D-систем на основе металл-диэлектрических нанокомпозитов в ИК-области спектра // Материалы совещания "Нанофотоника" (Нижний Новгород, 20-23 марта 2000 г.). М.: Институт физики микроструктур РАН, 2000. С. 192-195.

## СТРАНИЧКА РФФИ

*В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1, 2, 2001 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.*

### АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

#### Исследование структурных свойств и стабилизация механических систем

Номер проекта: 97-01-00735-а  
Год предоставления отчета: 1997

Исследования по проекту велись в двух направлениях.  
1. Стабилизация установившихся движений голономных и неголономных механических систем — разработан подход к анализу управляемости механических систем общего вида (стационар-

ных и нестационарных), основанный на исследовании условий существования в этих системах линейного интеграла определенного вида. Приведены конструктивные условия существования линейных интегралов и на их базе сформулированы новые эффективные критерии управляемости, отличные от известных ранговых критериев.

2. Исследование особенностей областей устойчивости и задачи максимизации собственных частот линейных механических систем, зависящих от параметров — получены необходимые условия максимума минимального собственного значения линейной механической системы с учетом произвольной кратности и наличия ограничений на параметры системы. Исследованы характерные особенности областей устойчивости линейных систем, зависящих от параметров. Дан полный анализ областей устойчивости, флаттера и дивергенции в трехмерном пространстве для модели вращающегося спутника. Решена задача нахождения положения подкоса, максимизирующего критическую скорость потери аэроупругой устойчивости.

## Нелинейные проблемы термоупругости и разрушения композитных материалов и конструкций

Номер проекта: 97-01-00856-а  
 Год предоставления отчета: 1997

На основе модели термоупругого поведения неоднородного анизотропного тела выведены определяющие соотношения нового варианта термоупругих оболочек и пластин с пространственной ориентацией армирующих волокон.

Разработана математическая модель нелинейного механического поведения армированных пластиков на основе общего уравнения состояния, связывающего параметры деформации и напряжения с помощью плотности энергии упругого деформирования. В полученной модели учитывается физически нелинейная связь между механическими характеристиками материала, а также сдвиговая и трансверсальная нелинейность, возникающая в условиях плоского напряженного состояния. Проведено обобщение данной модели на многослойные гибридные композиционные материалы.

Определены условия применимости такого параметра разрушения как  $J$ -интеграл для случая анизотропной среды и получены аналитические зависимости для расчета коэффициента интенсивности напряжений и  $J$ -интеграла для слоистых гибридов с учетом нелинейности упругого деформирования и разрушения. При этом рассматривались такие виды нагружения, как одноосное растяжение и поперечный изгиб. Установлена взаимосвязь  $J$ -интеграла и коэффициента интенсивности напряжений для различных видов приложения нагрузки в случае как гибридных, так и однородных композитных материалов.

## Адаптивное оценивание в задачах непараметрической статистики

Номер проекта: 97-01-00079-а  
 Год предоставления отчета: 1997

Построены адаптивные оценки неизвестной кривой регрессии по зашумленным данным, плотности распределения последовательности независимых, одинаково распределенных величин, спектральной плотности стационарной гауссовской последовательности или стационарного гауссовского процесса с непрерывным временем. Полученные оценки не используют никакой априорной информации об оцениваемой функции и в то же время на всех наиболее часто встречающихся функциональных классах, компактно вложенных в гильбертово пространство интегрируемых с квадратом функций, имеют наивысшую скорость сходимости. На основе полученных оценок построены доверительные интервалы для оцениваемой функции в различных метриках: гильбертовой, соболевской, равномерной. Построенные доверительные границы имеют высокую точность. Построены также адаптивные доверительные границы.

Получены некоторые обобщения для многомерного случая. Решены вопросы оптимального планирования эксперимента. Предложены адаптивные оценки плотности распределения, зависящей от параметров (факторов). Полученные оценки могут найти применение при обработке результатов и планировании многофакторного эксперимента в физических, медицинских, надежностных и других экспериментах.

## Качественное исследование решений моделей Маргерра—Власова нелинейной теории колебаний пологих оболочек

Номер проекта: 97-01-00355-а  
 Год предоставления отчета: 1997

Для моделей Маргерра—Власова (как для пренебрегающих инерцией продольных перемещений точек срединной поверхности оболочки, так и для полных колебаний пологих оболочек из материалов с внутренним трением с жестким закреплением края оболочки) доказаны теоремы о существовании сильно непрерывной полугруппы эволюционных операторов, о существовании максимального аттрактора, о конечности хаусдорфовой размерности максимального аттрактора. Для модели Маргерра—Власова, пренебрегающей инерцией продольных перемещений, со скользящим защемлением края оболочки доказана теорема единственности обобщенных решений. Для полной модели Маргерра—Власова с жестким закреплением края оболочки доказана теорема единственности обобщенных решений. Все полученные результаты являются новыми. Обсуждение результатов со специалистами на 15-м Всемирном конгрессе IMACS, на 4-й Всероссийской школе-коллоквиуме по стохастическим методам, на Международной конференции по стохастическому и глобальному анализу позволило оценить результаты как находящиеся на мировом уровне, а по некоторым направлениям — и опережающие его.

## Моделирование нестационарного переноса в твердотельных микро- и наноструктурах

Номер проекта: 97-01-00070-а  
 Год предоставления отчета: 1997

Развита двумерная дискретная модель электронного транспорта в микровакуумной многоэлектродной осесимметричной ячейке с изменением конфигурации электродов. Продемонстрирована эффективность использования модели для оптимизации управления электронным пучком в микроструктуре. Проведено численное моделирование и оптимизация микровакуумного магниточувствительного элемента. Построена двумерная квазигидродинамическая модель электронного переноса в полупроводниковых микро- и наноструктурах. Для ее реализации разработан новый численный метод решения многомерных квазилинейных параболических уравнений. Особенностью метода является его консервативность и слабая монотонность численного решения, что гарантирует сходимость к точному решению и безусловную устойчивость. Метод просто адаптируется к вычислениям на многопроцессорных вычислительных системах. Метод опробован на задаче о полевой эмиссии горячих электронов из кремниевого микрокатода, а также на задачах абсорбционной оптической бистабильности. Построена физико-математическая модель и проведено математическое моделирование плазменных колебаний в базе субмикронного транзистора на горячих электронах методом частиц с учетом существенных механизмов рассеяния с помощью процедуры Монте-Карло. Показано, что подобная структура может служить генератором микроволновых колебаний субтерагерцового диапазона. Построена физическая модель рассеяния электронов на стенках квантового канала с учетом межподзонного рассеяния. Проведена оценка зависимости контактного сопротивления канала от толщины пленки.

## ПРОБЛЕМЫ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ И XXI ВЕК

13—14 ноября 2000 г. в г. Коврове (Владимирская обл.) на базе Технологической академии состоялась 3-я Международная конференция "Управление в технических системах — XXI век". Председатель оргкомитета — лауреат Ленинской и Государственной премий, заведующий кафедрой "Приборостроение, автоматика и управление" Ковровской государственной технологической академии (КГТА) проф. Ю. М. Сазыкин.

Проблемам микросистемной техники были посвящены доклады ученых Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Исследования резонансных режимов работы микромеханических гироскопов (ММГ) с помощью ЭВМ — такова тема доклада Л. А. Северова, В. К. Пономарева и А. И. Панферова. Речь шла об одном из направлений совершенствования ММГ, что связано с разработкой принципиально новых конструктивных схем ММГ с одной или двумя осями чувствительности, относительно которых измеряются углы или угловые скорости. ММГ, несмотря на свои сверхмалые размеры, являются сложными механическими системами, имеющими несколько упругих элементов, определяющих наличие соответствующего числа резонансных частот. Взаимное согласование резонансных частот и диссипативных сил во многом определяет метрологические характеристики ММГ, их чувствительность и рабочую область частот. Приводимые математические модели ММГ позволяют связать механические характеристики чувствительных масс и систем подвеса с метрологическими характеристиками и выявить условия настройки прибора. В докладе показано, что в ММГ с двумя осями чувствительности и симметричным упругим подвесом вибрирующей чувствительной массы в виде кольца, как в роторном вибрационном гироскопе, могут быть реализованы условия динамической настройки, при которой он работает в режиме, близком к интегрирующему. Результаты цифрового моделирования позволяют оценить качественные и количественные характеристики исследуемых схем ММГ.

Микромеханическим датчикам (ММД) были посвящены два доклада О. М. Филонова (Государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург). Первый был посвящен особенностям расчета ММД инерциального типа, обоснованию необходимости существенного пересмотра методик расчета параметров инерциальных датчиков с упругими подвесами чувствительных элементов (ЧЭ) при переходе от традиционных конструкций к микромеханическим. Основной недостаток традиционных методик связан с ограничениями и допущениями базовой теории — элементарной теории упругих сплошных сред, сопротивления материала. Эти допущения не позволяют раскрыть специфику деформированного состояния упругих элементов конструкций, учесть депланации поперечных сечений при кручении и изгибе, их влияние на функционирование и погрешности инерциальных ММД. Идеализация свойств конструкционных материалов особенно искажает картину деформаций упругих подвесов из монокристаллических материалов, обладающих выраженной упругой анизотропией.

Пересмотр этих допущений, применение математического аппарата линейной теории упругости дали возможность обнаружить существенные, ранее неизвестные особенности напряженно-деформированного состояния упругих элементов инерционных ММД, в том числе дополнительные элементы деформаций и связанные с ними составляющие результирующей погрешности. Депланации поперечных сечений при изгибе и кручении упругих элементов в общем случае приводят к увеличению линейных размеров этих элементов, если они находятся в незакрепленном состоянии. Однако в реальных конструкциях депланациям препятствуют жестко связанные с ними недеформируемые элементы, которые компенсируют все перечисленные эффекты, приводя в то же время к сжатию упругих подвесов. При этом часть работы по полезному перемещению ЧЭ в процессе измерения расходуется на компенсацию эффекта депланации, порождая дополнительную методическую погрешность ММД. Стеснение ЧЭ имеет следствием увеличение коэффициента жесткости, что в свою очередь отражается на всех функциональных зависимостях, в которые входит этот параметр.

Исследование упругих моделей подвесов из монокристаллических материалов с выраженной

анизотропией механических свойств в принципе не осуществимо методами элементарной теории упругости. Эти свойства монокристаллов и зависящих от них параметров изделий могут быть удовлетворительно описаны лишь с помощью математического аппарата тензорного исчисления. Таким образом, даже первичный анализ упругих деформаций элементов ММД, проведенный методами линейной теории упругости и тензорного исчисления, существенно уточняет описание функционирования ММД в целом и вносит существенные дополнения в известные модели погрешностей инерциальных ММД параметров движения.

Во втором докладе О. М. Филонова говорилось о теплофизических размерных явлениях в упругих элементах ММД. Знакопеременные деформации упругих подвесов чувствительных элементов микромеханических датчиков параметров движения сопровождаются рассеянием кинетической энергии в деформируемой среде. Часть рассеиваемой энергии расходуется на необратимые изменения микроструктуры материала, а другая (значительно большая) переходит в тепловую посредством различных механизмов внутреннего трения. Количество последней в каждой точке упругого элемента пропорционально второй степени механического напряжения, и зоны интенсивного тепловыделения хорошо локализируются. Это позволяет рассматривать тепловую энергию в теплофизической модели упругих подвесов как плоский внутренний источник теплоты, создающий в элементах подвеса неравномерное стационарное температурное поле. Повышение температуры изменяет модуль упругости и внутреннее трение. При этом количество теплоты, аккумулированной в упругих элементах ММД, возрастает пропорционально второй степени коэффициента миниатюризации, приводя к интенсивному росту температуры. Поэтому, начиная с определенных размеров ММД, их математические размеры перестают быть адекватными реальным объектам. То же относится и к метрологическим и динамическим характеристикам. Эти факты требуют корректив существующих математических моделей ММД, учитывающих температурные зависимости коэффициентов демпфирования и жесткости упругих систем. Численное моделирование показало, что для ММД с размерами упругих элементов от 100 до 500 мкм расхождения между коэффициентами демпфирования и жесткости при применении скорректированной механической и термоупругой моделей незначительны.

В то же время в некоторых конструкциях рассматриваемых ММД сочетание механических и геометрических параметров может оказаться столь неблагоприятным, что изделия становятся неработоспособными из-за неконтролируемого роста ряда параметров упругих подвесов. Как и в микро-

электронике, проблема рассеяния теплоты в ММД, по-видимому, может стать фундаментальным ограничением их миниатюризации, поскольку резкое снижение метрологических и динамических показателей датчиков приводит к неоправданно высокой цене за уменьшение их габаритов, массы и энергопотребления.

Выступление И. А. Киришиной касалось трехмерных микротехнологий и их применения в производстве микроэлектромеханических систем. Опыт производства и эксплуатации кремниевых микроэлектромеханических систем (МЭМС) выявил недостатки, обусловленные двумерностью их конструкций. Установлено, что они имеют фундаментальный характер, а устранение их невозможно без отказа от планарных принципов проектирования и изготовления. Двумерность микросистем является не целью, а вынужденным решением, связанным с адаптацией к требованиям планарной технологии кремния. Для преодоления проблемы двумерности кремниевых микроустройств созданы новые технологии — SFF и EFAB. Эти технологии, основными операциями которых являются литография, микролитье и послойное гомо- и гетерогенное гальваническое осаждение металлов, создают предпосылки появления нового поколения объемных микросхем, практически из любых материалов.

Несмотря на очевидные достоинства указанных технологий, проблематичными остаются вопросы, касающиеся механических свойств металлических микроконструкций, получаемых послойным гальваническим осаждением, и воспроизводимости технических характеристик изделий в индивидуальных и групповых технологических процессах.

Затрагивался вопрос о микроэлементах конструкций и в докладе хозяев конференции А. В. Одинокова и В. И. Галкина, где рассматривались вопросы разработки перспективных ЧЭ систем стабилизации и ориентации на базе динамически настраиваемых гироскопов. Авторы обращают внимание на такую актуальную проблему, как изготовление упругого подвеса ротора гироскопа, работающего в условиях интенсивной знакопеременной нагрузки (с толщиной рабочей зоны торсиона 50 мкм).

Естественно, возникал вопрос о соотношении между объектами микросистемной техники и мехатроники. В этой связи можно предложить статью автора этой информации "Микросистемная техника и мехатроника: соотношение микро- и макроуровней" в журнале "Микросистемная техника" (2000, № 4).

**Шалобаев Е. В.**, доц. Кафедры мехатроники ИТМО, г. Санкт-Петербург.