

MCT

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 2 ✦ 2004**МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

Выпускается при содействии

Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации,
Министерства образования Российской Федерации,
Российской Академии наукИздается с 1999 г.
ISSN 1684-6419**Главный редактор**

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционная коллегия:

Антонов Б. И.

Аристов В. В.

Белоус А. И.

Быков В. А.

Васильев А. А.

Васильев В. В.

Волтихин В. И.

Гапонов С. В.

Горнев Е. С.

Градецкий В. Г.

Журавлев П. В.

Захаревич В. Г.

Калиев И. А.

Кальнов В. А.

Карякин А. А.

Климов Д. М.

Кузин А. Ю.

Лифшиц В. Г.

Мокеров В. Г.

Мокров Е. А.

Никитов С. А.

Норенков И. П.

Панич А. Е.

Панфилов Ю. В.

Петросян К. О.

Петрунин В. Ф.

Путилов А. В.

Пятышев Е. Н.

Сауров А. Н.

Сигов А. С.

Станкевич В. Г.

Старостин А. К.

Степанов Ю. И.

Сухопаров А. И.

Телец В. А.

Чаплыгин Ю. А.

Редакция:

Безменова М. Ю.

Григорин-Рябова Е. В.

Лысенко А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ**ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ**

| | |
|--|---|
| Телец В. А. Микроэлектромеханические инерционные преобразователи физических величин: типовые варианты исполнения | 2 |
| Лучко В. А. МЭМС-технология переворачивает представления о технике инфракрасного видения | 6 |

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

| | |
|--|----|
| Козлов А. Г. Моделирование стационарного распределения температуры в газовых микросенсорах на термически изолированных структурах. | 8 |
| Балан Н. Н. Определение упругих свойств подвижных элементов MEMS-структур | 14 |

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

| | |
|--|----|
| Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Измерение скорости движения объекта по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах | 19 |
|--|----|

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

| | |
|---|----|
| Тодуа П. А., Быков В. А., Волк Ч. П., Горнев Е. С., Желкобаев Ж., Зыкин Л. М., Ишанов А. Б., Каледин В. В., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В., Саунин С. А., Черняков В. Н. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию (II часть). | 24 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Гайкович К. П., Миронов В. Л. Восстановление поверхностей плотности электронных состояний пиролитического графита по данным сканирующей тунNELьной микроскопии | 39 |
|--|----|

| | |
|--------------------------|----|
| СТРАНИЧКА РФФИ | 43 |
|--------------------------|----|

| | |
|----------------------|----|
| ИНФОРМАЦИЯ | 45 |
|----------------------|----|

| | |
|--------------------|----|
| Contents | 48 |
|--------------------|----|

Аннотации статей журнала на русском и английском языках доступны по сети Internet по адресу: <http://www.microsystems.ru>.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Строгинский пер., 4. Телефон редакции журнала (095) 269-5510. E-mail: it@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 018929 от 10.06.99.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор М. Г. Джавадян

Сдано в набор 03.12.2003. Подписано в печать 15.01.2004. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 7,84. Уч.-изд. л. 6,86. Заказ 109. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии ГУП ЧПК, 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 25

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 53.087.92

В. А. Телец, д-р техн. наук,
ФГУП "22 ЦНИИ Минобороны России",
г. Мытищи Московской области

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИНЕРЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН: ТИПОВЫЕ ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ

Микроакселерометры — лидеры продаж на рынке инерционных микроэлектромеханических систем (МЭМС), чему способствует бурное развитие автомобильной электроники. Но рынок стал расширяться и за счет высокочувствительных микросейсмодатчиков и гироскопов, наиболее распространенные варианты исполнения которых рассмотрены в данном обзоре.

Микроэлектромеханические акселерометры, сейсмодатчики и гироскопы, выполненные на основе базовых технологий микросистемной техники, получают все большее распространение, благодаря субмикронным размерам чувствительных элементов (ЧЭ), малой массе и габаритным размерам, низким электропотреблению и стоимости, высокой надежности [1].

Акселерометры

МЭМС-акселерометры предназначены для измерения (преобразования) линейных ускорений и являются массово изготавливаемыми инерционными преобразователями физических величин и компонентами датчиков (ПФВ и КД). Объем их производства достигает нескольких миллионов и имеет тенденцию к дальнейшему расширению по мере развития автомобильной техники. Внедрение базовых технологий микросистемной техники в процесс изготовления МЭМС-акселерометров позволило за истекшее десятилетие уменьшить их стоимость на порядок при одновременном расширении функциональных возможностей (внутренних проверок, самодиагностики и коррекции).

В основу работы ЧЭ инерционных МЭМС-акселерометров могут быть положены различные физические эффекты: емкостной, пьезорезистивный, пьезо- и сегнетоэлектрический, электромагнитный, оптический, тунNELНЫЙ.

В простейших инерционных МЭМС-акселерометрах применяют ЧЭ, реализующие принцип емкостного преобразования. Они просты в изготовлении, не требуют специальных материалов, имеют низкое энергопотребление и высокую температурную стабильность. К их недостаткам относится нелинейность характеристики преобразования, которая компенсируется введением дополнительной обратной связи. В зависимости от используемой электронной схемы выходной сигнал МЭМС-акселерометра может быть аналоговым, цифровым, масштабируемым относительно напряжения источника питания или источника модулирующего сигнала.

Нормируемыми характеристиками МЭМС-акселерометров, как правило, являются резонансная частота, диапазон входного преобразуемого сигнала, уровень шума, осевая чувствительность, дрейф, линейность, динамический диапазон характеристики преобразования, устойчивость к ударным воздействиям, мощность потребления.

В составе характеристик ПФВ и КД данного вида особо следует отметить резонансную частоту, поскольку от ее значения во многом зависит диапазон входного преобразуемого сигнала и точность осевого перемещения (чувствительность) ЧЭ относительно ускорения:

$$d_g = Mg/k_{sp} = g/\omega_0^2,$$

где d_g — точность осевого перемещения относительно ускорения; M и k_{sp} — соответственно константы массы и динамического диапазона прибора; g — ускорение силы тяжести, равное $9,8 \text{ м/с}^2$; $\omega_0 = \sqrt{k_{sp}/M}$ — угловая резонансная частота.

Очевидно, что d_g характеризует не только чувствительность, но и диапазон входного преобразуемого сигнала акселерометра.

Существенный вклад в погрешность преобразования МЭМС-акселерометров вносят шумы. Их источниками являются ЧЭ, встроенные электронные схемы считывания и обработки информации, узлы механического демпфирования (смягчения толчков, ударов), паразитные и реактивные составляющие электрических цепей. Субмикронные размеры ЧЭ МЭМС-акселерометров вынуждают разработчиков ПФВ и КД учитывать составляющие тепловых шумов (особенно активизирующихся в цепях с высоким импедансом при малом уровне

сигнала на выходе первичного преобразователя) и шумов от механического перемещения узлов.

Определенный вклад в погрешность преобразования МЭМС-акселерометров вносит и броуновская сила движения микрочастиц, которая может быть выражена, как

$$F_B = \sqrt{4kT\bar{D}}(M/\sqrt{f_{\text{ш}}}),$$

а влияющая на процессы масса частицы определяется из соотношения

$$x_B = \{\sqrt{4kT\bar{D}}/(k_{sp} + j\omega D - \omega_0^2 M)\}\{M/\sqrt{f_{\text{ш}}}\},$$

где D — коэффициент механического демпфирования; k — постоянная Больцмана; $f_{\text{ш}}$ — шумовая частота.

Для решения проблемы минимизации влияния источников шума МЭМС-акселерометров на микроуровне используют конструктивно-технологические приемы, эффективность которых определяется по значению

$$g_B = \sqrt{4kT\bar{D}}/Mg = \sqrt{(4kT\omega_0)/(MQ)}(g/\sqrt{f_{\text{ш}}})/g, \quad (1)$$

где $Q = \omega_0 M/D$ — показатель эффективности подавления шумов внутренних микроисточников.

Из уравнения (1) видно, что при больших значениях M и Q эффективность подавления шумов внутренних микроисточников возрастает. Увеличение массы (так называемой сейсмомассы) ЧЭ МЭМС-акселерометров достигается путем их изготовления из кремниевой пластины повышенной толщины. Эффект подавления шумов усиливается, если ЧЭ закрепляется в вакууме на упругих "амортизаторах".

Ниже рассмотрены несколько примеров технической реализации изложенного конструкционно-технологического подхода.

Процесс поверхностной микромеханической обработки, получивший развитие в 1980-х годах, позволил изготавливать на основе поликремния толщиной 2 мкм приборы с необходимым набором функциональных элементов МЭМС-акселерометров и низким уровнем паразитных емкостей. Последнее обстоятельство существенно для создания малошумящих приборов с высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) представлен пример размещения на кристалле кремния площадью 3 мм² чувствительного элемента и электронной схемы микроэлектронного ПФВ и КД типа ADXL50 фирмы *Analog Devices* (США). Это недорогой двухосевой МЭМС-акселерометр, работающий в двух режимах преобразования (измерения): динамическом (механические колебания) и статическом (ускорение силы тяжести). Диапазон

преобразования входного сигнала равен $\pm 2g$, ток потребления — 2 мА на ось, на выходах — модулированный сигнал, пропорциональный ускорению каждой из чувствительных осей.

Изделие выполнено в поликремнии толщиной 2 мкм, осажденном в жертвенному слое SiO₂ после операции травления фтористоводородной (плавиковой) кислотой, с использованием базовых технологических процессов изготовления КМОП-структур.

Пример более сложного МЭМС-акселерометра типа ADXRS фирмы *Analog Devices* для измерения угловых ускорений, соответствующего по степени интеграции уровню сверхбольших интегральных схем (СБИС), показан на рис. 2 (см вторую сторону обложки).

В объеме кристалла кремния и в поверхностных поликремниевых слоях помимо ЧЭ размещены два усилителя сигналов с выхода первичного преобразователя информации, сигнальный процессор, демодулятор, источник опорного напряжения, схемы самодиагностики и подстройки схем термостабилизации параметров, коммутатор напряжения, малошумящие цифровые выходные каскады. Такой МЭМС-акселерометр эффективно применяется в GPS ресиверах.

Однако поликремний толщиной 2 мкм не обеспечивает создания приборов с широким диапазоном преобразуемой входной физической величины и имеет чувствительность к градиентам механических напряжений, которые ограничивают максимально возможные размеры ЧЭ и предельные значения диапазона преобразуемых входных величин.

В 1990-х годах получили развитие "толстые" поликремниевые процессы, технологии осаждения силана (SiH₄), "растворения" подложки (кремниевой пластины), технологии "кремний на изоляторе".

На рис. 3 показан "толстый" 20-микрометровый ЧЭ МЭМС-акселерометра фирмы *Draper Laboratory* (США) в виде монокристаллической гребенки с высокой плоскостью элементов, что обеспечивает повышенную точность преобразования в широком диапазоне входных величин даже на фоне возросших паразитных емкостей.

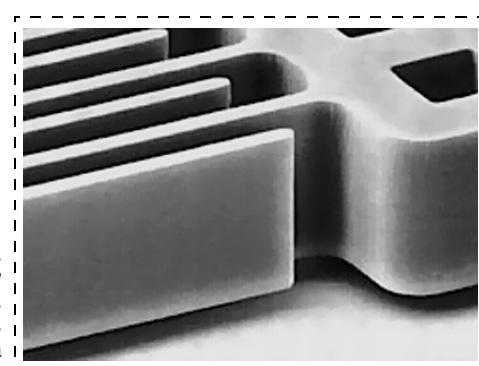


Рис. 3.
"Толстый"
20-микрометро-
вый ЧЭ МЭМС-
акселерометр

Очевидно, что такую структуру ЧЭ затруднительно получить с использованием слоев SiO_2 и поликремния. При ее изготовлении применено прецизионное объемное травление подложки после формирования в ней слоев, сильно легированных бором. Именно эти слои по результатам процесса травления "ответственны" за образование не стравливаемых элементов (зубьев) гребенки и контактных площадок под металлизацию.

Рынок широкодиапазонных (до 100 g) МЭМС-акселерометров смешен в область специальных применений (испытания на предельные ударные воздействия, в том числе в составе узлов автомобилей, снарядов, ракет и т. п.).

Инерционные МЭМС-акселерометры в электронной аппаратуре используются, прежде всего, в устройствах погашения угловых ускорений (ударов) и синусоидальных механических вибраций головок чтения/записи информации. В угловых инерционных МЭМС-акселерометрах, как и в линейных, используется принцип динамического равновесия ("нуля качания"), когда центр приложения ускорения силы тяжести является центроидой упругих "амортизаторов", на которых закреплен ЧЭ ПФВ и КД, чувствительный к вращательному движению.

Известные мировые производители угловых МЭМС-акселерометров фирмы *ST Microelectronics* и *Delphi* (США) применяют емкостные ЧЭ в сочетании с электронными схемами обработки информации на основе типовых КМОП заказных и полузаказных интегральных схем (ИС). Характеристики двух типов угловых МЭМС-акселерометров указанных производителей приведены в таблице.

Сравнительные характеристики угловых МЭМС-акселерометров

| Изгото-витель | Тип | Полоса частот, Гц | Диапазон углового уско-рения, рад/с ² | Выходной сигнал |
|---------------------|---------|-------------------|--|-----------------------|
| ST Microelectronics | LIS1R02 | 30—800 | 200 | Цифровой (7 разрядов) |
| Delphi | RV200L | 10—800 | 100—400 | Аналоговый |

Сейсмодатчики

Инерционные МЭМС-сейсмодатчики (сейсмофоны, геофонны) представляют собой акселерометры с очень высокой чувствительностью, выходом по постоянному току, низким уровнем собственных шумов. Основными областями их применения являются контроль за сейсмической активностью земной поверхности, уровнем вибрации узлов машин и диагностика их механических повреждений, контроль за градиентом давления на корпус подводных и надводных средств, а также прослеживаемость и идентификация транспортных средств, персонала, экологический и биологический мониторинг и др.

Конструкция типового МЭМС-сейсмодатчика предполагает использование постоянных магнитов и тонкопроволочных катушек индуктивности, что позволяет проводить измерение углового ускорения по горизонтальной оси на частотах выше резонанса прибора (в отличие от емкостных ЧЭ, у которых измерения проводятся на частотах ниже резонанса прибора). Помимо емкостных и индуктивных ЧЭ в МЭМС-сейсмодатчиках применяются пьезо- и сегнетоэлектрические ЧЭ.

На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) показана типовая конструкция ЧЭ МЭМС-сейсмодатчика, включающая чувствительную "толстую" пластину, закрепленную параллельно между двумя более тонкими пластинами. Узкий зазор между пластинами, их большая площадь, вакуум, глубокое демпфирование и низкая резонансная частота ЧЭ обеспечивают низкий уровень шумов в процессе преобразования.

МЭМС-сейсмодатчики конструктивно выполняются в герметичном микрокорпусе, площадь поверхности которого не превышает 1/5 поверхности рублевой монеты. Ими обеспечивается преобразование максимального значения ускорения 0,2 g в диапазоне частот синусоидальной вибрации 3...200 Гц и разрешающая способность $30 \cdot 10^{-9} \text{ g}/\sqrt{\text{f}}_{\text{ш}}$ в динамическом диапазоне 115 дБ. Уровень шумов собственных МЭМС-сейсмодатчиков в ~65...70 раз ниже, чем у рассмотренных выше конструкций МЭМС-акселерометров при использовании "толстых" чувствительных пластин той же площади и массы.

Гироскопы

В МЭМС-гироскопах используется известный эффект быстрого вращения симметричного твердого тела, ось вращения которого (ось симметрии) может изменять свое направление в пространстве. Угловая скорость вращения МЭМС-гироскопа вокруг своей оси велика по сравнению с угловой скоростью, которую имеет сама ось при изменении направления вращения. Вращение с постоянной угловой скоростью вызывает действие силы:

$$F = 2Mv\Omega,$$

где F — действующая сила; v — скорость вращения; Ω — угловая скорость.

МЭМС-гироскопы конструктивно выполняются в виде: камертонов, диска, маятника резонатора. Например, вилка гироскопа-камертона содержит пару масс, колебания которых происходят с равной амплитудой, но в противоположных направлениях. С началом вращения сила F вызывает ортогональную вибрацию, которая может приводить в движение различные механизмы, например гребенчатые двигатели, как это показано в конструкции на рис. 5

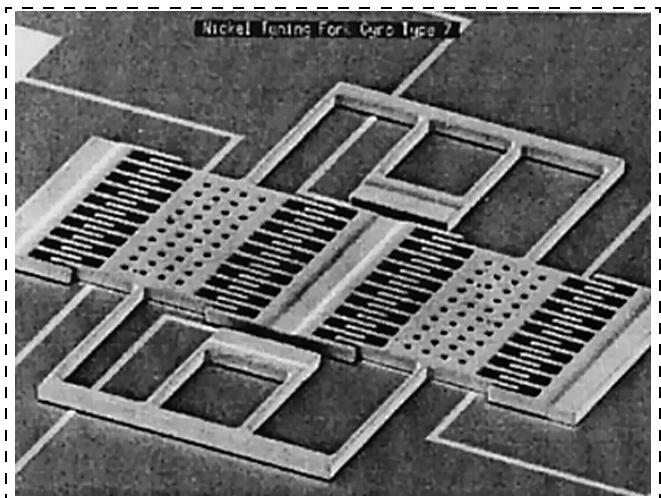


Рис. 5. Конструкционный узел МЭМС-гироскопа и гребенчатого двигателя

(фирмы *Draper Laboratory*, США), выполненной методом прецизионного травления кремниевой пластины. Вибрация является также входной величиной, предназначеннной для первичного преобразования в ЧЭ гироскопа.

Вибрация используется в процессе преобразования и МЭМС-гироскопов с ЧЭ на основе плоских круговых твердотельных конструкций — дисков. Конструкция одного из таких МЭМС-гироскопов фирмы *Bosch Corp.* (Германия) показана на рис. 6 (см. вторую сторону обложки). В нем диск вибрирует относительно оси симметрии, а вращается относительно любой из пространственных осей, что фиксируется с помощью электродов, образующих чувствительную емкость между диском-гироскопом и электродом под ним.

На рис. 7 (см. вторую сторону обложки) показана конструкция поликремниевого МЭМС-гироскопа с ЧЭ на основе вибрирующего диска фирмы *Berkeley Sensors and Actuators* (США), в которой реализована возможность интеграции в объеме и на

поверхности кристалла первичного преобразователя входной физической величины и электронной схемы обработки информации на основе заказной ИС.

ЧЭ резонаторных МЭМС-гироскопов изготавливаются путем сплавления пластин кварца в виде чаши (поэтому такие приборы называют еще полусферическими резонансными гироскопами), внутри которой размещено резонаторное кольцо (рис. 8).

В резонансно-кольцевом МЭМС-гироскопе фирмы *Silicon Sensing Systems* (США) постоянный магнит размещен в центре и выше резонансного кольца. Ток, проходящий через внешние выводы прибора, создает электромагнитную силу, которая резонирует кольцо. Находясь во взвешенном состоянии и перемещаясь под воздействием внешней физической силы (вибрации, наклона и т. п.) ЧЭ изменяет магнитные потоки внутри чаши резонатора, что сказывается на изменении значения потенциалов на выходах преобразования МЭМС-гироскопа. Размеры прибора в сборе $29 \times 29 \times 18$ мм³ (рис. 9).

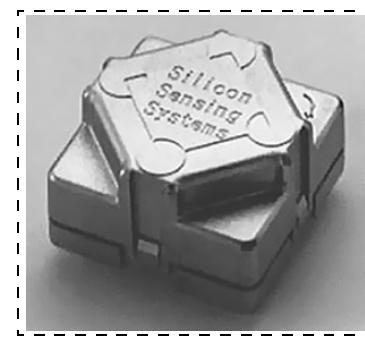


Рис. 9. Внешний вид резонаторного МЭМС-гироскопа

Таким образом, инерционные МЭМС-преобразователи физических величин (акселерометры, гироскопы, сейсмодатчики) образуют перспективный класс изделий микросистемной техники, которые находят широкое применение в различных областях техники в составе радиоэлектронной аппаратуры средств навигации, связи, автоэлектроники, авионики, микроробототехники и др.

В ближайшее время они составят жесткую конкуренцию аналогичным по функциональному назначению приборам прошлых поколений благодаря улучшенным на 1...2 порядка объемно-весовым показателям, энергопотреблению, качеству и надежности, устойчивости к внешним воздействующим факторам, стоимости при одновременном расширении функциональных возможностей за счет использования новейших технологий и материалов микросистемной техники, конструкторско-технологических и схемотехнических решений микроэлектроники.

Литература

1. Bernstein J. MEMS Inertial Sensing Technology // Sensor. 2003. Feb.

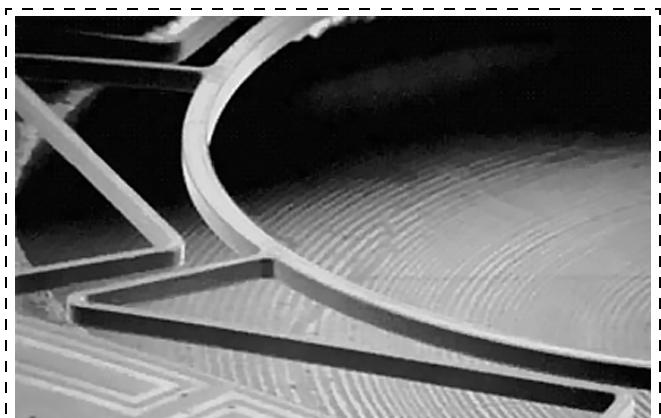


Рис. 8. Кольцевой ЧЭ резонаторного МЭМС-гироскопа

УДК 53.087.92

В. А. Лучко,
Секция прикладных проблем
при Президиуме РАН

МЭМС-ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕВОРАЧИВАЕТ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕХНИКЕ ИНФРАКРАСНОГО ВИДЕНИЯ*

Описывается матричный приемник инфракрасного излучения, состоящий из тысячи фоточувствительных микроконсолей на основе карбида кремния.

Поиск перспективных неохлаждаемых приемников инфракрасного излучения (ИК-приемников) для массового производства, способных формировать высококачественное изображение, относится к разряду актуальных задач дальнейшего развития оптико-электронных средств наблюдения. В США эти работы ведутся в рамках долгосрочных программ при финансовой поддержке Фонда перспективных оборонных исследований.

В начале работ основная перспектива связывалась с микроболометрическими приборами. Однако в процессе исследований были предложены новые принципы построения приборов, привлекшие внимание специалистов.

На конференции (*SPIE Aerosense Conference*) в г. Орландо (штат Флорида) компания Sarcon Microsystems из г. Ноксвилла (штат Теннесси) и ее партнер *Sarnoff Corporation* из г. Принстона (штат Нью-Джерси) представили макет ИК-камеры (рис. 1, см. четвертую сторону обложки), реализующей МЭМС-технологию. Согласно сообщению создателей данного прибора, каждый пиксель матрицы (320×240 пикселей) мог детектировать ИК-излучение в 10—20 раз лучше, чем известные неохлаждаемые приемники. Они также сообщили, что их МЭМС-матрица может быть изготовлена с использованием стандартной КМОП-технологии. Появление на рынке первых образцов камер ожидается в I квартале 2004 года.

В настоящее время на рынке ИК-камер доминируют охлаждаемые (до криогенных температур) приемники, в основе работы которых лежат квантовые эффекты в полупроводниках. Интерес к охлаждаемым приемникам связан с их высокой чувствительностью. Охлаждаемые приемники имеют низкое значение порога разностной температуры,

эквивалентной шуму (минимальная разность температур между объектами, которая может быть обнаружена прибором), лежащее в диапазоне 5—10 мК, что приближается к теоретическому пределу чувствительности ИК-приемников. Другой их сильной стороной является возможность работы с высокой скоростью смены кадров — вплоть до 1000 кадров в секунду. Ограничивающим фактором широкого применения этих приемников является необходимость использования для их работы системы глубокого охлаждения, которая вносит существенные проблемы при конструировании приборов, определяя их сложность и высокую цену.

Благодаря МЭМС-технологии создан приемник, способный изменить взгляды специалистов на перспективы развития ИК-техники. Каждый пиксель матрицы представленного прибора состоит из миниатюрной пластинки-консоли (микроконсоли) (рис. 2, см. четвертую сторону обложки), сделанной из аморфного гидрогенированного карбида кремния. При этом один конец пластинки закреплен на структуре приемника, а другой — свободный. Пластинка частично покрыта пленкой из золота и ее действие подобно действию биметалла в термостате. Поглощая ИК-излучение, пластинка изгибаются, приближаясь к поверхности неподвижной обкладки, примерно на 0,1 мкм на каждый градус температурного изменения. Это приводит к изменению емкости прибора и генерации электрического сигнала в чувствительном элементе пропорционально поглощенному излучению. При этом все нежелательные внешние вибрации и удары, могущие вызывать ложный сигнал, компенсируются резонансными *RC*-фильтрами.

История развития консольных чувствительных элементов имеет свое начало с середины 1990-х годов. В 1995 г. компании *Sarnoff* было предложено Агентством перспективных оборонных исследований (DAPRA) принять участие в работах по улучшению характеристик неохлаждаемых ИК-приемников. Компания *Sarnoff* не была единственной организацией, которая выполняла подобные исследования. В то же самое время исследователи из национальной лаборатории ORNL (г. Теннесси) совместно с компанией *Consultec Scientific*, небольшой компанией, образованной руководством ORNL, работали над созданием подобных "микроконсольных" ИК-приемников (рис. 3).

В июне 1997 г. компания *Consultec Scientific*, которая имела эксклюзивные права от ORNL на технологию изготовления микроконсольных приемников, и компания *Sarnoff* решили объединить свои усилия и сформировали новую венчурную компанию для коммерциализации ИК-приемников. Венчурная компания *Sarcon Microsystems* наход-

* Статья подготовлена по материалам журнала "Opto & Laser Europe" (№ 6, 2003)

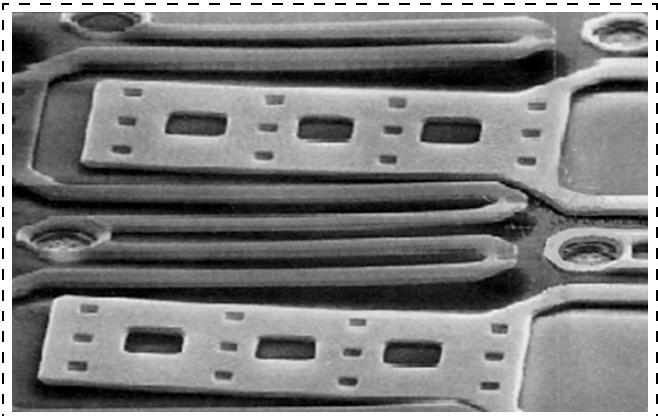


Рис. 3. Внешний вид микроконсольных ИК-приемников

дится под объединенным руководством компаний *Sarnoff*, *Consultec Scientific* и *Sarcon*.

В июле 1999 г. в результате совместных работ были созданы первые образцы приемников. Прототип имел чувствительность 300 мК. Спустя два месяца после установки электронного блока обработки и оптики с помощью этих приемников было получено первое ИК-изображение.

Оригинал на матрице 16×16 пикселей имел чувствительность 100 мК. В июле 2000 г. была сделана матрица 32×32 пикселей. К настоящему времени произошел значительный прогресс: число пикселей в матрице увеличено до 320×240 , при этом цена матрицы осталась на уровне первых образцов (рис. 4, см. четвертую сторону обложки).

Компания *Sarcon* обладает эксклюзивными правами на изготовление и продажу ИК-приборов, основанных на микроконсольной конструкции приемника.

Микроконсольные сенсоры дают оптимистичный прогноз на их использование в качестве мат-

Сравнительные характеристики неохлаждаемых ИК-приемников

| Характеристики приемников | Микроболометрические приемники | Пироэлектрические приемники | Микроконсольные приемники |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Температурная чувствительность, мК | 20 | 40 | 3 |
| Время отклика, мс | 15–20 | 15–20 | 5–10 |
| Динамический диапазон | 10^4 | 10^3 | $> 10^5$ |
| Требования к оптике | Светосильная, сложная | Светосильная, сложная | Простая |
| Потребляемая мощность | Низкая | Низкая | Низкая |
| Сложность | Большая | Большая | Стандартная технология для ИС |
| Габаритные размеры | Небольшие | Небольшие | Малые |
| Цена, тыс. долл. | 20–50 | 7–25 | 5–15 |

личных приемников в составе недорогих обладающих высокими характеристиками инфракрасных камер. По заявлению представителя компании данные приборы могут быть использованы для проведения ИК-измерений при контроле производственных процессов, или мониторинга мест перегрева оборудования. Но также, очевидно, они способны формировать изображение в условиях полной темноты и поэтому могут быть использованы как для скрытого наблюдения, так и для наблюдения в условиях сильного задымления.

Неохлаждаемые приемники, основанные на терморезистивных материалах, таких как аморфный кремний или оксид ванадия, изменяющих свое сопротивление при нагревании, уступают "консольному" ИК-приемнику по чувствительности (см. табл.). Если терморезистивные материалы имеют чувствительность несколько процентов на градус, то чувствительность нового приемника достигает 50 % на градус.

Разработчики уверены, что за счет подбора материала с большим коэффициентом расширения можно получить чувствительность, сравнимую с чувствительностью охлаждаемых приемников, и приблизиться к теоретическому пределу регистрации ИК-излучения.

Высокая чувствительность "консольных" приемников позволяет также уменьшить размер чувствительной площадки пикселя с 50 до 20–30 мкм, обеспечив уменьшение дисторсии в изображении. Одновременно появляется возможность сделать крупноформатную матрицу для получения изображения с высоким разрешением.

Однако предстоит еще сделать многое, прежде чем основанные на МЭМС-технологии приемники появятся на рынке. Согласно заявлениям вице-президента по торговле и маркетингу компании *Sarcon*, приборы пока имеют параметры, не отвечающие требованиям потенциального покупателя.

Требуется переработка КМОП-технологии для осуществления необходимых технологических операций под нижней поверхностью консоли, а также необходимо решить проблемы с паразитными емкостями в приемнике. Это может быть легко решено, например, путем использования техники экранирования слоев.

Кроме того, детекторы требуют дальнейшей очистки, а также улучшения однородности.

В первом квартале следующего года планируется начать передачу первых образцов производителям ИК-камер для оценки.

Представители компаний оптимистично смотрят в будущее. По их оценкам, специалисты, занимающиеся созданием и производством ИК-камер, проявляют огромный интерес к данным приемникам.

Конструирование и моделирование МСТ

УДК 621.3.049.779:536.12

А. Г. Козлов, канд. техн. наук, доц.,
Институт сенсорной микроэлектроники СО РАН,
г. Омск

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ГАЗОВЫХ МИКРОСЕНСОРАХ НА ТЕРМИЧЕСКИ ИЗОЛИРОВАННЫХ СТРУКТУРАХ

Представлен аналитический метод, позволяющий определять стационарное распределение температуры в газовых микросенсорах на термически изолированных структурах, полученных анизотропным травлением кремния. Структура микросенсора разделяется на ряд двумерных прямоугольных зон, распределение температуры в которых находится с помощью метода Фурье. Параметры, характеризующие процессы теплообмена между зонами, определяются из условий сопряжения. В качестве примера рассмотрено определение температуры в двух конструктивных разновидностях термокатализитических газовых микросенсорах на термически изолированных структурах.

Введение

Большую группу микросистем составляют газовые микросенсоры, работающие при высоких температурах (сотни градусов Цельсия). К этой группе относятся следующие типы газовых микросенсоров:

- термокатализитические газовые микросенсоры;
- газовые микросенсоры на основе оксидных полупроводников;
- газовые микросенсоры на основе материалов с высокотемпературной протонной проводимостью;
- термокондуктометрические газовые микросенсоры.

Во всех указанных типах газовых микросенсоров для получения высоких температур используются пленочные нагреватели. Для повышения эффективности этих микросенсоров, уменьшения их потребляемой мощности и увеличения чувствительности элементы микросенсоров располагают на специальных термически изолированных структурах, полученных анизотропным травлением кремния. В настоящее время в газовых микросенсорах

используются разнообразные типы термически изолированных структур [1–8].

При определении параметров газовых микросенсоров, разработке и оптимизации их конструкции необходимо знать распределение температуры в термически изолированных структурах этих микросенсоров. Экспериментальное определение распределения температуры в газовых микросенсорах является чрезвычайно сложной задачей из-за малых размеров термически изолированных структур. В некоторых конструктивных вариантах их размер не превышает 10 мкм. Единственным путем определения распределения температуры в газовых микросенсорах на термически изолированных структурах является математическое моделирование. В частности, в данной статье будет рассмотрено аналитическое моделирование распределения температуры в газовых микросенсорах на термически изолированных структурах на основе метода, предложенного в [9, 10].

Термически изолированные структуры для газовых микросенсоров

Используемые в газовых микросенсорах термически изолированные структуры показаны на рис. 1. Особенностью всех термически изолированных структур является наличие прямоугольных тонких плат (мембран), прикрепляемых к монокристаллическому кремнию тонкими и узкими консолями (мостами). Консоли служат также для расположения проводниковых слоев, с помощью которых осуществляется электрическое подсоединение элементов газового микросенсора к внешним цепям.

Газовые микросенсоры на термически изолированных структурах имеют следующие особенности:

- толщины всех слоев (базовых слоев и слоев, из которых изготовлены элементы микросенсора) в газовых микросенсорах являются соизмеримыми и значительно меньше, чем другие размеры слоев (их длина и ширина), т. е. структуру газовых микросенсоров можно рассматривать как двумерную структуру;
- двумерные термически изолированные структуры, на которых располагаются элементы газовых микросенсоров, имеют прямоугольные произвольные края или края, которые расположены под углом 45° к другим краям структуры;
- элементы газовых микросенсоров состоят из пленочных слоев, имеющих также прямоугольные произвольные края;

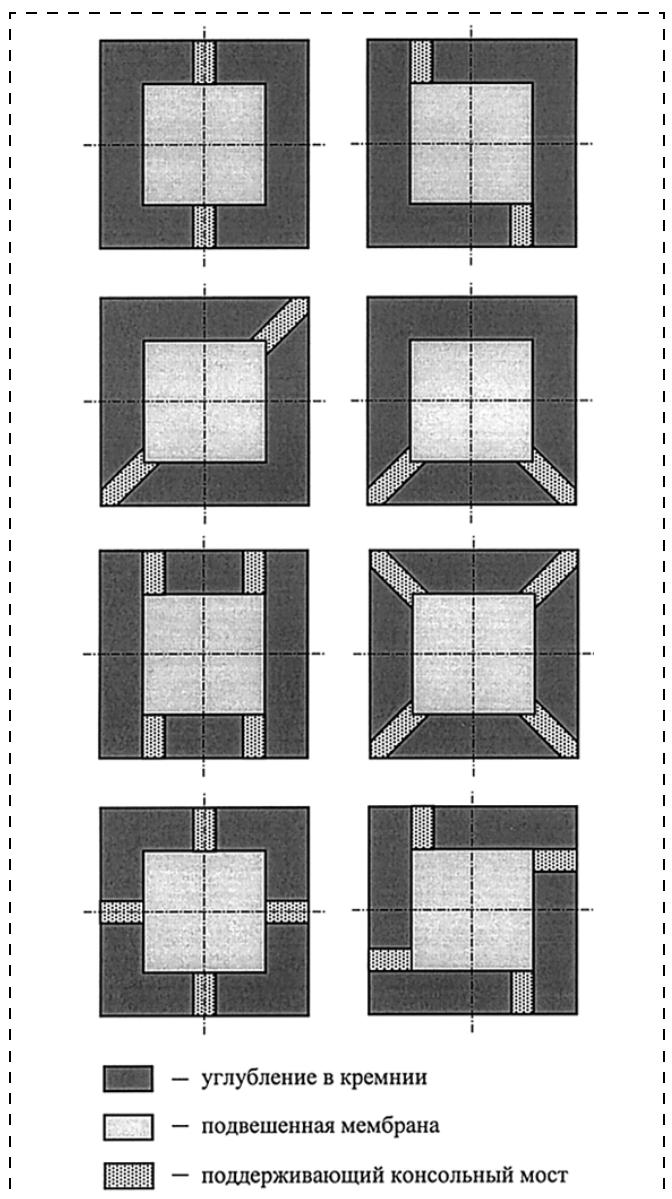


Рис. 1. Термически изолированные структуры, используемые в газовых микросенсорах

- все газовые микросенсоры имеют теплогенерирующие элементы прямоугольной формы, которые расположены в центре термически изолированной структуры.

Метод аналитического моделирования распределения температуры в структуре газового микросенсора

Для определения распределения температуры в газовых микросенсорах применим метод, предложенный в [9, 10]. Этот метод использует следующий алгоритм:

1. Двумерная структура газового микросенсора разделяется на прямоугольные зоны в зависимости от состава слоев и условий тепловыделения. Каждая зона, состоящая из нескольких слоев, заменяется эквивалентной зоной с однородными параметрами (эквивалентной толщиной $d_e^{(j)}$ и эквивалентной теплопроводностью $\lambda_e^{(j)}$):

$$d_e^{(j)} = \sum_{i=1}^n k_i^{(j)} d_i^{(j)}; \quad (1)$$

$$\lambda_e^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i^{(j)} d_i^{(j)} \lambda_i^{(j)}}{d_e^{(j)}}, \quad (2)$$

где $k_i^{(j)}$ — коэффициент, равный отношению общей площади слоя i в зоне j к площади этой зоны; $d_i^{(j)}$ — толщина слоя i в зоне j ; $\lambda_i^{(j)}$ — удельная теплопроводность материала слоя i в зоне j .

2. Для каждой зоны определяются условия теплообмена с окружающей средой посредством теплопередачи через газовую среду и радиационного теплообмена через нижнюю и верхнюю поверхности зоны и посредством теплопроводности через края зоны с соседними зонами и кремниевой подложкой. Общую удельную мощность теплопередачи от зоны j в окружающую среду через нижнюю и верхнюю поверхности можно представить в следующей форме:

$$N_t^{(j)} = A_j (T_j - T_{en}), \quad (3)$$

где

$$A_j = h_c + \frac{\lambda_a}{d_l^{(j)}} + 4\sigma(\varepsilon_l^{(j)} + \varepsilon_u^{(j)}) T_{en}^3 \quad (4)$$

— суммарный коэффициент поверхностного теплообмена; T_j — температура зоны j ; T_{en} — температура окружающей среды; h_c — коэффициент конвекции для данной структуры газового микросенсора; λ_a — удельная теплопроводность окружающей воздушной среды; $d_l^{(j)}$ — расстояние между нижней поверхностью зоны j и дном V -канавки; σ — постоянная Стефана—Больцмана; $\varepsilon_l^{(j)}$, $\varepsilon_u^{(j)}$ — коэффициенты излучения нижней и верхней поверхностей зоны j соответственно.

Условия теплообмена с соседними зонами и кремниевой подложкой посредством теплопроводности через края зоны j могут быть заданы с помощью граничных условий на этих краях. Исходя из геометрии термически изолированных структур газовых микросенсоров (рис. 1) можно представить три варианта граничных условий на краях выделенных зон:

- край зоны совпадает с линией крепления термически изолированной структуры к кремниевой подложке; в этом случае кремниевая подложка является эффективным поглотителем теплоты и на краю зоны следует использовать неоднородные граничные условия 1-го рода;
- край зоны граничит с окружающим воздухом; в этом случае, учитывая малую толщину зоны, можно использовать однородные граничные условия 2-го рода;
- край зоны граничит с краем соседней зоны; в этом случае должны использоваться граничные условия сопряжения.

3. Для каждой зоны определяется стационарное уравнение теплопроводности, которое решается методом Фурье. Учитывая, что условия теплообмена в зонах (за исключением теплообмена по краям зон) имеют одинаковый вид, стационарные уравнения теплопроводности для зон также будут иметь одинаковый вид. Эти уравнения могут быть представлены в следующей общей форме:

$$\frac{\partial^2 T'_j}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 T'_j}{\partial y_j^2} - p_j^2 T'_j = \phi^{(j)}, \quad (5)$$

где

$$T'_j = T_j - T_{en}; \quad (6)$$

$$p_j = \sqrt{\frac{A_j}{\lambda_e^{(j)} d_e^{(j)}}}; \quad (7)$$

$$\phi^{(j)} = -\frac{q^{(j)}}{\lambda_e^{(j)} d_e^{(j)}}; \quad (8)$$

$q^{(j)}$ — удельная мощность тепловыделения в зоне j .

Решение уравнения (5) методом Фурье имеет следующий вид [11]:

$$\begin{aligned} T'_j(x_j, y_j) = & -\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\Psi_{km}^{(j)}}{\|\Psi_{km}^{(j)}\|^2} \frac{1}{(\gamma_{km}^{(j)})^2} \int_0^{l_j} \int_0^{b_j} \Psi_{km}^{(j)} \phi^{(j)} dx_j dy_j + \\ & + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\Psi_{km}^{(j)}}{\|\Psi_{km}^{(j)}\|^2} \frac{1}{(\gamma_{km}^{(j)})^2} \times \\ & \times \int_{L_j} [\Theta_{km}^{(j)}(x_j, y_j)]_{(x_j, y_j) \in L_j} d\xi_j, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Psi_{km}^{(j)}$ — собственные функции однородной краевой задачи с однородными граничными условиями для рассматриваемой зоны; $\|\Psi_{km}^{(j)}\|^2$ — квадрат нормы собственных функций; $(\gamma_{km}^{(j)})^2$ — собственные значения однородной краевой задачи с од-

нородными граничными условиями для рассматриваемой зоны; $\Theta_{km}^{(j)}(x_j, y_j)$ — функция, заданная на граничном контуре L_j , которая зависит от граничных условий и значения собственных функций; $d\xi_j$ — дифференциал длины дуги граничного контура.

Форма решения уравнения теплопроводности для каждой зоны зависит от граничных условий на ее краях и определяется видом собственных функций. Для зон, которые имеют границы с соседними зонами, граничными условиями на этих границах являются граничные условия сопряжения. Для них распределение температуры в форме (9) получено при условии, что на указанных границах выполняются граничные условия 2-го рода. В этом случае после вычисления функции $\Theta_{km}^{(j)}(x_j, y_j)$ в выражении для распределения температуры появляются плотности тепловых потоков между соседними зонами, значения которых неизвестны. Для нахождения значений плотностей тепловых потоков они представляются как суммы соответствующих ортогональных функций с неизвестными весовыми коэффициентами. В окончательном виде выражение для распределения температуры, полученное на основе выражения (9), содержит неизвестные весовые коэффициенты, которые характеризуют процесс теплообмена между соседними зонами.

4. Определяются значения неизвестных весовых коэффициентов. Для этого используются уравнения равенства температур из граничных условий сопряжения между соседними зонами. В этих уравнениях необходимо перейти к конечным суммам и разделить их на отдельные уравнения в соответствии с индексами k и m . Полученные уравнения являются линейными уравнениями относительно неизвестных весовых коэффициентов. Чтобы получить полную систему уравнений для всех неизвестных весовых коэффициентов следует объединить системы линейных уравнений для всех границ в одну обобщенную систему линейных уравнений. Удобно записать эту обобщенную систему уравнений в матричном представлении:

$$\mathbf{M}\Delta = \boldsymbol{\Phi}, \quad (10)$$

где \mathbf{M} — матрица коэффициентов при неизвестных весовых коэффициентах; Δ — вектор неизвестных весовых коэффициентов; $\boldsymbol{\Phi}$ — вектор правых частей.

Матрица \mathbf{M} может быть представлена в виде блочной матрицы с подматрицами, которые характеризуют каждое множество коэффициентов при весовых коэффициентах на каждой границе между зонами. Аналогичным образом можно представить векторы Δ и $\boldsymbol{\Phi}$. Вектор Δ содержит подвекторы, каждый из которых состоит из весовых коэффици-

ентов для плотности теплового потока на данной границе. Вектор Φ содержит подвекторы, каждый из которых состоит из правых частей уравнений, полученных из уравнения равенства температур на данной границе.

В общем случае система линейных уравнений (10) содержит большое число неизвестных весовых коэффициентов и уравнений. Однако при практическом применении число неизвестных весовых коэффициентов и уравнений в системе (10) может быть сокращено (исходя из требуемой точности решения) путем выбора предельных значений для индексов k и m . В этом случае система линейных уравнений решается известными методами. Весовые коэффициенты, найденные в результате этого решения, позволяют окончательно определить распределение температуры в зонах газового микросенсора.

Распределение температуры в реальных структурах газовых микросенсоров

В качестве примера рассмотрим определение распределения температуры в газовых каталитических микросенсорах пеллисторного типа. Принцип работы этих сенсоров основывается на каталитическом окислении горючего газа. Тепловая энергия, выделяющаяся в результате реакции каталитического окисления, повышает температуру термически изолированной структуры, на которой располагается слой катализатора. Изменение температуры термически изолированной структуры определяется концентрацией горючего газа в окружающей среде и измеряется термо чувствительным элементом. Чтобы инициировать реакцию каталитического окисления для большинства газов, слой катализатора должен иметь температуру 300—600 °C. Это условие требует, чтобы нагреватель каталитического газового сенсора выделял значительную тепловую мощность, которая может быть понижена путем уменьшения размеров каталитического газового сенсора и увеличения теплового сопротивления между слоем катализатора и окружающей средой. Данная цель достигается при использовании термически изолированных структур, полученных анизотропным травлением монокристаллического кремния. В этом случае термически изолированная структура является прямоугольной платой из оксида или нитрида кремния, присоединенной к монокристаллическому кремнию с помощью тонких и узких мостов, также изготовленных из оксида или нитрида кремния. На поверхности прямоугольной платы располагаются последовательно тонкопленочный пеллистор, изолирующий слой и слой катализатора. В этой структуре пеллистор выполняет одновременно роль нагревателя и термо чувствительного элемента и изготавливается из платины в виде тонкопленочного резистора типа

"меандра". Для того чтобы уменьшить температурный градиент в термически изолированной структуре и повысить надежность каталитического газового микросенсора, резистивный слой пеллистора располагают также на тонких и узких мостах, а выводы пеллистора помещают за пределами термически изолированной структуры, на монокристаллическом кремнии.

Быстрое и точное моделирование распределения температуры в структуре каталитического газового микросенсора важно в процессе его проектирования. В связи с этим рассмотрим применение представленного метода для моделирования распределения температуры в следующих, широко используемых конструктивных разновидностях каталитических газовых микросенсоров:

- ◆ каталитические газовые микросенсоры на прямоугольных платах, присоединяемых к монокристаллическому кремнию в центре противоположных сторон;
- ◆ каталитические газовые микросенсоры на прямоугольных платах, присоединяемых к монокристаллическому кремнию на противоположных углах.

Для вышеуказанных структур будем использовать следующие **конструктивные параметры**:

Размеры прямоугольных плат, мкм:

| | |
|-------------------|-----|
| длина | 200 |
| ширина | 200 |
| толщина | 1,0 |

Размеры поддерживающих мостов, мкм:

| | |
|-------------------|-----|
| длина | 50 |
| ширина | 20 |
| толщина | 1,0 |

Толщина резистивного слоя пеллистора, мкм

| | |
|-------------------|-----|
| толщина | 0,4 |
| толщина | 0,1 |

Толщина слоя катализатора, мкм

| | |
|-------------------|-----|
| толщина | 0,1 |
| толщина | 0,5 |

Материал резистивного слоя пеллистора и слоя катализатора

платина (коэффициент теплопроводности — 72 Вт/(м · К); излучательная способность — 0,9

0,5

Толщина изолирующего слоя, мкм

диоксид кремния (коэффициент теплопроводности — 1,2 Вт/(м · К); излучательная способность — 0,5)

Материал прямоугольной платы, поддерживающих мостов и изолирующего слоя

Резистивный слой пеллистора имеет форму типа "меандра" и занимает половину площади прямоугольной платы и поддерживающих мостов. Тепловая мощность, выделяемая пеллистором, равна 10 мВт. В этом случае удельная тепловая мощность, выделяемая в термически изолированной структуре, равна $2,5 \cdot 10^5$ Вт/м².

При определении распределения температуры предложенным методом в каталитическом газовом микросенсоре пеллисторного типа возникает ряд трудностей, которые обусловлены тем, что микросенсор имеет высокие рабочие температуры. Во-первых, не выполняется положение о малом превышении температуры по сравнению с температурой окружающей среды. Это положение позволяло представить тепловые потери за счет радиационного теплообмена как линейную функцию от температуры микросенсора. Во-вторых, тепловые параметры, используемые при вычислении распределения температуры (коэффициент теплопроводности материалов слоев микросенсора, коэффициент теплопроводности окружающей газовой среды, коэффициент конвекции), являются температурно зависимыми параметрами и при рабочих температурах, значительно больших температуры окружающей среды, значения этих параметров будут отличаться от значений при температуре окружающей среды. Однако при определении распределения температуры в газовых микросенсорах, работающих при высоких температурах, эти трудности могут быть преодолены с помощью итерационной процедуры, которая включает в себя следующие шаги.

1. Для каждой зоны газового микросенсора определяется распределение температуры, при этом значения температурно зависимых параметров равны значениям при температуре окружающей среды, а суммарный коэффициент поверхностного теплообмена определяется также при температуре окружающей среды.

2. Определяется средняя температура каждой зоны

$$T_j^{av} = \frac{T_j^{\max} + T_j^{\min}}{2}, \quad (11)$$

где T_j^{\max} и T_j^{\min} — максимальная и минимальная температуры зоны j соответственно.

3. Определяется средняя температура газовой среды над каждой зоной

$$T_a^{(j)} = \frac{T_{en} + T_j^{av}}{2}. \quad (12)$$

4. Для каждой зоны газового микросенсора определяются значения температурно зависимых параметров: коэффициент теплопроводности окружающей газовой среды определяется при температуре $T_a^{(j)}$; коэффициенты теплопроводности материалов слоев газового микросенсора определяются при температуре T_j^{av} .

5. Для каждой зоны газового микросенсора определяется суммарный коэффициент поверхности

теплообмена с помощью выражения (4), в котором вместо T_{en} используется $T_a^{(j)}$.

6. Для каждой зоны газового микросенсора определяется распределение температуры с новыми значениями температурно зависимых параметров.

Далее итерационная процедура может повторяться, начиная с п. 2. Число циклов зависит от требуемой точности определения распределения температуры. Использование данной итерационной процедуры в представленном методе определения распределения температуры дает дополнительное преимущество, которое обусловлено тем, что для каждой зоны газового микросенсора итерационная процедура проводится независимо. Это позволяет повысить точность определения распределения температуры в газовых микросенсорах, работающих при высоких температурах.

Структура каталитического газового микросенсора на прямоугольной плате, присоединенной к монокристаллическому кремнию в центре противоположных сторон, представлена на рис. 2, *a* (см. третью сторону обложки). Анализ этого газового сенсора позволяет выделить в его структуре следующие зоны:

- три зоны, занятые резистивным, изолирующими и каталитическим слоями (зоны 0, 1 и 3);
- две зоны, занятые резистивным слоем (зоны 2 и 4).

Все зоны являются тепловыделяющими зонами. Чтобы определить весовые коэффициенты, характеризующие процессы теплообмена на границах между зонами, необходимо решить систему линейных уравнений, полученную из условий равенства температур на границах между этими зонами. Матрица \mathbf{M} коэффициентов при неизвестных весовых коэффициентах, вектор неизвестных весовых коэффициентов Δ и вектор правых частей Φ имеют следующий вид в представлении блочных матриц:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_m^{(0,1)} & \mathbf{A}_k^{(0,2)} & \mathbf{A}_m^{(0,3)} & \mathbf{A}_k^{(0,4)} \\ \mathbf{B}_m^{(0,1)} & \mathbf{B}_k^{(0,2)} & \mathbf{B}_m^{(0,3)} & \mathbf{B}_k^{(0,4)} \\ \mathbf{C}_m^{(0,1)} & \mathbf{C}_k^{(0,2)} & \mathbf{C}_m^{(0,3)} & \mathbf{C}_k^{(0,4)} \\ \mathbf{D}_m^{(0,1)} & \mathbf{D}_k^{(0,2)} & \mathbf{D}_m^{(0,3)} & \mathbf{D}_k^{(0,4)} \end{bmatrix}; \quad \Delta = \begin{bmatrix} \Delta_m^{(0,1)} \\ \Delta_k^{(0,2)} \\ \Delta_m^{(0,3)} \\ \Delta_k^{(0,4)} \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} \Phi_m^{(0,1)} \\ \Phi_k^{(0,2)} \\ \Phi_m^{(0,3)} \\ \Phi_k^{(0,4)} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Для выбранных параметров каталитического газового микросенсора на прямоугольной плате, присоединенной к монокристаллическому кремнию в центре противоположных сторон, распределение температуры в зонах показано на рис. 2, б (см. третью сторону обложки).

Для каталитического газового микросенсора на прямоугольной плате, присоединенной к монокристаллическому кремнию на противоположных углах (рис. 3, а, см. третью сторону обложки) распределение температуры может быть определено аналогичным образом. Анализ этого газового сенсора позволяет выделить в его структуре следующие зоны:

- три зоны, занятые резистивным, изолирующим и каталитическим слоями (зоны 0, 1 и 2);
- две зоны, занятые резистивным слоем (зоны 3 и 4).

В этом случае матрица \mathbf{M} коэффициентов при неизвестных весовых коэффициентах, вектор неизвестных весовых коэффициентов Δ и вектор правых частей Φ имеют следующий вид в представлении блочных матриц:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_m^{(0,1)} & \mathbf{A}_m^{(0,2)} & \mathbf{A}_k^{(1,3)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_m^{(0,1)} & \mathbf{B}_m^{(0,2)} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_k^{(2,4)} \\ \mathbf{C}_m^{(0,1)} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_k^{(1,3)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_m^{(0,2)} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_k^{(2,4)} \end{bmatrix}; \quad \Delta = \begin{bmatrix} \Delta_m^{(0,1)} \\ \Delta_m^{(0,2)} \\ \Delta_k^{(1,3)} \\ \Delta_k^{(2,4)} \end{bmatrix};$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_m^{(0,1)} \\ \Phi_m^{(0,2)} \\ \Phi_k^{(1,3)} \\ \Phi_k^{(2,4)} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Распределение температуры в зонах каталитического газового микросенсора на прямоугольной плате, присоединенной к монокристаллическому кремнию на противоположных углах, показано на рис. 3, б.

Сравнение распределения температуры в обоих типах каталитических газовых микросенсоров на прямоугольных plataх с различными вариантами крепления, но идентичными конструктивными параметрами позволяет отметить следующие особенности этих микросенсоров. Каталитические газовые микросенсоры на прямоугольной плате, присоединенной к монокристаллическому кремнию на противоположных углах, имеют более высокие среднюю температуру, максимальную температуру и минимальную температуру по сравнению с ката-

литическими газовыми микросенсорами, у которых прямоугольные платы закреплены на противоположных сторонах. В этой связи использование каталитических сенсоров с прямоугольными платами, присоединяемыми к монокристаллическому кремнию в противоположных углах, является более предпочтительным. Эти газовые микросенсоры требуют меньшей мощности нагревателя для получения установленных значений рабочей температуры.

Выводы

Предложенный метод аналитического моделирования стационарного распределения температуры в газовых микросенсорах на термически изолированных структурах позволяет заменить численные методы и осуществлять моделирование быстро и с требуемой точностью. При его использовании для микросистем, работающих при высоких температурах, необходимо применять специальный итерационный метод, чтобы повысить точность определения распределения температуры.

Представленные практические результаты показывают, что предложенный метод определения распределения температуры в газовых микросенсорах может быть использован для создания простых систем автоматизированного проектирования этих микросенсоров.

Список литературы

1. Baltes H., Paul O., Brand O. Micromachined thermally based CMOS microsensors // Proceedings of the IEEE. 1998. V. 86. P. 1660–1678.
2. Zanini M., Visser J. H., Rimai L. and all. Fabrication and properties of a Si-based high-sensitivity microcalorimetric gas sensor // Sensors and Actuators A. Physical. 1995. V. 48. P. 187–192.
3. Gajda M. A., Ahmed H. Application of thermal silicon sensors on membranes // Sensors and Actuators A. Physical. 1995. V. 49. P. 1–9.
4. Fung S. K. H., Tang Z., Chan P. C. H. and all. Thermal analysis and design of a microhotplate for integrated gas-sensor applications // Sensors and Actuators A. Physical. 1996. V. 54. P. 482–487.
5. Sheng L., Tang Z., Wu J. and all. A low-power CMOS compatible integrated gas sensor using maskless tin oxide sputtering // Sensors and Actuators B. Chemical. 1998. V. 49. P. 81–87.
6. Kunt T. A., McAvoy T. J., Cavicchi R. E., Semancik S. Optimization of temperature programmed sensing for gas identification using micro-hotplate sensors // Sensors and Actuators B. Chemical. 1998. V. 53. P. 24–43.
7. Kolev S. D., Ádám M., Dücsö C. and all. Thermal modelling of a porous silicon-based pellistor-type catalytic flammable gas sensor with two supporting beams // Microelectronics Journal. 2000. V. 31. P. 339–342.
8. Semancik S., Cavicchi R. E., Wheeler M. C. and all. Microhotplate platforms for chemical sensor research // Sensors and Actuators B. Chemical. 2001. V. 77. P. 579–591.
9. Kozlov A. G. Analytical modelling of steady-state temperature distribution in thermal microsensors using Fourier method. Part 1. Theory // Sensors and Actuators A. Physical. 2002. V. 101. P. 283–298.
10. Kozlov A. G. Analytical modelling of steady-state temperature distribution in thermal microsensors using Fourier method. Part 2. Practical application // Sensors and Actuators A. Physical. 2002. V. 101. P. 299–310.
11. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001. 550 с.

УДК 621.382.049.077.001.576(06)

Н. Н. Балан,
ООО "Ангстрем — Центр Нанотех"

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ MEMS-СТРУКТУР

Описывается конечноэлементный метод расчета многослойных пластин, предлагаемый к использованию при моделировании подвижных элементов MEMS-структур. На примере расчета мембранны туннельного сенсора и сравнения полученных результатов с аналитическими демонстрируется эффективность применения предложенного метода. Обсуждаются недостатки метода и способы их устранения.

Введение

Настоящая статья посвящена моделированию подвижных элементов MEMS-структур. Уже около тридцати лет кремниевая микромеханика является интенсивно развивающейся областью современной техники. Высокопроизводительная групповая технология в последние годы активно применяется при изготовлении сложных миниатюрных механических устройств, которые могут быть интегрированы с электронными приборами с помощью технологических методов, описанных, например, в [1]. Однако в последние 5–10 лет в развитии этой области произошел серьезный скачок, связанный с появлением технологии MEMS [2–3] (MEMS – MicroElectroMechanical Systems). Работы по созданию новых видов этих устройств, а также по усовершенствованию имеющихся, ведутся в настоящее время с большой интенсивностью. Совершенствуются технологические процессы, вводятся новые материалы, усложняется структура элементов. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых (и привлечении уже существующих) методов моделирования разрабатываемых изделий, создании эффективных математических моделей, используемых в процессе дизайна MEMS-структур на основе "подвижного кремния". Разумеется, важнейшей частью этих работ является как статическое, так и динамическое моделирование напряженно-деформированных состояний подвижных элементов MEMS-структур. В большинстве случаев к ним неприменимо аналитическое описание, что обусловлено как сложностью геометрии, так и неоднородностью по толщине (в случае слоистых элементов).

Целью работы является привлечение эффективных численных методик для расчета динамического напряженно-деформированного состоя-

ния MEMS-структур. В основу предлагаемой методики положен метод конечных элементов (МКЭ) [4].

К сожалению, в отечественной литературе вопросы численного моделирования напряженно-деформированного состояния MEMS-структур освещены недостаточно. Результаты, имеющиеся в зарубежных публикациях [5–7], не могут быть непосредственно использованы из-за различия решаемых задач, а также специфики технологических процессов, принятых в отечественной полупроводниковой промышленности.

В данной статье для моделирования напряженно-деформированного состояния подвижных компонентов MEMS-структур предлагается использовать конечно-элементный метод расчета многослойных пластин. Описано применение названного метода для расчета прогибов и собственных частот колебаний чувствительного элемента туннельного датчика.

Методика расчета динамического напряженно-деформированного состояния многослойных пластин

Задачу об изгибе и колебаниях многослойных пластин сложной геометрии можно решать с помощью метода конечных элементов. Сущность этого метода состоит в разбиении сплошного тела на сплошные элементы, взаимодействующие между собой в узловых точках, в которых вводятся фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов.

Конечноэлементное уравнение движения выглядит следующим образом:

$$[K]\{\delta\} + [C]\frac{\partial}{\partial t}\{\delta\} + [M]\frac{\partial^2}{\partial t^2}\{\delta\} + \{F\} = 0, \quad (1)$$

где $[K]$ и $\{F\}$ — матрицы жесткости и сил ансамбля, а $\{\delta\}$ — узловые степени свободы. Матрицы $[C]$ и $[M]$ составляются из подматриц отдельных элементов, задаваемых в виде

$$\begin{aligned} [c_{ij}]^e &= \int\limits_{V^e} [N_i]^T \mu [N_j] dV; \\ [m_{ij}]^e &= \int\limits_{V^e} [N_i]^T \rho [N_j] dV. \end{aligned} \quad (2)$$

Матрица $[m_{ij}]^e$ известна как матрица масс элемента, а матрица ансамбля $[M]$ — как матрица масс системы. Матрица $[C]$ описывает вязкое демпфирование, $[N]$ — функции формы элемента, e — номер элемента. Для двумерных задач интегрирование выполняется по площади e -го элемента.

Если рассматривается динамическая задача без демпфирования ($[C] = 0$), то собственные частоты колебаний пластины определяются из условия

$$\det |[K] - (2\pi f_n)^2 [M]| = 0, \quad (3)$$

где f_n — n -я собственная частота.

Глобальная матрица жесткости системы $[K]$ определяется по формуле

$$[K_{ij}] = \int [B_i][D][B_j]dV, \quad (4)$$

где интегрирование ведется по всей области.

Матрица $[B]$ связывает обобщенные деформации по всей пластине $\{\epsilon\}$ со степенями свободы в узлах $\{\delta\}$:

$$\{\epsilon\} = [B]\{\delta\}, \quad (5)$$

а матрица $[D]$ — обобщенные напряжения $\{\sigma\}$ с обобщенными деформациями:

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\}. \quad (6)$$

Рассмотрим задачу об изгибе многослойной пластины (рис. 1). Пластина состоит из n слоев трансверсально-изотропного материала с постоянной для одного слоя (но различной для разных слоев) толщиной h_k ($k = 1, 2, \dots, n$). Плоскости изотропии параллельны наружным поверхностям. Слои неожидаемы и закон Гука для каждого из них имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_x^k &= \frac{E_k}{1-\mu_k^2} (\epsilon_x^k + \mu_k \epsilon_y^k); \\ \sigma_y^k &= \frac{E_k}{1-\mu_k^2} (\epsilon_y^k + \mu_k \epsilon_x^k); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\tau_{xy}^k = \frac{E_k}{2(1+\mu_k)} \epsilon_{xy}^k; \quad \tau_{xz}^k = G_k \gamma_{xz}^k; \quad \tau_{yz}^k = G_k \gamma_{yz}^k,$$

где $E_k = E_k(z)$, $\mu_k = \mu_k(z)$ — модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона в плоскости изотропии; $G_k = G_k(z)$ — модуль поперечного сдвига.

Примем следующие гипотезы:

1) внешняя нагрузка $p = p(x, y)$ направлена по нормали z к плоскости пластины xOy ;

2) слои работают совместно — без отрыва и проскальзывания;

3) материал каждого слоя подчиняется закону Гука в вышеприведенной форме, т. е. $\sigma_z^k = 0$;

4) нормальные перемещения постоянны по толщине пакета слоев: $w_k(x, y, z) = w(x, y)$;

5) тангенциальные перемещения координатной поверхности $z = 0$ пренебрежимо малы: $u(x, y) = 0$; $v(x, y) = 0$;

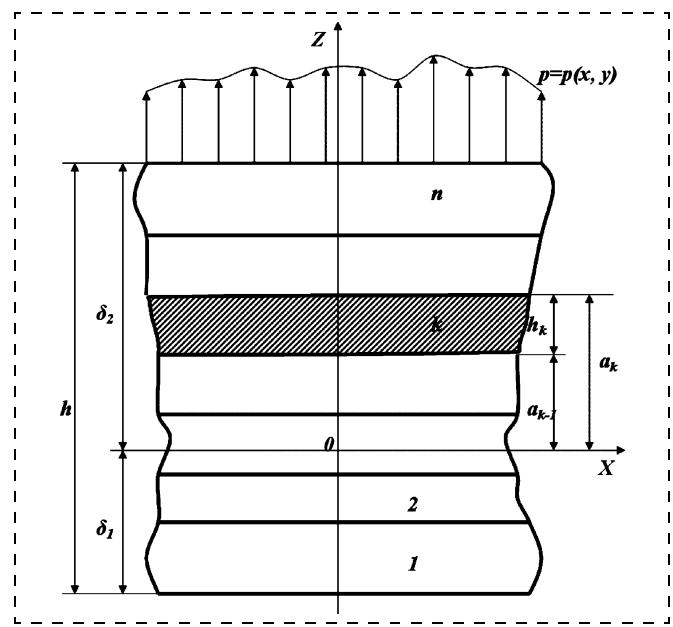


Рис. 1. Структура многослойной мембраны

6) приняты во внимание деформации поперечного сдвига:

$$\gamma_{xz}^k = \frac{\partial \chi}{\partial x} \frac{d\psi_k(z)}{dz}; \quad \gamma_{yz}^k = \frac{\partial \chi}{\partial y} \frac{d\psi_k(z)}{dz}. \quad (8)$$

Здесь $\chi = \chi(x, y)$ — искомая функция сдвига;

$$\psi_k(z) = \int_0^z \frac{1}{G_k} \left(\int_{-\delta_1}^z E_k z dz \right) dz, \quad (9)$$

где δ_1 — расстояние, определяющее положение координатной поверхности $z = 0$, для которого справедлива формула

$$\delta_1 = \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k}{c_{k-1}} \int_{c_{k-1}}^{c_k} E_k z_k dz_k \right) : \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k}{c_{k-1}} \int_{c_{k-1}}^{c_k} E_k dz_k \right). \quad (10)$$

Здесь $z = z_k - \delta_1$, z_k отсчитывается от нижней поверхности пластины; c_k — расстояние от нижней поверхности пластины до верхней поверхности k -го слоя.

При расчете многослойных пластин методом конечных элементов в каждом узле вводятся шесть степеней свободы — три изгибных и три сдвиговых:

$$\{\delta_n\} = \begin{Bmatrix} w_n \\ \Phi_{x_n} \\ \Phi_{y_n} \end{Bmatrix}, \quad \{\bar{\delta}_n\} = \begin{Bmatrix} \bar{w}_n \\ \bar{\Phi}_{x_n} \\ \bar{\Phi}_{y_n} \end{Bmatrix}, \quad (11)$$

где Φ_x и Φ_y — соответственно производные прогиба w по x и y — углы поворота нормали, а n — номер узла. Сдвиговый прогиб $\bar{w} = c_1 \chi$, где χ — искомая функция сдвига. Здесь и далее

$$c_1 = D_{12}/D_{11}; \quad c_2 = D_{22}/D_{12}; \quad \mu_{rs} = \overline{D}_{rs}/D_{rs};$$

$$D_{rs} = \sum_{k=1}^n \int_{a_{k-1}}^{a_k} \frac{E_k}{1-\mu_k^2} F_{rk} F_{sk} dz; \quad (12)$$

$$\overline{D}_{rs} = \sum_{k=1}^n \int_{a_{k-1}}^{a_k} \frac{E_k \mu_k}{1-\mu_k^2} F_{rk} F_{sk} dz;$$

$$r, s = 1, 2; \quad F_{1k} = z; \quad F_{2k} = -\psi_k(z).$$

Векторы обобщенных деформаций и напряжений запишем в виде

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \partial e_x \\ \partial e_y \\ \partial e_{xy} \\ \overline{\partial e}_x \\ \overline{\partial e}_y \\ \overline{\partial e}_{xy} \\ \Phi_x \\ \Phi_y \end{Bmatrix}; \quad \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ \overline{M}_x \\ \overline{M}_y \\ \overline{M}_{xy} \\ \overline{Q}_x \\ \overline{Q}_y \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

Здесь

$$\partial e_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \partial e_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \partial e_{xy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (14)$$

— кривизны изгиба в направлениях x , y и смешанная кривизна соответственно;

$$\overline{\partial e}_x = -\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2}; \quad \overline{\partial e}_y = -\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2}; \quad \overline{\partial e}_{xy} = -\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} \quad (15)$$

— кривизны сдвига — аналоги кривизны изгиба;

$$\overline{\Phi}_x = \frac{\partial \bar{w}}{\partial x}; \quad \overline{\Phi}_y = \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \quad (16)$$

— сдвиговые углы поворота — аналоги углов поворота нормали;

$$M_x = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_x^k z dz; \quad M_y = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_y^k z dz;$$

$$M_{xy} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{xy}^k z dz \quad (17)$$

— изгибающие и крутящий моменты;

$$\overline{M}_x = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_x^k \psi_k(z) dz; \quad \overline{M}_y = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_y^k \psi_k(z) dz;$$

$$\overline{M}_{xy} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{xy}^k \psi_k(z) dz \quad (18)$$

— обобщенные моменты высшего порядка — сдвиговые;

$$\overline{Q}_x = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{xz}^k \frac{d\psi_k(z)}{dz} dz;$$

$$\overline{Q}_y = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{yz}^k \frac{d\psi_k(z)}{dz} dz \quad (19)$$

— обобщенные поперечные силы высшего порядка.

Компоненты векторов напряжений и деформаций связаны следующими соотношениями:

$$M_x = D_{11}[(\partial e_x + \mu_{11} \partial e_y) + (\overline{\partial e}_x + \mu_{12} \overline{\partial e}_y)];$$

$$M_y = D_{11}[(\partial e_y + \mu_{11} \partial e_x) + (\overline{\partial e}_y + \mu_{12} \overline{\partial e}_x)];$$

$$M_{xy} = 2D_{11}[(1 - \mu_{11}) \partial e_{xy} + (1 - \mu_{12}) \overline{\partial e}_{xy}];$$

$$\overline{M}_x = -D_{11}[c_1(\partial e_x + \mu_{12} \partial e_y) + c_2(\overline{\partial e}_x + \mu_{22} \overline{\partial e}_y)];$$

$$\overline{M}_y = -D_{11}[c_1(\partial e_y + \mu_{11} \partial e_x) + c_2(\overline{\partial e}_y + \mu_{22} \overline{\partial e}_x)];$$

$$\overline{M}_{xy} = -2D_{11}[c_1(1 - \mu_{12}) \partial e_{xy} + c_2(1 - \mu_{22}) \overline{\partial e}_{xy}];$$

$$\overline{Q}_x = D_{11} \overline{\Phi}_x; \quad \overline{Q}_y = D_{11} \overline{\Phi}_y.$$

Отсюда получаем компоненты матрицы $[D]$.

Применение изложенной методики для расчета упругих свойств чувствительного элемента микросистемы туннельного датчика

Среди устройств, изготавливаемых по MEMS-технологии, важное место занимают разнообразные интегральные датчики. К числу наиболее перспективных из них относятся датчики с использованием туннельного эффекта [8–10]. Акустические датчики на туннельных преобразователях разрабатываются также и в нашей стране [11].

Принцип действия разрабатываемого акустического туннельного датчика (как и туннельного микроскопа) основан на измерении туннельного тока, протекающего в зазоре между чувствительным электродом-мембраной и фиксированной иглой (рис. 2). Известно, что зависимость туннельного тока от расстояния между электродами выглядит следующим образом [12]:

$$I(x) = \frac{e^2 S E}{4\pi^2 x \hbar \lambda_0} \exp(-2x/\lambda_0), \quad x \gg \lambda_0, \quad (21)$$

где e — заряд электрона; S — площадь туннельного электрода; E — приложенная ЭДС; $\lambda_0 = \hbar(2m\phi_0)^{-1/2}$; ϕ_0 — работа выхода материала электрода; m — масса электрона. Для типичных значений ϕ_0 и x (1 эВ

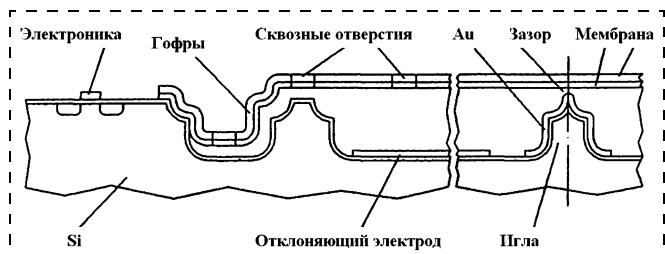


Рис. 2. Интегральный акустический туннельный сенсор

и 1 нм соответственно) туннельный ток меняется с каждым 0,1 нм в три раза.

Подвод мембранны к игле на туннельное расстояние (~1 нм) осуществляется подачей соответствующей разности потенциалов между слоем металлизации мембранны и отклоняющим электродом (см. рис. 2). Для поддержания устойчивого туннельного контакта прибор должен управляться с помощью обратной связи: измеряя туннельный ток, необходимо поддерживать зазор (и, следовательно, силу тока) на одном уровне. Это осуществляется с помощью тех же отклоняющих электродов. Выходным сигналом устройства является управляющее напряжение обратной связи.

Чувствительный элемент (мембрана) туннельного сенсора имеет форму правильного восьмиугольника и может рассматриваться как тонкая слоистая пластина. Форма восьмиугольника была выбрана как допустимое с точки зрения удобства технологической реализации приближение к круглой форме мембранны. Помимо основного поликремниевого слоя (толщина может варьироваться от 1 до 3 мкм) имеется слой платиновой металлизации толщиной 100 или 200 нм в зависимости от варианта изготовления. Прочие (кроме толщин) размеры должны быть подобраны после соответствующих расчетов исходя из требований, предъявляемых к конкретной модели датчика. Закрепление краев мембранны может быть как жестким, так и упругим — это зависит от отсутствия или наличия гофров.

Для того чтобы между иглой и мембранны появился туннельный ток, необходимо подвести их друг к другу на туннельное расстояние. Как уже было сказано выше, это осуществляется путем подачи разности потенциалов между мембранны и отклоняющим электродом, которые в совокупности друг с другом образуют плоский конденсатор емкостью $C = \epsilon_0 A/d$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ — диэлектрическая проницаемость вакуума, A — площадь мембранны, d — расстояние между мембранны и отклоняющими электродами. Если между мембранны и отклоняющим электродом приложить разность потенциалов U , то начальная интенсивность нагружения мембранны определится по формуле $q = \epsilon_0 U^2/(2d^2)$.

Предложенный выше метод был использован для вычисления значений максимального прогиба мембранны сенсора под действием приложенной разности потенциалов (статический случай), а также для расчета частоты основного тона ее собственных колебаний. На рис. 3 изображена мембранны сенсора, покрытая конечноэлементной сеткой. Поперечный размер мембранны в рассматриваемом случае составлял 2000 мкм, толщины слоев платины и кремния — соответственно $h_{\text{Pt}} = 200 \text{ нм}$, $h_{\text{Si}} = 1 \text{ мкм}$. Модули Юнга и коэффициенты Пуассона для поликремния и платины были приняты равными соответственно $E_{\text{Si}} = 140 \text{ ГПа}$, $v_{\text{Si}} = 0,32$ и $E_{\text{Pt}} = 160 \text{ ГПа}$, $v_{\text{Pt}} = 0,32$. Края мембранны жестко закреплены.

При проведении численных расчетов на ЭВМ были использованы отдельные блоки конечноэлементного пакета ANSYS. При генерации сетки размер стороны элемента составлял 20 мкм.

Для сравнения были проведены аналитические расчеты тех же величин для тонкой круглой кремниевой пластинки радиуса 1000 мкм и толщины 1 мкм с жестко закрепленными краями. В случае равномерного нагружения с интенсивностью q круглой пластинки уравнение, описывающее прогиб w , выглядит так [13]:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{qr}{2D}, \quad (22)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-v^2)}$ — цилиндрическая жесткость;

E и v — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала пластинки; h — ее толщина. В случае приложения нагрузки, равной, как и раньше, $q = \epsilon_0 U^2/(2d^2)$, максимальный прогиб (наблюдаемый в центре пластинки) будет определяться формулой

$$w_{\max} = \frac{\epsilon_0 U^2 R^4}{128 d^2 D}. \quad (23)$$

Для вычисления собственных колебаний такой пластинки необходимо решить уравнение

$$\Delta \Delta w = -2a^2 w_{tt}, \quad (24)$$

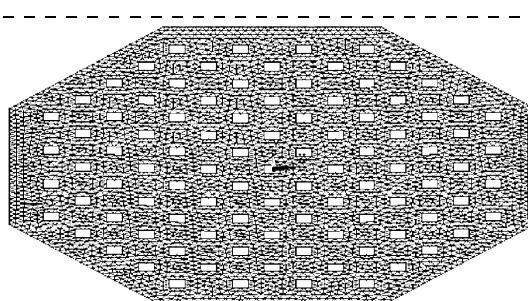


Рис. 3. Мембрана сенсора, покрытая конечноэлементной сеткой

где $a^2 = \rho h/D$, ρ — плотность кремния, равная $2,33 \cdot 10^3$ кг/м³. Для мембраны с защемленными краями получим следующее выражение для резонансных частот (см. [14] или [15]):

$$p_{mn} = \frac{x_{mn}^2 h}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}, \quad (25)$$

где x_{mn} — m -й корень уравнения $\frac{J_n(x)}{J_n'(x)} = \frac{I_n(x)}{I_n'(x)}$.

Здесь $J_n(x)$ и $I_n(x)$ — соответственно обычная и модифицированная функции Бесселя порядка n .

Для круглой кремниевой мембранны радиуса $R = 1000$ мкм и толщины $h = 1$ мкм вычисленная таким образом частота основного тона $f_0 = p_{10} = 3067$ Гц.

Частота основного тона для восьмиугольной двухслойной мембранны (параметры приведены выше), вычисленная методом конечных элементов, составила $f_{0\text{мкэ}} = 3050$ Гц.

В таблице приведены данные максимального прогиба мембранны в зависимости от приложенного напряжения при различных начальных расстояниях d между мембраной и отклоняющим электродом:

$w_{1\text{max}}$ — максимальный прогиб, вычисленный по формуле (23) для круглой кремниевой мембранны;

$w_{2\text{max}}$ — максимальный прогиб, вычисленный для восьмиугольной двухслойной (Si—Pt) мембранны методом конечных элементов.

Параметры мембранны приведены выше.

Незначительное отличие результатов конечно-элементного и аналитического расчетов обусловлено тем, что поперечные размеры рассчитываемых мембранны гораздо больше их толщин, а также незначительной разницей между принятыми значениями модулей Юнга кремния и платины. На практике существует необходимость в экспериментальном определении упругих констант MEMS-материалов [16—18]. Это обусловлено тем, что упругие механические константы, такие как модуль упругости и коэффициент Пуассона поликремниевых пленок, используемых при изготовлении широкого спектра MEMS-устройств (в частности, и туннельных сенсоров), зависят от технологического

| $U(d = 1,5 \text{ мкм}), \text{ В}$ | $U(d = 3 \text{ мкм}), \text{ В}$ | $U(d = 6 \text{ мкм}), \text{ В}$ | $W_{1\text{max}}, \text{ мкм}$ | $W_{2\text{max}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,02 | 0,019 |
| 0,2 | 0,4 | 0,8 | 0,09 | 0,074 |
| 0,25 | 0,5 | 1,0 | 0,15 | 0,115 |
| 0,3 | 0,6 | 1,2 | 0,21 | 0,165 |
| 0,35 | 0,7 | 1,4 | 0,29 | 0,224 |
| 0,4 | 0,8 | 1,6 | 0,38 | 0,295 |
| 0,45 | 0,9 | 1,8 | 0,48 | 0,371 |
| 0,5 | 1,0 | 2,0 | 0,59 | 0,461 |

маршрута, выполняемого при изготовлении изделия [19—22].

Следует также отметить, что в реальной мембранны туннельного сенсора (как и любого другого сенсора, изготовленного по MEMS-технологии) про-деляются периодические отверстия (показаны на рис. 3), необходимые для вытравливания так называемого "жертвенного слоя" на конечных этапах технологии изготовления изделия. В одном из вариантов изготовления устройства они имеют раз-мер 5×5 мкм и располагаются в шахматном по-рядке с шагом 20 мкм. При моделировании напря-женно-деформированного состояния подвижных элементов MEMS-структур целесообразно учить-вать их влияние. Однако, если их размеры очень малы, это невозможно сделать из-за ограниченно-сти вычислительных ресурсов существующих ЭВМ, так как приходится брать слишком мелкую сетку. Эта задача может быть решена с помощью методов осреднения, используемых в механике компози-ционных материалов [23—24]. Автор предполагает рассмотреть этот вопрос отдельно.

Заключение

Основные результаты работы можно сформули-ровать следующим образом. Для применения в мо-делировании подвижных элементов MEMS-струк-тур предложен конечноэлементный метод расчета напряженно-деформированного состояния много-слойных пластин. С помощью названного метода проведен расчет прогибов и частоты основного то-на чувствительного элемента-мембранны акустиче-ского туннельного датчика. Сравнение полученных результатов с аналитическими показало хорошую применимость метода при проектировании MEMS-устройств. Описаны его недостатки, связанные с не-возможностью учета влияния мелких периодических отверстий, и указаны пути их устранения.

Использование предлагаемого метода позволит с высокой степенью достоверности предсказать уп-ругие свойства подвижных элементов MEMS-струк-тур, определить целесообразность изготовления того или иного вида приборов, повысить качество и на-дежность изделий микросистемной техники.

Список литературы

- Petersen K. E. Silicon as a mechanical material // Proc. IEEE. May 1982. 70(5). P. 420—457.
- Jerman H., Terry S. Sensors and Actuators // Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication. / Ed. by P. Rai-Choudhury. Vol. 2: Micromachining and Microfabrication. Washington: SPIE Optical Engineering Press. 1997. 379 p.
- Fedder G. Integrated MEMS in Conventional CMOS // Proc. of the NSF/ASME Workshop on Tribology Issues and Opportunities in MEMS. Kluwer Academic Publishers. November. 1997.
- Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
- Vandemeer J. E., Kranz M. S., Fedder G. Hierarchical Representation and Simulation of Micromachined Inertial Sensors // Modeling and Simulation of Microsystems Conference. April. 1998.

6. Clark S. K., Wise K. D. Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors // IEEE Trans. Electron Devices. 1979. ED-26. P. 1887.
7. Meng Q., Mehregany M., Mullen R. L. Theoretical Modeling of Microfabricated Beams Elastically Restrained Supports // J. Microelectromechanical Systems. 1993. V. 2, Sept. P. 128–137.
8. Kenny T. W., Kaiser W. J., Waltman S. B., Reynolds J. K. Novel Infrared Detector Based on a Tunneling Displacement Transducer // Applied Physics Letters. 1991. 59(15). N 7.
9. Rockstad H. K., Kenny T. W., Kelly P. J. and Gabrielson T. B. A Micro-Fabricated Electron-Tunneling Accelerometer as a Directional Acoustic Sensor// Proceedings of Acoustic Particle Velocity Sensors: Design, Performance and Applications 9/95 Published in AIP Conf Proc. 1996. 57. P. 368, 57, 1996.
10. Liu C. H. and Kenny T. A High-Precision, Wide-Bandwidth Micromachined Tunneling Accelerometer // Journal of microelectromechanical systems. 2001. Vol. 10. N 3.
11. Алексенко А. Г., Дшхунян В. Л. Акустические микросистемы // Научная сессия МИФИ-2002. Сб. науч. трудов. М.: МИФИ, 2002. Т. 4.
12. Simmons J. General Formula for Electric Tunnel Effect Between Similar Electrodes Separated by Thin Insulating Film // J. Appl. Phys. 1963. 34.
13. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Наука, 1966.
14. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики. М.-Л.: Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1951.
15. Коренев Б. Г. Введение в теорию бесселевых функций. М.: Наука, 1971.
16. Yian Tsachung, Kim Chang-Jin. Measurement of mechanical properties for MEMS materials // Meas. Sci. Technol. 1999. 10. P. 706–716.
17. D. Herman, M. Gaitan and DeVoe D. MEMS Test Structures for Mechanical Characterization of VLSI Thin Films // Proc. SEM Conference, Portland Oregon, June 4–6, 2001.
18. Балан Н. Н. Голографическая микрометрия подвижных элементов MEMS-структур // Микросистемная техника. 2003. № 12.
19. Wolf S., Tauber R. N. Silicon Processing for the VLSI Era Sunset Beach: Lattice Press. 1986. Vol. 1.
20. Sze S. M. VLSI Technology. New York: McGraw-Hill. 1988.
21. Vossen J. L. Thin Film Processes. New York: Academic Press. 1978.
22. Maisel L. I., Glang R. Handbook of Thin Film Technology. New York: McGraw-Hill. 1970.
23. Бахвалов Н. С., Панасенко Г. П. Осреднение процессов в периодических средах. М.: Наука, 1984.
24. Пшеничнов Г. И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластиноок. М.: Наука, 1982.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 531.715.1:681.787

Д. А. Усанов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. В. Скрипаль, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. С. Камышанский,
Саратовский Государственный Университет
им. Н. Г. Чернышевского

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО СПЕКТРУ АВТОДИННОГО СИГНАЛА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА НА КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ*

Исследована возможность применения лазерного автодиона на квантоворазмерных структурах для измерения скоростей нанометровых перемещений. Для обеспечения нормировки автодинного сигнала предложено возбуждать дополнительные механические колебания в объекте с амплитудой не менее половины длины волны лазерного излучения. Показано, что в этом случае скорость перемещения может быть определена по изменению набега фазы автодинного сигнала.

Введение

В настоящее время показана возможность практического применения автодинных систем на

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ в рамках программы "Фундаментальные научные исследования, выполняемые ведущими научно-педагогическими коллективами", код проекта 2.12.03.

квантоворазмерных структурах в различных областях науки и техники [1–5]. С их помощью, в частности, можно контролировать амплитуды и частоты нанометровых вибраций [6] объектов различной природы [7–8]. Представляет интерес исследование возможности применения полупроводникового лазерного автодиона для контроля движения объектов с малыми скоростями (десятки нанометров в секунду). Такие скорости реализуются, например, при тепловом расширении медленно нагреваемых объектов или объектов малой длины.

В настоящее время неизвестно применение автодионов для контроля медленно меняющихся процессов [9], что обусловлено особенностями регистрации фазы автодинного сигнала. Для регистрации фазы автодинного сигнала требуется либо предварительная калибровка для каждого объекта, либо обеспечение смещения объекта не меньшего, чем половина длины волны лазерного излучения. В то же самое время, когда, например, необходимо зарегистрировать тепловое расширение объекта, смещение может находиться в нанометровом диапазоне.

В связи с этим нами теоретически и экспериментально исследована возможность регистрации с помощью полупроводникового лазерного автодиона движения объектов с малыми скоростями, которые составляют единицы нанометров в секунду.

Формирование автодинного сигнала

Переменная нормированная составляющая автодинного сигнала при уровне внешней оптиче-

ской обратной связи, значительно меньшем единице, записывается в виде [10]

$$P = \cos(\omega_0\tau(t)), \quad (1)$$

где $\tau(t)$ — время обхода лазерным излучением расстояния L до внешнего отражателя; ω_0 — резонансная частота собственного резонатора лазерного диода без обратной связи. При движении внешнего отражателя время обхода лазерным излучением внешнего резонатора изменяется по закону

$$\tau_0(t) = \frac{2}{c} \left(L_0 + \int_0^t \vartheta(t') dt' \right), \quad (2)$$

где $\vartheta(t)$ — скорость движения отражателя; L_0 — длина внешнего резонатора в момент времени $t = 0$.

Для обеспечения нормировки автодинный сигнал делится на максимальное значение, которое достигается при изменении положения отражателя на величину, не меньшую половины длины волны лазерного излучения. Пронормировав автодинный сигнал, можно, используя соотношение (1), регулировать фазу автодинного сигнала при любом (в том числе нанометровом) смещении объекта и, следовательно, определять его скорость. В то же время хорошо отработаны и опробованы на практике методы решения обратных задач для случая, когда отражатель совершает периодические или, в частном случае, гармонические колебания [5]. Таким образом, если возбудить в объекте, скорость перемещения которого необходимо измерить, механические колебания, то для определения τ_0 , зависящего от искомой $\vartheta(t)$, можно применить уже апробированные спектральные методы решения соответствующей обратной задачи. При этом скорость изменения амплитуды возбуждаемых механических колебаний должна быть намного больше скорости перемещения объекта для того, чтобы при решении обратной задачи для каждого фиксированного интервала времени можно было измерить спектр колебаний, пренебрегая изменением τ_0 за счет медленного перемещения. Иными словами, колебательная система представляется в виде быстрой подсистемы, связанной со специально возбуждаемыми колебаниями, и медленной, связанной с нанометровыми перемещениями. При определении τ на каждом заданном интервале времени величину τ_0 можно считать постоянной, входящей в суммарное время τ как параметр.

Представим дополнительные колебания, накладываемые на объект, в виде гармонической составляющей колебаний внешнего отражателя:

$$f(t) = \xi \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad (3)$$

где ξ и Ω — амплитуда и частота колебаний внешнего отражателя лазерного излучения; ε — начальная фаза. Тогда время обхода излучением внешнего резонатора запишется в виде

$$\tau(t) = \tau_0(t) + \tau_a \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad (4)$$

где τ_0 — время обхода лазерным излучением внешнего резонатора с медленно движущимся отражателем; $\tau_a = 2\xi/c$ — амплитудное значение гармонического колебания внешнего отражателя [10].

С учетом (4) соотношение (1) для нормированной переменной составляющей автодинного сигнала запишется в виде

$$P(t) = \cos(\theta(t) + \sigma \sin(\Omega t + \varepsilon)), \quad (5)$$

где $\theta(t) = \omega_0\tau_0(t)$ — набег фазы автодинного сигнала; $\sigma = 4\pi\xi/\lambda$; λ — длина волны лазерного излучения.

Из соотношения (5) следует, что автодинный сигнал определяется двумя компонентами: медленно меняющейся фазой автодинного сигнала $\theta(t)$ и быстро меняющейся гармонической функцией $\sigma \sin(\Omega t + \varepsilon)$. Если для анализа автодинного сигнала (5) использовать набор ограниченных во времени участков сигнала (оконный метод [11]), то в пределах каждого участка ("окна") можно считать, что автодинный сигнал не зависит от медленно меняющейся компоненты $\theta(t)$. При таком предположении анализ сигнала сводится к определению фазы автодинного сигнала для гармонически колеблющегося объекта.

Спектральная обработка автодинного сигнала

При решении обратной задачи — определения набега фазы $\theta(t)$ по сигналу вида (5), для повышения точности может быть использовано спектральное представление автодинного сигнала [12, 13]. Соотношение для автодинного сигнала (5) можно представить в виде разложения в ряд по функциям Бесселя:

$$P(t) = \cos\theta J_0(\sigma) + 2 \cos\theta \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\sigma) \cos[2n\Omega t + \varepsilon] - \\ - 2 \sin\theta \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\sigma) \cos[(2n-1)\Omega t + \varepsilon], \quad (6)$$

где J_n — функция Бесселя порядка n ; n — номер гармоники спектральной составляющей автодинного сигнала.

Представим функцию $P(t)$ в виде разложения в ряд Фурье:

$$P(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos n\Omega t - b_n \sin n\Omega t\}, \quad (7)$$

где a_n и b_n — коэффициенты разложения в ряд Фурье. Сопоставив (6) и (7), можно ввести коэффициенты c_n следующим образом:

$$c_{2n} = 2J_{2n}(\sigma) \cos \theta = \begin{cases} a_{2n}/\cos(2n\epsilon), & |a_{2n}| > |b_{2n}|; \\ b_{2n}/\sin(2n\epsilon), & |a_{2n}| < |b_{2n}| \end{cases} \quad (8)$$

для четных номеров $2n$ и

$$\begin{aligned} c_{2n-1} &= 2J_{2n-1}(\sigma) \sin \theta = \\ &= \begin{cases} -a_{2n-1}/\sin((2n-1)\epsilon), & |a_{2n-1}| > |b_{2n-1}|; \\ b_{2n-1}/\cos((2n-1)\epsilon), & |a_{2n-1}| < |b_{2n-1}| \end{cases} \end{aligned}$$

для нечетных номеров $2n-1$, где значение ϵ находится из уравнений

$$\epsilon = \frac{1}{2n} \operatorname{arctg}(b_{2n}/a_{2n})$$

при использовании коэффициентов a_n и b_n с четными номерами из уравнения

$$\epsilon = \frac{1}{2n-1} \operatorname{arctg}(-a_{2n-1}/b_{2n-1}) \quad (9)$$

при использовании коэффициентов a_n и b_n с нечетными номерами. Коэффициенты c_{2n} и c_{2n-1} пропорциональны четным и нечетным спектральным составляющим сигнала, соответственно. Отметим, что они могут иметь как положительное, так и отрицательное значение в зависимости от значений σ и θ [10].

Используя рекуррентную связь для функций Бесселя, можно получить соотношение для вычисления амплитуды продольных колебаний объекта:

$$\xi^2 = \frac{\lambda^2}{\pi^2} \frac{6(c_n + c_{n+1})}{(c_n + c_{n+2})(c_{n-1} + c_{n+1})}. \quad (10)$$

Используя разложения $P(t)$ в ряды по функциям Бесселя и Фурье, можно вычислить набег фазы автодинного сигнала по четырем коэффициентам c_n с последовательными номерами n :

$$\theta_{2n} = \operatorname{arctg} \left[\sqrt{\frac{(2n+1)(c_{2n+3} + c_{2n+1})c_{2n+1}}{(2n-1)(c_{2n+2} + c_{2n})c_{2n+2}}} \right]; \quad (11)$$

$$\theta_{2n-1} = \operatorname{arctg} \left[\sqrt{\frac{(2n+1)(c_{2n+1} + c_{2n-1})c_{2n+1}}{2n(c_{2n+2} + c_{2n})c_{2n}}} \right]. \quad (12)$$

При этом соотношение (11) применяется, когда используются четыре коэффициента c_n , начиная с четного номера, а (12) — начиная с нечетного номера.

Перемещая по оси времени "окно" выбранного временного интервала, в пределах которого проводится анализ исходного сигнала, и вычисляя набег фазы автодинного сигнала для каждого "окна", можно получить медленно меняющуюся зависимость $\theta(t)$, из которой для известного времени выборки Δt определяется скорость движения объекта, усредненная в пределах интервала Δt :

$$\vartheta(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Delta\theta}{\Delta t}.$$

В случае движения объекта с постоянной скоростью зависимость фазы автодинного сигнала $\Delta\theta(t)$ от времени будет носить линейный характер.

Измерительная система

На рис. 1 приведена схема автодинной измерительной системы на полупроводниковом лазере. В качестве активного элемента автодинного генератора использовался лазерный диод RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с характеристиками: мощность излучения 5 мВт, длина волны 652 нм, пороговый ток 20 мА.

Излучение полупроводникового лазера 1, записываемого от источника тока 2, направлялось на отражатель 3, закрепленный на исследуемом образце 4. Медленное поступательное движение отражателя 3 осуществлялось в результате линейного теплового расширения образца 4, который нагревался от источника теплоты 5. Вibration отражателя реализовывалась пьезокерамикой из BaTiO_3 6, колебания которой возбуждались генератором звуковых колебаний 7. Температура образца фиксиру-

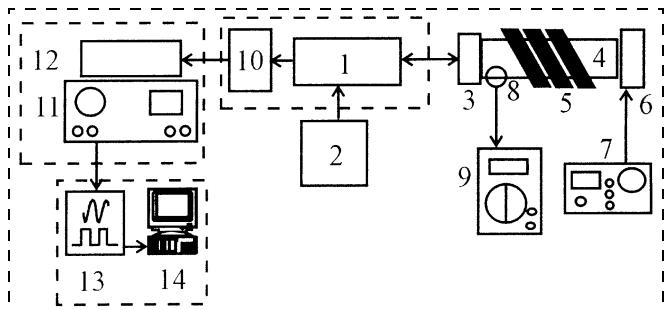


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — полупроводниковый лазер; 2 — источник тока; 3 — отражатель; 4 — исследуемый объект; 5 — нагревательный элемент; 6 — пьезокерамика; 7 — генератор звуковых колебаний; 8 — термопара; 9 — вольтметр; 10 — фотодетектор; 11 — усилитель; 12 — фильтр переменного сигнала; 13 — аналого-цифровой преобразователь; 14 — компьютер

валась термопарой 8 по показаниям вольтметра 9. Часть излучения, отраженного от объекта, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось фотодетектором 10. Вся оптическая часть установки размещалась на виброизолирующем основании, обеспечивающем гашение колебаний от внешних источников на частотах, превышающих 5 Гц. Сигнал с фотодетектора поступал через широкополосный усилитель 11, содержащий фильтр переменного сигнала 12, на вход аналого-цифрового преобразователя 13 компьютера 14.

Результаты измерений

На рис. 2 приведен автодинный сигнал, полученный при отражении лазерного излучения от отражателя, который поступательно двигался в результате линейного расширения нагреваемого образца и одновременно по гармоническому закону колебался на частоте, близкой к 100 Гц, под действием пьезокерамического возбудителя.

Для определения скорости движения объекта при решении обратной задачи необходимо в процессе измерений определять частоту Ω , амплитуду колебаний объекта ξ и набег фазы автодинного сигнала θ , которые рассчитывались по спектральным составляющим автодинного сигнала с использованием соотношений (10), (11) или (12). После регистрации автодинного сигнала его спектр получался с помощью быстрого "оконного" Фурье-преобразования. Как известно, для получения максимально точных значений амплитуд спектральных составляющих временной интервал обрабатываемых участков сигнала должен быть кратен периоду

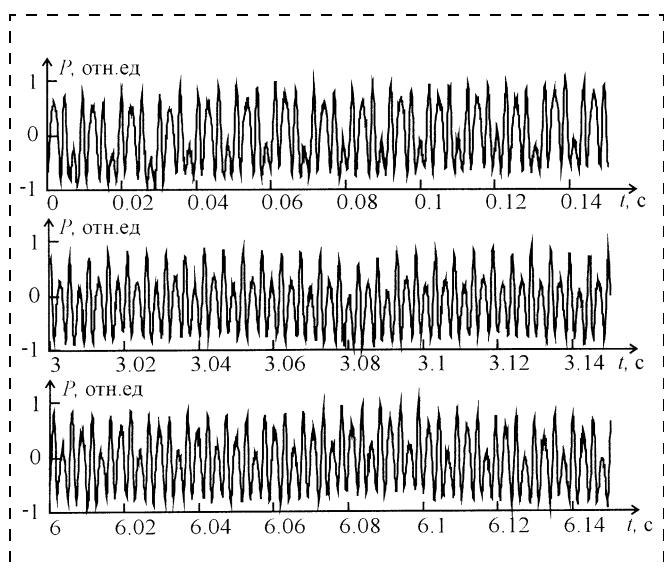


Рис. 2. Изменение вида автодинного сигнала, полученного при отражении излучения от линейно движущегося и гармонически колеблющегося объекта

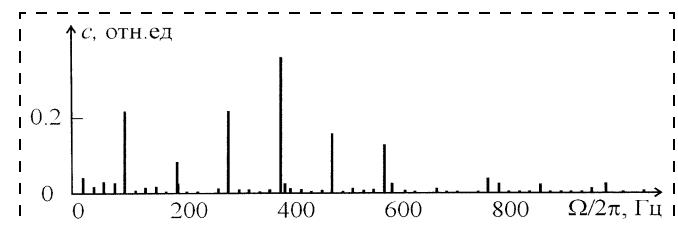


Рис. 3. Спектр окна сигнала длиной в пять периодов колебаний объекта

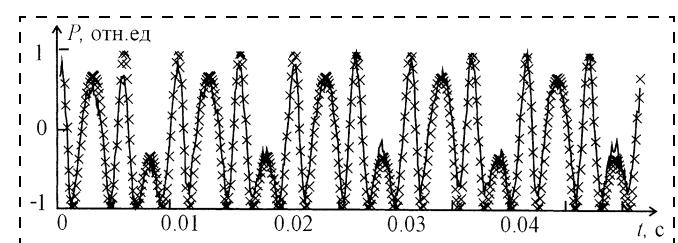


Рис. 4. Экспериментальный (исходный) и восстановленный сигналы (среднее квадратическое отклонение экспериментального сигнала от восстановленного равно 0,1):

— экспериментальный; ××× — восстановленный

анализируемого сигнала. Если пренебречь изменением формы автодинного сигнала в результате медленного поступательного движения отражателя в интервале окна, то период автодинного сигнала будет обратно пропорционален частоте основной гармоники и равен периоду продольных гармонических колебаний объекта. С учетом того, что, с одной стороны, временной интервал обрабатываемых участков сигнала должен быть мал, чтобы можно было предположить постоянство в нем набега фазы автодинного сигнала ($\theta = \text{const}$), а с другой стороны — достаточным для получения хорошего разрешения спектра, временной интервал был выбран равным пяти периодам колебаний объекта (0,05 с). На рис. 3 приведен спектр участка сигнала длительностью в пять периодов колебаний объекта.

По спектру, приведенному на рис. 3, рассчитывались частота Ω , амплитуда ξ колебаний объекта и набег фазы θ автодинного сигнала. После вычисления начальной фазы ε строился восстановленный автодинный сигнал в предположении $\theta = \text{const}$ на протяжении "окна". На рис. 4 приведен восстановленный таким образом автодинный сигнал в сравнении с измеренным.

Из автодинного сигнала формировались оконные участки длительностью 0,05 с путем перемещения по автодинному сигналу формирующего окна с шагом 0,01 с. Отметим, что образующееся в этом случае взаимное перекрытие обрабатываемых участков способствует повышению точности вычислений. В результате проведения анализа каждого из сформированных таким образом участков

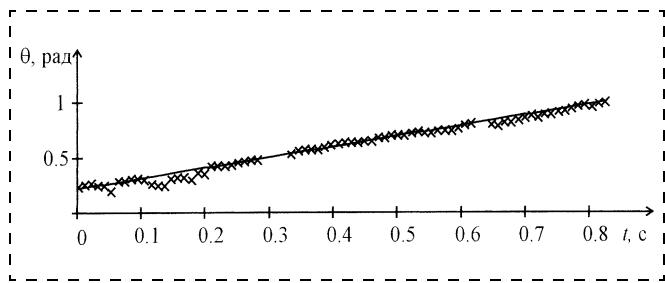


Рис. 5. Зависимость изменения набега фазы автодинного сигнала со временем при линейном движении объекта

была получена зависимость набега фазы автодинного сигнала от времени, приведенная на рис. 5.

Для повышения точности вычислений для каждого участка рассчитывалось среднее квадратическое отклонение восстановленного сигнала от измеренного. Значения набега фаз, для которых оно превышало 15 %, в дальнейших расчетах не учитывались.

Аппроксимируя полученную зависимость $\theta(t)$ и сравнивая аппроксимирующую функцию с теоретической зависимостью набега фазы автодинного сигнала, которая для случая $\vartheta = \text{const}$ имеет вид

$$\theta(t) = \frac{4\pi\vartheta}{\lambda} t + \frac{4\pi}{\lambda} L_0, \quad (13)$$

можно получить выражение для вычисления скорости движения отражателя с использованием аппроксимирующих коэффициентов. Экспериментально полученная зависимость $\theta(t)$, приведенная на рис. 5, аппроксимируется функцией прямой линии вида

$$\theta(t) = at + b, \quad (14)$$

где a и b — аппроксимирующие коэффициенты.

Сопоставляя соотношения (13) и (14), получаем соотношение для вычисления скорости движения отражателя:

$$\vartheta = \frac{a\lambda}{4\pi}. \quad (15)$$

Скорость теплового расширения объекта, вычисленная по зависимости изменения набега фазы

автодинного сигнала со временем, приведенной на рис. 2, с использованием соотношения (15) составила 50 нм/с.

* * *

Таким образом, показано, что с помощью квантоворазмерного полупроводникового лазера, работающего в режиме автодинного генератора, возможно контролировать движение объектов с малыми скоростями при условии возбуждения в измеряемом объекте колебаний с амплитудой, большей половины длины волны лазерного излучения.

Список литературы

1. Быковский Ю. А., Дедушенко К. Б., Зверьков М. В., Мамаев А. Н. Инжекционный квантоворазмерный лазер с внешней оптической обратной связью // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 7. С. 657—661.
2. Donati S., Giuliani G., Merlo S. Laser diode feedback interferometer for measurements of displacements without ambiguity // IEEE J. Quantum Electron. 1995. Vol. 31. N 1. P. 113—119.
3. Merlo S., Donati S. Reconstruction of displacement waveforms with a single channel laser diode feedback interferometer // IEEE J. Quantum Electron. 1995. Vol. 33. N 4. P. 527—531.
4. Nowakowski J., Simuoli V., Elbaum M. Fundamental limits on range and velocity resolution for autodyne detection of two point target // Signal and data processing of small targets. 1990.
5. Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Щукин В. А., Копьев П. С., Алферов Ж. И., Бимберг Д. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры // Физика и техника полупроводников, 1998. Т. 32, № 4. С. 385—410.
6. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме // Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С. 51—57.
7. Skripal A. V., Usanov D. A. Semiconductor laser interferometry of eye movements // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3908. P. 7—12.
8. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Вагарин А. Ю. и др. Лазерная автодинная интерферометрия динамических параметров биообъектов // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 5. С. 39—43.
9. Shimizu E. T. Directional discrimination in the self-mixing type laser Doppler velocimeter // Appl. Opt. 1987. Vol. 26. P. 4541—4544.
10. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение микро- и нановибраций в объектах биомедицины // Изв. Вузов. Электроника. 2003. № 2. С. 84—90.
11. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: Солон-Р, 2002. 448 с.
12. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Вагарин В. А., Васильев М. Р. Оптические гомодинные методы измерений // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 6. С. 43—48.
13. Короневич В. П., Соболев В. С., Дубинцев Ю. Н. Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983. 212 с.

ННОНДОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 389.159

П. А. Тодуа¹, В. А. Быков², Ч. П. Волк³,
Е. С. Горнев³, Ж. Желкобаев¹, Л. М. Зыкин,
А. Б. Ишанов, В. В. Календин¹,
Ю. А. Новиков⁴, Ю. В. Озерин³,

Ю. И. Плотников³, А. М. Прохоров¹,

А. В. Раков⁴, С. А. Саунин², В. Н. Черняков¹

¹ФГУП "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума"
Госстандарт России, Москва.

²ЗАО "НТ-МДТ", Зеленоград.

³ОАО "НИИ молекулярной электроники и завод "Микрон", Зеленоград.

⁴Центр естественно-научных исследований
Института общей физики им. А. М. Прохорова
РАН, Москва

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИНЫ В МИКРОМЕТРОВОМ И НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ И НАНОТЕХНОЛОГИЮ

ЧАСТЬ II*

Представлены основы метрологического обеспечения измерений, включая методы и средства воспроизведения и передачи размера единицы длины в указанном диапазоне с абсолютной привязкой к государственному первичному эталону единицы длины — метру, основанные на методах сканирующей зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии — фазометрии. Разработана технология и созданы трехмерные меры микро-, нанорельефа поверхности, обеспечивающие не только калибровку зондовых микроскопов (сканирующих туннельных, атомно-силовых, растровых электронных) — основных средств линейных измерений в указанном диапазоне, но и подтверждающие достоверность результатов измерения размеров реальных объектов. Созданы алгоритмы и пакет программ, позволяющие реализовать автоматизированное трехмерное измерение рельефа поверхности конденсированных сред.

* Продолжение. Начало см. в № 1, 2004 г.

Задачи в области метрологического обеспечения линейных измерений в диапазоне 1...1000 нм

1. Основные задачи по созданию метрологического обеспечения линейных измерений в диапазоне 1...1000 нм

Одной из важнейших задач развития наукоемких технологий является разработка новых методов и высокоточных средств измерений длины в нанометровом диапазоне. Достижение предельных возможностей при измерениях длины в этом диапазоне связано с использованием высокоразрешающих методов сканирующей зондовой микроскопии: растровой оптической, растровой электронной, сканирующей туннельной и атомно-силовой в сочетании с лазерной интерферометрией и фазометрией.

Основная проблема измерений длины в указанном диапазоне связана с недостаточно исследованными соотношениями между объектом измерений и его изображением в упомянутых выше измерительных микроскопах, работающих на различных физических принципах. Эта проблема имеет фундаментальный характер и усугубляется сложной природой взаимодействия измерительного инструмента с объектом измерений.

Проблема создания метрологического обеспечения линейных измерений в диапазоне 1...1000 нм включает в себя необходимость решения следующих задач:

- разработка концепции метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1...1000 нм;
- создание прецизионной технологии изготовления специальных тест-объектов и стандартных образцов с различными вариантами топографии поверхности и размерами структурных элементов 1...1000 нм, методов и средств их калибровки;
- разработка методов лазерной интерферометрии и фазометрии для создания высокоточных средств измерений линейных наноперемещений, сверхпрецзионных систем микропозиционирования тест-объектов с разрешением 0,1 нм в реальном масштабе времени;
- создание эталонных средств воспроизведения и передачи единицы длины в нанометровом диапазоне на основе сканирующей зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии;
- разработка физических моделей взаимодействия измерительных средств с тест-объектами и

интерпретация результатов измерений с учетом влияющих на них факторов, позволяющих решить проблему, связанную с локализацией края измеряемого элемента.

Переход к линейным измерениям в нанометровом диапазоне связан с трудностями интерферометрических измерений малых перемещений на расстояния, много меньшие длины волны света лазерного источника, при сохранении возможности абсолютной привязки к государственному первичному эталону (ГПЭ) метра. Одним из перспективных решений в этом направлении являлось создание и внедрение в практику линейных измерений методов и средств лазерной фазометрии, позволяющих определить изменение разности фаз — угла фазового сдвига (УФС) в интерференционном поле между измерительным и опорным пучками света.

В связи с этим, одной из важнейших задач разработки метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом (1...1000 нм) диапазоне являлась задача создания высокоточного лазерного измерителя линейных перемещений, в котором эти перемещения измеряются методом их сравнения с длиной волны Не—Не-лазера с использованием эталонных средств измерения угла фазового сдвига.

Эта задача была успешно решена специалистами Федерального государственного унитарного предприятия "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума" (ФГУП НИЦПВ) Госстандарта России. Разработанный ими метод измерения перемещений в диапазоне 1...1000 нм и созданная для таких измерений эталонная установка рассмотрены в следующей главе.

Второй важнейшей задачей метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне являлась разработка конструкции и технологии изготовления стандартных образцов — мер с заданным профилем элементов рельефа, позволяющих резко уменьшить многоступенчатость передачи единицы длины от ГПЭ-метра к рабочим средствам измерений.

Эту задачу решили специалисты Центра естественно-научных исследований Института общей физики РАН (ЦЕНИ ИОФ РАН) и ОАО "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод "Микрон" (ОАО НИИМЭ и Микрон), используя особенности анизотропного травления кремния относительно его кристалло-графических плоскостей. Ими была реализована технология, в процессах которой на поверхности кремния создавались шаговые структуры с элементами рельефа, имеющими профиль трапециевидной формы. Указанная шаговая структура на поверхности кремния послужила прототипом специальной меры ширины линии, описание которой

будет представлено в следующей главе. Основными характеристиками такой меры являются шаг между элементами рельефной структуры и заданная геометрия формы профиля элементов, связанная с расположением кристаллографических плоскостей (100) и (111) кремния. Принципиальным отличием этой меры от известных зарубежных мер является возможность измерения с ее помощью в одном эксперименте увеличения растрового электронного микроскопа и размера его электронного зонда.

2. Концепция линейных измерений единичного элемента рельефа поверхности

В мировой практике задача измерения ширины одного элемента (ширины линии) до настоящего времени находится в стадии обсуждения выбора алгоритма измерений [10], поскольку форма кривой регистрируемого сигнала растрового электронного или атомно-силового микроскопов не адекватна форме профиля измеряемого элемента. Для решения этой задачи, являющейся первостепенной в технологии производства сверхбольших интегральных микросхем, необходимо установить функциональную связь между параметрами регистрируемой кривой сигнала отклика измерительного устройства и параметрами профиля измеряемого элемента, учитываящую влияние формы и размера зонда на регистрируемый сигнал.

Следует оговорить понятие "ширина линии" (ширина элемента), так как это понятие связано с формой профиля элемента. В зарубежных технических публикациях наиболее часто встречается понятие "критический размер" (*critical dimension*), под которым подразумевается только один отрезок, характеризующий геометрию элемента. Однако это справедливо только для элементов, которые имеют боковые стенки, практически совпадающие по направлениям с вертикалью к плоскости основания элемента (квазипрямоугольный профиль). В технологии СБИС наиболее распространеными элементами являются элементы с трапециевидным профилем и углами наклона их боковых стенок относительно плоскости нижнего основания в 80...87° (рис. 1). Поэтому необходимо рассматривать геометрическую модель элемента СБИС с профилем в виде трапеции, параметрами которого являются размеры его верхнего и нижнего оснований и углы наклона боковых граней относительно плоскости основания элемента (или размер проекции боковых граней на плоскость нижнего основания). Отметим, что прямоугольный профиль является частным случаем трапециевидного профиля.

В настоящее время в мировой практике о размере элемента рельефа судят по расстоянию между точками видеосигнала растрового электронного

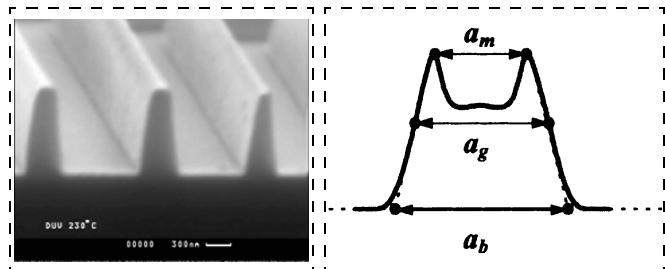


Рис. 1. Изображения реальной структуры в РЭМ

Рис. 2. Схема сигнала, получаемого на РЭМ при сканировании рельефа в виде выступа

микроскопа, выбранными в соответствии с традициями, используемыми на данной конкретной фирме-изготовителе микросхем. Все их можно разделить на три группы:

- 1) точки, соответствующие реально наблюдаемым особенностям сигнала (например, максимумам);
- 2) точки, соответствующие изломам линий аппроксимирующих отдельные части сигнала;
- 3) точки, лежащие на определенном уровне сигнала.

На рис. 2 приведена схема сигнала РЭМ, получаемого при сканировании одиночного выступа, поясняющая эти группы. Расстояние a_m относится к первой группе, a_b — ко второй, а a_g — к третьей.

В работах специалистов Национального института стандартов и технологий (NIST) США [21, 22] рекомендуется использовать принятый ими без каких-либо разъяснений алгоритм измерений, согласно которому измеряемый размер элемента приравнивается к длине отрезка a_g между двумя точками кривой видеосигнала, соответствующими выбранному 40 %-ному уровню сигнала, хотя было отмечено, что такой алгоритм избран произвольно с целью обеспечения сопоставимости данных [22].

Основными недостатками такой схемы являются зависимость измеряемого расстояния от условий эксперимента [21, 23] (диаметра зонда, энергии электронов и др.) и абсолютная неясность какому размеру реального элемента структуры соответствует измеренный размер.

Специалисты Национальной исследовательской метрологической лаборатории Японии предлагают определять размер рельефного трапециевидного элемента по расстоянию a_m между максимумами кривой видеосигнала, зарегистрированной в режиме сбора детектором вторичных медленных электронов [24]. По их мнению, такой размер соответствует отрезку сечения профиля элемента, отстоящему от поверхности структуры на четверть размера наклонной стенки элемента.

Специалистами японской фирмы "Toshiba Corporation" предложен алгоритм, названный ими "ме-

тодом линейной регрессии". За размер элемента в этом методе принимается размер a_b нижнего основания видеосигнала, который японские специалисты приравнивают к размеру основания трапециевидного элемента [25].

Основными недостатками этих методов являются их полная научная необоснованность [8] и зависимость результатов от условий эксперимента [23] (диаметра зонда, энергии электронов и других параметров РЭМ).

Сравнение результатов измерений одного и того же элемента по перечисленным алгоритмам показывает существенную разницу в определяемом значении: для первого алгоритма — 91 нм; для второго алгоритма — 111 нм и для третьего алгоритма — 126 нм [26]. Такие результаты указывают на несовершенство предложенных алгоритмов и на неоднозначность определяемых по ним значений.

Специалисты NIST подчеркивают это несовершенство имеющихся алгоритмов [10] и ставят задачу создания стандарта ширины линии, опирающегося на результаты моделирования видеосигнала (ВС) с учетом влияния всевозможных физических механизмов на форму кривой ВС. В работе [10] описывается прототип конструкции такого стандарта, которая содержит набор шаговых структур с вариацией шага от 0,1 до 1,0 мкм. Предложенная конструкция должна позволить измерять ширину одного и того же элемента (выступа) в окружении соседних элементов и без такого окружения (одиночный выступ), что достигается путем увеличения длины среднего выступа шаговой структуры. К сожалению, в упомянутых работах не демонстрируются кривые ВС от таких структур. Однако подобные структуры исследовались специалистами PTB (Национальный метрологический институт Германии) на электронно-оптической метрологической системе (EOMS) [13], где указывалось на различие размеров одного одиночного выступа и этого же выступа, находящегося в группе. Однако в этой работе не приводится детального анализа формы кривых ВС и не указываются расчетные формулы, по которым получены приводимые размеры.

В результате фундаментальных исследований взаимодействия электронов с рельефной поверхностью [27] учеными ЦЕНИ ИОФ РАН была предложена геометрическая модель элемента СБИС и разработаны принципиально новые алгоритмы измерения параметров профиля таких элементов, подробное описание которых будет приведено в следующем разделе. Следует отметить, что указанные алгоритмы важны для контроля процессов анизотропного плазмохимического травления конструкционных слоев СБИС, так как они позволяют

измерить разность размеров нижнего и верхнего оснований элемента, характеризующую степень анизотропии процесса травления.

Реализация метрологического обеспечения линейных измерений в диапазоне 1...1000 нм

1. Лазерная интерференционная система измерений наноперемещений

В Федеральном государственном унитарном предприятии "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума" (ФГУП НИЦПВ) Госстандарта России создана и аттестована лазерная интерферометрическая измерительная система наноперемещений [28], реализующая фазовые методы прецизионных измерений линейных перемещений в оптическом диапазоне на расстояния, в том числе меньшие длины волн лазерного источника света (ЛИИС-НП).

Принцип действия ЛИИС-НП основан на двойном преобразовании частоты оптической несущей в опорном и сигнальном каналах интерферометра с помощью акустооптических модуляторов (АОМ) и последующем выделении сигнала разностной частоты в радиодиапазоне с фазовой обработкой измерительной информации в реальном масштабе времени. В состав ЛИИС-НП входят:

- стабилизированный одночастотный гелий-неоновый лазер;
- лазерный интерференционный гетеродинный преобразователь;
- электронно-фазометрическая система (ЭФС);
- генераторный блок (ГБ);
- система сбора и обработки данных (СОД) на основе персонального компьютера и интерфейсных плат.

На рис. 3 приведена структурная схема системы ЛИИС-НП. Она содержит одночастотный Не-Не лазер ЛГН-303, который обеспечивает стабилизированное по частоте ($\Delta\nu/\nu \approx 10^{-8}$) и мощности оптическое излучение с длиной волны 632,9 нм. Лазер оптически связан с АОМ, сориентированным под углом Брэгга ϕ_B ; электрический вход АОМ через высокоточный калибратор фазы (КФВ) подключен к генератору, осуществляющему модуляцию высокочастотным сигналом непрерывного лазерного излучения, проходящего через модулятор (фазовая дифракционная решетка). Выход АОМ оптически связан с интерферометром, что обеспечивает совмещение отраженных от задатчика наноперемещений интерферирующих пучков в плоскости фоточувствительного слоя фотоприемника, на выходе которого выделяется электрический сигнал разностной частоты. Генераторный блок связан

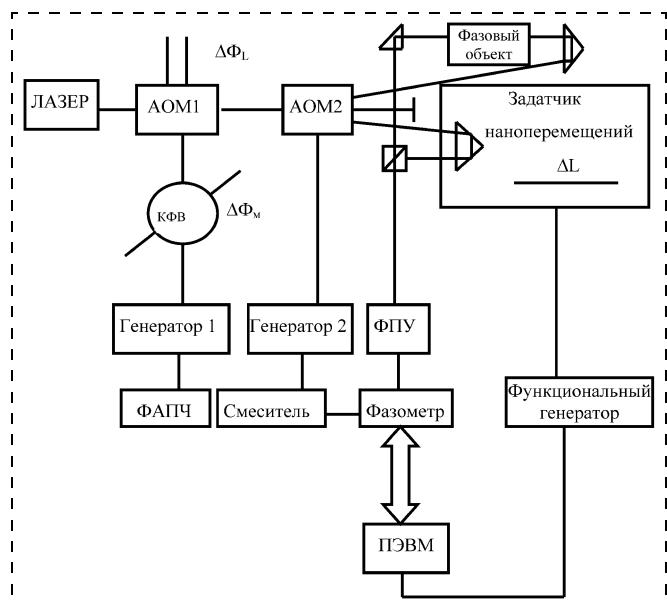


Рис. 3. Структурная схема системы ЛИИС-НП

электрически с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с опорным входом высокоточного цифрового следящего фазометра, измерительный вход которого подключен к фотоприемному устройству (ФПУ) для выделения информационного сигнала. Выход фазометра сопряжен с компьютером для последующей обработки результатов измерений.

Акустооптические модуляторы предназначены для выделения первых порядков дифракции при работе их в режиме Брэгга и управления мощностью излучения в каналах интерферометра. Фотоприемное устройство служит для выделения, усиления, преобразования информационного сигнала и его передачи в электронно-фазометрическую систему. Высокочастотные генераторы предназначены для обеспечения управления параметрами АОМ и выдачи с электрического смесителя опорного сигнала разностной частоты 1,0 МГц. Электронно-фазометрическая система обеспечивает измерение угла фазового сдвига (УФС) между электрическими сигналами в диапазоне $0\dots360^\circ N$ ($N = 10^5$, где N — число фазовых циклов) в полосе частот 20 Гц...2,0 МГц с погрешностью не более $0,1^\circ$ фазы. Система обработки данных составлена по стандартной схеме, позволяющей оцифровать аналоговый сигнал и через интерфейс ввести цифровую информацию в процессор для последующей обработки.

Конструктивно ЛИИС-НП выполнен в виде отдельного термостабильного малогабаритного оптико-механического моноблока-интерферометра на основе ситалла.

Исследования стабильности ЛИИС-НП показали, что скорость дрейфа лазерного гетеродинного интерферометра не превышает 10^{-2} градуса фазы за 1 мин, что соответствует чувствительности к линейным смещениям на уровне 0,01 нм. Отличительной особенностью данной лазерной измерительной системы является простота оптической схемы, легкость ее юстировки, малые габаритные размеры, быстродействие, помехозащищенность и надежность, обусловленные фазовыми методами обработки информационного сигнала.

В ФГУП НИЦПВ разработан и реализован принципиально новый метод аттестации лазерных интерференционных измерителей перемещений в диапазоне $10^{-9} \dots 10^{-3}$ м, основанный на сравнении измеряемого угла фазового сдвига (УФС) непрерывного лазерного излучения в диапазоне $0 \dots 360^\circ N$ ($N = 10^5$, где N — число фазовых циклов) с калиброванным задаваемым эталонными фазовращателями УФС как в радио-, так и в оптическом диапазонах с погрешностью $0,1^\circ$ фазы, что соответствует дискретности отсчета линейного перемещения менее 0,1 нм (1 Å).

Применение в составе радиооптического фазового компаратора высокоточного цифрового фазометра позволило создать замкнутое "фазовое кольцо" по электрическому сигналу радиочастоты, обеспечивающее прецизионное измерение, задание и регулирование УФС как в радио-, так и в оптическом диапазонах. При этом материализованной мерой УФС в оптическом диапазоне служит акустооптический модулятор. Исследования метрологических характеристик радиооптического фазового компаратора показали, что точность измерения и регулирования УФС в оптическом диапазоне составляет $0,05^\circ$ фазы, что соответствует линейному перемещению 0,5 Å (0,05 нм).

Для подтверждения достоверности измерений малых (порядка 0,1 нм) перемещений были проведены совместные измерения перемещений стандартного образца атомарно чистой поверхности высоко ориентированного пирографита (рис. 4) методами лазерной интерферометрии-фазометрии и сканирующей туннельной микроскопии. Было определено межатомное расстояние, равное 0,24 нм, что соответствует постоянной кристаллической решетки пирографита; тем самым впервые осуществлена привязка параметра кристаллографической решетки к длине волны стабилизированного Не-Не лазера.

2. Эталонная интерференционная установка на основе сканирующего зондового микроскопа

Эталонная установка представляет собой комплекс средств измерений [28], предназначенный для передачи размера единицы длины в диапазоне

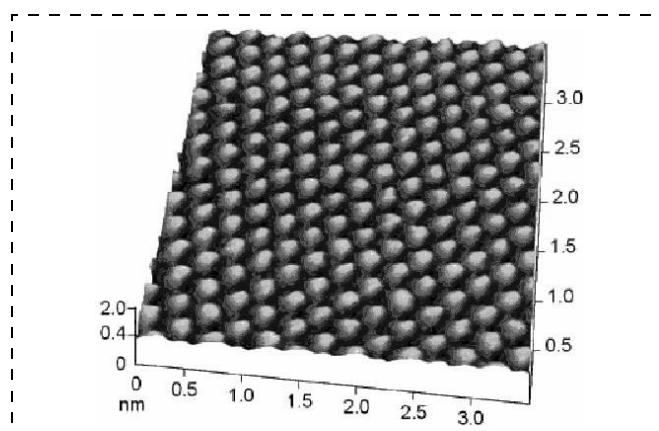


Рис. 4. АСМ изображение атомарно-гладкой поверхности, выполненной в виде скола (0001) высоко ориентированного пирографита

1...1000 нм в соответствии с разрабатываемой Государственной поверочной схемой для средств измерений длины в нанометровом диапазоне. В состав эталонной установки входят:

- сканирующий зондовый микроскоп;
- двухкоординатная (по X и Y) система микропреремещений измеряемого образца;
- пьезосканер по координате Z ;
- лазерные интерферометрические измерители линейных перемещений по координатам X , Y , Z , описанные выше;
- управляющая электронная система;
- система сбора и обработки данных (СОД) и управления режимами работы установки на базе персонального компьютера;
- набор специальных мер малых длин и стандартных образцов нанорельефа на поверхности кремния.

Основная часть аппаратурного комплекса эталонной установки размещена на отдельном виброизолированном основании. Внешний вид установки представлен на рис. 5.

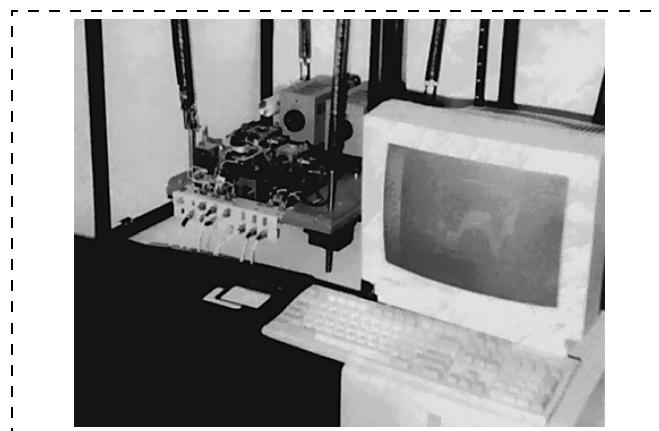


Рис. 5. Внешний вид эталонной интерференционной установки

Сканирующий зондовый микроскоп предназначен для визуализации с высоким разрешением аттестуемых мер малой длины при сканировании последних в режиме контактной и неконтактной мод. Аттестуемая мера на держателе вставляется в пружинный механизм, расположенный в трубчатой пьезокерамике, которая закреплена на верхнем столике системы микроперемещений мер. В качестве зонда в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) используется вольфрамовая проволочка диаметром 0,3 мм, острье которой заточено с помощью электрохимического травления. Радиус закругления кончика иглы не более 100 нм. Кантилевер (микрозонд) атомно-силового микроскопа (АСМ) крепится к металлической пластине пьезосканера узла микроскопа. Резонансная частота кантилевера составляет 50 кГц. На электроды пьезокерамики подается пилообразное напряжение для шагового движения образца и обратной связи для поддержания постоянного расстояния между зондом и образцом.

Двухкоординатная (по X и Y) система микроперемещений аттестуемых мер состоит из двух столиков, расположенных один над другим и развернутых на 90° относительно друг друга с точностью угловых мер. На нижнем столике располагается объект измерений — мера, на верхнем — микрозонд. Измеряемый объект может смещаться в направлении X , а микрозонд — в направлении Y . Такая конструкция обеспечивает компактность и максимальную развязку по X и Y направлениям.

Смещение остряя микрозонда вдоль нормали к поверхности образца (по оси Z) осуществляется с использованием пьезосканера, обеспечивающего микропозиционирование зонда в диапазоне 0...1 мкм с шагом 0,1 нм. Калибровка пьезосканера проводится интерферометрически с использованием лазерной интерференционной измерительной системы по координате Z .

Система сбора, обработки данных и управления режимами работы установки (СОД) состоит из персонального компьютера и интерфейсной платы аналого-цифрового преобразователя L-202.

В состав набора специальных мер малых длин и стандартных образцов нанорельефа поверхности объекта входят:

- периодическая мера (МП-ГР) с номинальным значением периода 400 нм, выполненная на основе голограммической решетки на поверхности кремния с синусоидальным профилем;
- мера ширины и периода специальная МШПС-2.0К, выполненная в виде рельефной шаговой структуры на поверхности кремния с использованием технологии анизотропного травления относительно его кристаллографических плоскостей (100) и (111);

- набор мер с рельефом в виде ступеней с номинальными значениями 30, 100, 300 и 600 нм;
- стандартный образец атомарно-гладкой поверхности (СОАП-П), выполненный в виде скола (0001) высоко ориентированного пирографита.

Погрешность измерений на эталонной установке, выраженная в виде среднего квадратического отклонения результатов измерений специальных периодических мер сравнения, не превышает 0,5 нм в диапазоне 1...1000 нм при неисключенной систематической погрешности 0,9 нм.

3. Установка высшей точности на основе растрового электронного микроскопа

В основу работы установки высшей точности для линейных измерений в диапазоне 1...1000 нм на основе растрового электронного микроскопа положен метод сличения (компариования) измеряемого объекта с эталоном сравнения — государственным стандартным образцом для рastровой электронной микроскопии ГСО6261-91, аттестованным независимым способом с высокой точностью на эталонной интерференционной установке на основе сканирующего зондового микроскопа, описанного в разд. 2. Внешний вид установки высшей точности на основе растрового электронного микроскопа представлен на рис. 6.

В состав установки входят:

растровый электронный микроскоп SEM-515, предназначенный для визуализации измеряемых объектов и получения видеосигнала во вторичных медленных электронах;

система обработки данных (СОД), позволяющая оцифровать аналоговый видеосигнал и через интерфейс вводить измерительную информацию в персональный компьютер для последующей обработки;



Рис. 6. Внешний вид установки высшей точности на основе растрового электронного микроскопа

государственный стандартный образец микрорельефа поверхности ГСО 6291-91, предназначенный для калибровки увеличения и определения разрешающей способности РЭМ, и набор периодических мер и мер ширины линии на полупроводниковой пластине для диапазона 0,1...20 мкм.

Базовый растровый электронный микроскоп SEM-515 — серийный прибор, выпускаемый фирмой *Philips* (Нидерланды), обладает свойствами, удовлетворяющими требованиям промышленности выполнять измерения на различных материалах (диэлектриках, полупроводниках и металлах) с минимальными (неразрушающими) воздействиями первичного электронного пучка на объект. Базовый РЭМ обладает высокой разрешающей способностью, что позволяет визуализировать субмикрометровые элементы рельефа поверхности измеряемого объекта.

Система обработки данных (СОД) установки состоит из персонального компьютера, нестандартной платы АЦП и специально разработанного программного обеспечения, предназначенного для работы всего комплекса. Прототипом указанного программного обеспечения является программное обеспечение линейных измерений, предусмотренное в электронном блоке *Link Systems AN 10000* (Великобритания). В отличие от указанной системы в используемой СОД для уменьшения уровня шумов предусмотрена фильтрация видеосигнала.

Используемый в установке государственный стандартный образец ГСО 6261-91 (РЭМ-изображение образца приведено на рис. 7), предназначенный для калибровки увеличения базового РЭМ и определения его разрешающей способности, выполнен в виде периодической рельефной структуры фоторезистового слоя на поверхности кремниевой подложки — голограммической решетки с периодом в диапазоне 0,39...2,01 мкм. Рельефная структура покрыта либо тонким слоем золота (для РЭМ), либо слоем углерода (для калибровки СТМ). Абсолютная погрешность измерений периода не превышает 1 нм.

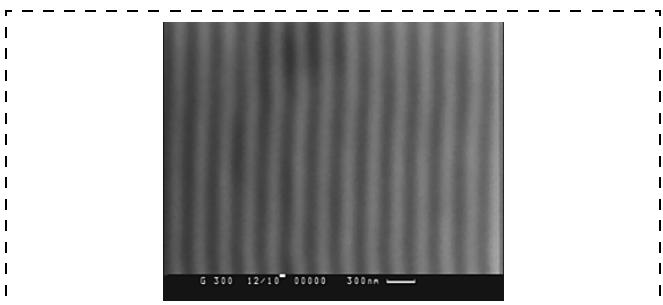


Рис. 7. Изображение в РЭМ образца ГСО 6261-91, выполненного в виде голограммической решетки — периодической рельефной структуры на поверхности кремниевой подложки

Таблица 1

Сличение результатов измерения шага одной и той же пары элементов меры МШПС-2.0К на эталонной интерферометрической установке (ЭИУ) на основе сканирующего зондового микроскопа и на установке высшей точности (УВТ) на основе РЭМ (σ — погрешность измерений в нанометрах)

| № образцов | Средний шаг, нм | |
|------------|-----------------------|-----------------------|
| | ЭИУ | УВТ |
| 4 | 2002 ($\sigma = 4$) | 2002 ($\sigma = 6$) |
| 5 | 2002 ($\sigma = 6$) | 2003 ($\sigma = 9$) |
| 6 | 2001 ($\sigma = 6$) | 2003 ($\sigma = 8$) |
| 7 | 2002 ($\sigma = 3$) | 1994 ($\sigma = 5$) |

Проведенные оценки случайной и не исключенной систематической погрешностей показали следующие результаты. Случайная погрешность, выраженная в виде среднего квадратичного отклонения результатов измерений периодических мер, не превышает 3 нм. Систематические относительные погрешности вследствие дрейфа фокусировки РЭМ составляют не более 10^{-3} , дрейфа увеличения РЭМ — не более $3 \cdot 10^{-4}$, нелинейности строчной развертки РЭМ — не более 10^{-3} , конечности диаметра электронного зонда — не более 4 нм.

Для демонстрации точности измерений линейных размеров на описываемой установке были выполнены сличения измерений шага одной и той же пары элементов меры МШПС-2.0К, проведенные на этой установке и на эталонной интерферометрической, описание которой изложено в разд. 2. Результаты этих сличений представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что в пределах погрешности измерений результаты совпадают.

4. Выбор алгоритмов линейных измерений на РЭМ в диапазоне 1...1000 нм. Физические основы и модели

Наиболее сложной проблемой РЭМ измерений линейных размеров элементов микрорельефа поверхности твердого тела является проблема выбора алгоритма процедуры измерений. Трудности здесь возникают из-за несовпадения реальной формы профиля рельефа измеряемого элемента и формы регистрируемой кривой видеосигнала (ВС), получаемого при сканировании этого элемента зондом растрового электронного микроскопа. На путях решения этой проблемы нет единства и по сей день. Отсутствует даже строгое определение понятия размера элемента. В технологии производства СБИС элементы формируемой на полупроводниковой пластине микросхемы имеют, как правило, профиль, близкий к трапециевидной форме (см. рис. 1). В этом случае следует говорить о размерах верхнего и нижнего оснований такого элемента рельефа.

Специалистами Центра естественно-научных исследований Института общей физики Российской Академии наук (ЦЕНИ ИОФ РАН) эта проблема была решена. Суть этого решения заключается в следующем. **На сигнале выбираются любые точки, но только те, которые физически связаны с особенностями исследуемой структуры.** Для этого с 1989 г. в Институте общей физики Академии наук СССР проводились фундаментальные исследования взаимодействия электронов с рельефной поверхностью [27, 29, 30]. Эти исследования начались после того, как совместными усилиями специалистов Института общей физики и НИИ молекулярной электроники были созданы рельефные прямоугольные структуры (РПС), имеющие одиночные канавки с прямоугольным профилем и точно известными размерами ширины элемента [29]. Было изготовлено четыре набора таких структур с разной шириной канавок. Пример одной из таких структур показан на рис. 8, а в табл. 2 приведены значения ширины канавок и погрешностей их аттестации.

Необходимо отметить, что аналогичная структура, по аналогичной технологии и в то же самое время была создана в Национальном институте стандартов и технологий (NIST, США). Однако фундаментальные исследования проводились только в СССР (впоследствии в России). В результате таких исследований был обнаружен [31] и исследован [27] новый механизм генерации вторичных медленных электронов, особенности которого позволили установить связь между характеристиками сигнала РЭМ и профиля исследуемого элемента.

Согласно результатам фундаментальных исследований все структуры, используемые в микрэлектронике, можно разделить по форме профиля элемента на три группы:

- прямоугольные;
- трапециевидные с малыми углами наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности;

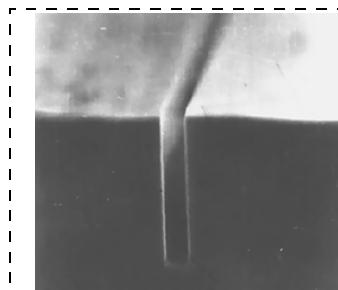


Рис. 8. Микрофотография скола щелевидной канавки РПС с шириной 150,7 нм и глубиной 850 нм, выполненная на РЭМ S-806

Таблица 2
Значения ширины канавок РПС и погрешности их аттестации

| № набора | Ширина канавок, нм |
|----------|--------------------|
| 1 | 98,8 ± 0,4 |
| 2 | 150,7 ± 0,3 |
| 3 | 369,7 ± 0,8 |
| 4 | 434,7 ± 0,8 |

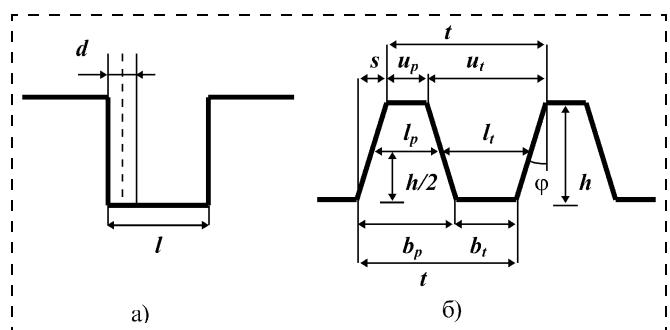


Рис. 9. Схемы щелевидной канавки РПС (а) и трапециевидной структуры (б) с определяемыми параметрами этих структур

- трапециевидные с большими углами наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности.

Параметры прямоугольной и трапециевидной структур приведены на рис. 9.

Прямоугольные структуры. Прямоугольной структурой является такая структура, у которой угол наклона боковой стенки относительно нормали к поверхности образца меньше угла расходимости электронного пучка (угол расходимости зонда составляет порядка нескольких миллирадиан). Схема прямоугольной щелевидной структуры показана на рис. 9, а форма реального видеосигнала приведена на рис. 10.

В результате фундаментальных исследований [27] было установлено, что ширину щели l можно определить с помощью выражений

$$l = B/M + d, \quad (1)$$

$$l = L/M - 2\delta, \quad (2)$$

где L и B — параметры видеосигнала (рис. 10, б); M — увеличение микроскопа; d — диаметр его зонда, а δ — сдвиг максимума сигнала относительно стенки канавки, который определяется углом ϕ_d сходимости-расходимости электронного зонда РЭМ

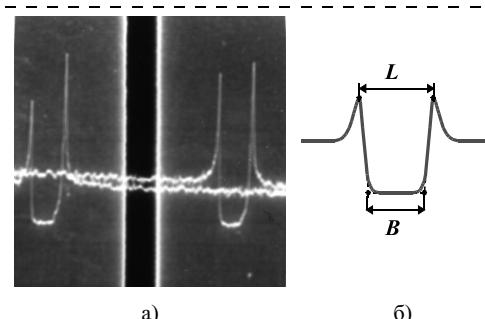


Рис. 10. Изображение канавки РПС и видеосигналов РЭМ (а), полученные при сканировании прямоугольной канавки шириной 150,7 нм, и схема сигнала (б) с измеряемыми параметрами ВС

и эффективной глубиной сбора вторичных электронов h_e

$$\delta \approx \varphi_d h_e / 2. \quad (3)$$

Таким образом, для определения ширины прямоугольной структуры необходимо знать такие параметры микроскопа, как увеличение и диаметр его электронного зонда.

Трапециевидные структуры с малыми углами наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности. Трапециевидной структурой с малыми углами наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности является такая структура, у которой проекция s наклона боковой стенки на основание структуры меньше диаметра d электронного зонда используемого РЭМ:

$$s = h \operatorname{tg} \varphi < d. \quad (4)$$

Форма сигнала от такой структуры и определяемые параметры показаны на рис. 11.

Согласно результатам фундаментальных исследований [27], зная увеличение M микроскопа и диаметр d его электронного зонда, можно определить параметры (см. рис. 9) канавки:

$$b_t = B_t / M + d, \quad (5)$$

$$u_t = (2L_t - B_t) / M - d \quad (6)$$

и выступа

$$b_p = B_p / M - d, \quad (7)$$

$$u_p = (2L_p - B_p) / M + d. \quad (8)$$

Если известна высота (глубина) h структуры (см. рис. 11, б), то угол φ наклона боковых стенок можно определить с помощью выражения

$$\begin{aligned} \varphi &= \operatorname{arctg}[(L_t - B_t) / M - d] / h \\ &= \operatorname{arctg}[(B_p - L_p) / M + d] / h. \end{aligned} \quad (9)$$

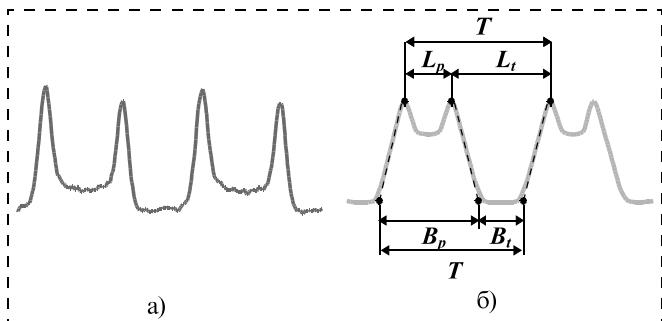


Рис. 11. Форма видеосигнала РЭМ (а), получаемого в режиме сбора ВМЭ при сканировании шаговой структуры с малыми углами наклона боковых стенок, и схема такого сигнала (б) с измеряемыми параметрами ВС

Таким образом, определяются все параметры структуры: верхние и нижние основания трапециевидного рельефа.

Трапециевидные структуры с большими углами наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности. Трапециевидной структурой с большими углами наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности является такая структура, у которой проекция s наклонной боковой стенки на основание структуры больше диаметра d электронного зонда используемого РЭМ:

$$s = h \operatorname{tg} \varphi > d. \quad (10)$$

Форма сигнала РЭМ и параметры структуры показаны на рис. 12.

Согласно фундаментальным исследованиям [32] знание увеличения и диаметра зонда позволяет определить **все** параметры структуры (см. рис. 9, б): размеры верхнего и нижнего оснований выступа

$$u_p = \frac{L_p}{M} - d, \quad b_p = \frac{B_p}{M} - d \quad (11)$$

и канавки

$$u_t = \frac{L_t}{M} + d, \quad b_t = \frac{B_t}{M} + d. \quad (12)$$

А знание угла φ позволяет определить высоту (глубину) h структуры:

$$h = \frac{L_t - B_t}{2M \operatorname{tg} \varphi} = \frac{B_p - L_p}{2M \operatorname{tg} \varphi} = \frac{S}{M \operatorname{tg} \varphi}. \quad (13)$$

Таким образом, в результате фундаментальных исследований вторичной электронной эмиссии рельефной поверхности твердого тела впервые удалось установить связь параметров профиля элементов структур, используемых в микроэлектронике, с параметрами сигналов, получаемых на РЭМ, и параметрами самих РЭМ.

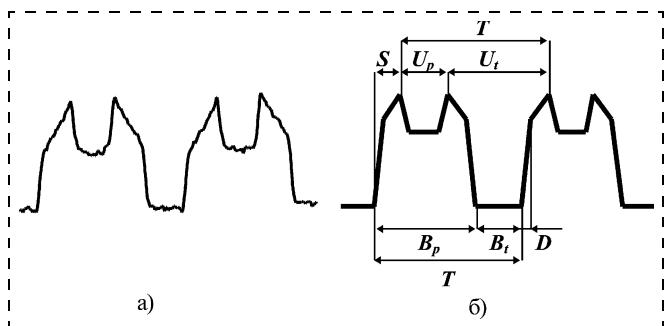


Рис. 12. Форма видеосигнала РЭМ (а), получаемого в режиме сбора вторичных медленных электронов при сканировании шаговой структуры с большими углами наклона боковых стенок, и схема такого сигнала (б) с измеряемыми параметрами ВС

5. Выбор алгоритмов линейных измерений на атомно-силовом микроскопе в диапазоне 1...1000 нм

Развитие атомно-силовой микроскопии имеет недавнюю историю [17]. Поэтому общеиспользуемых алгоритмов измерения размеров микроструктур в настоящее время не существует.

В результате исследования формирования изображения в АСМ сотрудниками ЦЕНИ ИОФ РАН и фирмы ЗАО "НТ-МДТ" был предложен алгоритм измерения размеров микроструктур. Согласно этому алгоритму все структуры делятся на две группы:

- трапециевидные структуры с малыми углами наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности;
- трапециевидные структуры с большими углами наклона боковых стенок относительно нормали к поверхности.

Рис. 13 поясняет это разделение. В первом случае (рис. 13, а) контакт острия зонда и выступа осуществляется в точке границы верха выступа и конуса кантилевера (контакта с боковой стенкой структуры нет). Во втором случае (рис. 13, б) острие зонда контактирует со всеми сторонами выступа.

Острие кантилевера АСМ представляет собой конус с углом α наклона образующей, оканчивающейся сферой радиуса r , плавно сстыкованной с конусом (это традиционное представление кантилевера). Ось конуса острия кантилевера может быть наклонена на угол β относительно нормали к поверхности. Схема сканирования исследуемой структуры в таком случае поясняется на рис. 14. Видно, что сигнал АСМ получается асимметричным даже при сканировании симметричных структур и отсутствии неортогональности Z-сканера.

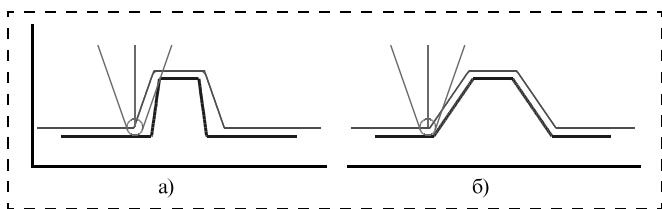


Рис. 13. Схема формирования сигнала АСМ при сканировании трапециевидной структуры с малыми (а) и большими (б) углами наклона боковых стенок

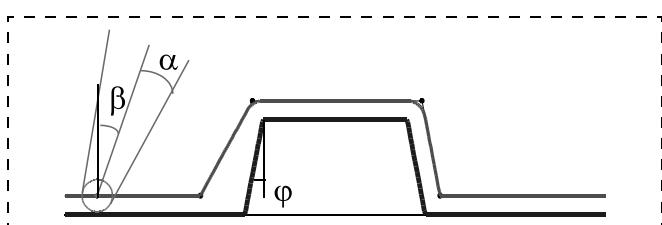


Рис. 14. Схема сканирования наклонным кантилевером трапециевидной структуры и форма получаемого при этом сигнала

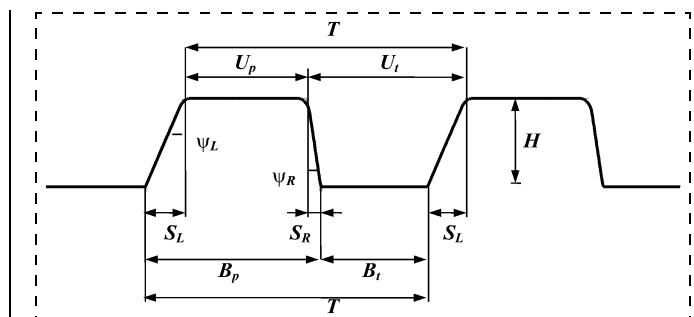


Рис. 15. Схема сигнала АСМ, получаемого при сканировании шаговой структуры с измеряемыми параметрами

На рис. 15 приведена общая схема сигнала, получаемого на атомно-силовом микроскопе, и показаны измеряемые параметры сигнала.

Современные кантилеверы имеют радиусы r , для которых выполняются условия малости радиуса относительно размеров элементов трапециевидной структуры (см. рис. 15):

$$s = h \operatorname{tg} \varphi \gg 2r, \quad u_{p,t} \gg 2r, \quad b_{p,t} \gg 2r. \quad (14)$$

В этом случае размеры структуры можно определить [32] с помощью выражений:

для выступа

$$u_p = m_x U_p - r [Q(\psi_L) + Q(\psi_R)]/2, \quad (15)$$

$$b_p = m_x B_p - r [Q(\psi_L) + Q(\psi_R)]/2 - m_z H (\operatorname{tg} \psi_L - \operatorname{tg} \psi_R); \quad (16)$$

для канавки

$$u_t = m_x U_t + r [Q(\psi_L) + Q(\psi_R)]/2, \quad (17)$$

$$b_t = m_x B_t + r [Q(\psi_L) + Q(\psi_R)]/2 + m_z H (\operatorname{tg} \psi_L - \operatorname{tg} \psi_R), \quad (18)$$

$$Q(\psi) = 2 \left(\frac{1 - \sin \psi}{\cos \psi} \right), \quad (19)$$

а m_x и m_z — цены деления шкал осей X и Z сканеров АСМ. Проекции наклонных стенок сигнала определяются высотой сигнала H и углами наклона боковых стенок сигнала ψ_L и ψ_R :

$$S_L = H \operatorname{tg} \psi_L; \quad (20)$$

$$S_R = H \operatorname{tg} \psi_R, \quad (21)$$

где

$$\psi_{L,R} = \begin{cases} \alpha + \beta, & \alpha + \beta > \varphi; \\ \varphi, & \alpha + \beta \leq \varphi, \end{cases}, \quad (22)$$

а β — угол наклона оси острия кантилевера относительно вертикали к поверхности.

Наиболее интересный случай будет наблюдаться при нормальном положении кантилевера ($\beta = 0$).

Тогда при выполнении условия $\alpha < \phi$ (этот случай демонстрируется на рис. 13, б) параметры выступа и канавки структуры, кантилевера и сигнала АСМ будут связаны уравнениями

$$u_p = m_x U_p - r Q(\phi); \quad (23)$$

$$b_p = m_x B_p - r Q(\phi); \quad (24)$$

$$u_t = m_x U_t + r Q(\phi); \quad (25)$$

$$b_t = m_x B_t + r Q(\phi). \quad (26)$$

В этом случае $Q(\phi)$ является универсальной константой для данной структуры и определяется только углом ϕ наклона ее боковых стенок:

$$Q(\phi) = 2 \left(\frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} \right). \quad (27)$$

6. Мера ширины и периода специальная МШПС-2.0К

Все известные к настоящему времени меры малой длины (от микрометров до десятых долей микрометра) имеют периодическую (шаговую) структуру с аттестованным периодом (шагом) по принятym международным стандартам с использованием явлений интерференции или дифракции света. Обычно период (шаг) таких структур определяется с высокой точностью в долях длины волны света стандартного лазерного источника. В качестве примеров можно указать меры, представленные в табл. 3.

Такие меры позволяют провести калибровку измерительного оборудования, предназначенного для измерений длины малых отрезков между двумя эквивалентными сторонами исследуемой шаговой структуры, но не позволяют выполнить измерение ширины линии (длины отрезка между противоположными сторонами одного элемента структуры). Укажем, что в современной микроэлектронной промышленности необходимо решение проблемы контроля именно размеров отдельных элементов изготавливаемой микросхемы (контроля ширины линии). Предложенные в настоящей работе меры малой длины предназначены для реализации такого контроля в производстве современных микроэлектронных устройств и устройств микромеханики.

Таблица 3

Меры, используемые в мире

| Мера, организация, страна | Период (шаг), нм |
|---------------------------------|------------------|
| ГСО 6261-91, ФГУП НИЦПВ, Россия | $390,0 \pm 1,0$ |
| G-300, ВНИИМ, Россия | $278,2 \pm 0,6$ |
| HJ-1000, Hitachi, Япония | 240 ± 1 |
| SRM-2090, NIST, США | 250 ± 1 |
| BCR-97-A/G-7, PTB, ФРГ | 399 ± 3 |

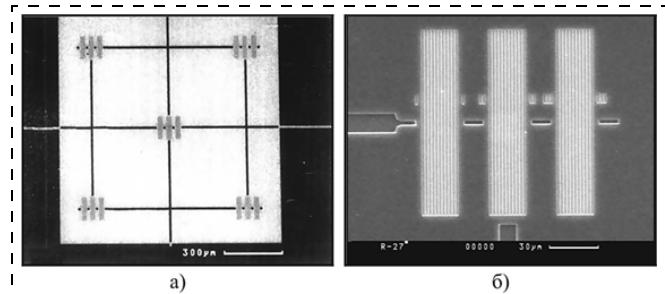


Рис. 16. Микрофотографии общего вида (а) меры МШПС-2.0К и одного из ее модулей (б), выполненные на РЭМ CamScan S-4

Конструкция меры МШПС-2.0К. Разработана и изготовлена новая мера, получившая название МШПС-2.0К (мера ширины и периода, специальная, номинальный размер 2,0 мкм, кремниевая) [32]. Аналогов в России и за рубежом мера не имеет.

Кремниевый чип с мерой имеет размер 10×10 мм² и толщиной 500 мкм. Мера состоит из пяти одинаковых модулей, расположенных по четырем углам квадрата 1×1 мм² и в его центре. Общий вид меры и одного из модулей демонстрируется на рис. 16.

Модуль (рис. 16, б) представляет собой три шаговые рельефные структуры на поверхности кремния, состоящие из 11 канавок (рис. 17, а) в кремнии.

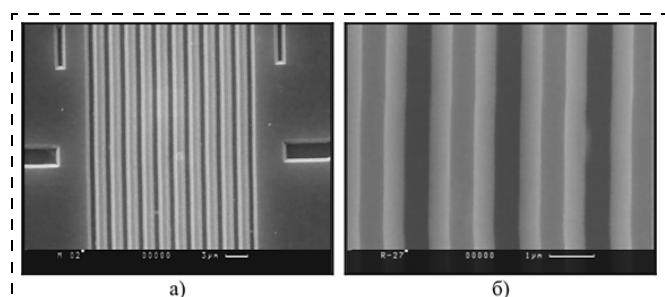


Рис. 17. Микрофотографии шаговой структуры (а) меры МШПС-2.0К и ее шага (б), выполненные на РЭМ CamScan S-4

Элементы рельефа этой структуры имеют профиль в форме трапеции (рис. 18) с равными боковыми сторонами и заданным углом наклона боковых сторон $\phi = 54,74^\circ$ относительно нижнего основания, определяемым углом между кристаллографическими плоскостями кремния.

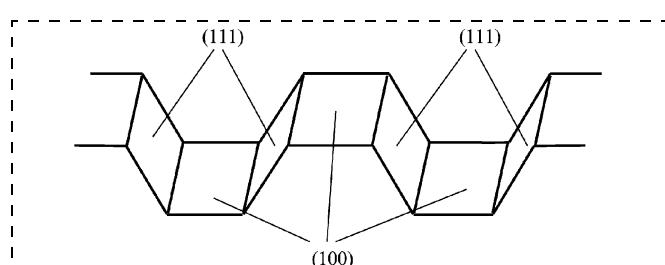


Рис. 18. Схема расположения кристаллографических плоскостей кремния элементов меры МШПС-2.0К

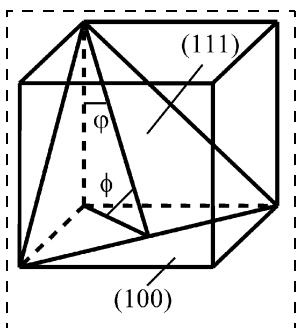


Рис. 19. Схема взаимного расположения кристаллографических плоскостей в элементарной ячейке кремния

физическими плоскостями (100) и (111). Схема расположения кристаллографических плоскостей (100) и (111) в элементарной ячейке кремния представлена на рис. 19.

Вид профиля шаговой структуры демонстрируется на микрофотографии скола структуры на рис. 20, а, а на рис. 20, б показано изображение шага структуры в атомно-силовом микроскопе.

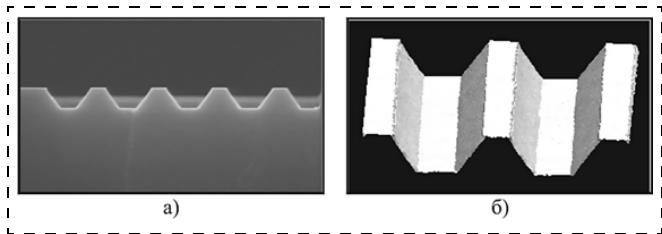


Рис. 20. Изображение скола меры МШПС-2.0К в РЭМ Cam-Scan S-4 и шага меры в ACM Smena В

Номинальный размер шага структуры составляет 2 мкм, а его точное значение (аттестованное расстояние между эквивалентными стенками конкретной пары элементов рельефа) определялось в процессе аттестации меры на эталонной установке ФГУП НИЦПВ Госстандарта России, описанной выше. Глубина рельефа структуры задается заказчиком (пользователем) в зависимости от решаемых задач. Длина элементов рельефа шаговой структуры составляет 100 мкм. В конструкции меры предусмотрены маркерные линии, облегчающие наводку зонда измерительного устройства на заданную пару элементов рельефа (см. рис. 16, а и б).

В настоящее время в ОАО НИИМЭ и Микрон разработаны, согласованы с Госстандартом России и утверждены технические условия на меру МШПС-2.0К и изготовлена первая малая серия таких мер. Оригинальность конструкции меры МШПС-2.0К подтверждается патентом России [20].

По заявкам пользователей может быть изготовлен набор мер МШПС-2.0К, отличающихся друг от друга глубиной (высотой) рельефа в диапазоне от 50 до 1000 нм. Такой набор мер открывает широкие возможности для научных и производственных подразделений, занимающихся измерениями

отрезков с малыми длинами и имеющими различное измерительное оборудование, например, растровый электронный и сканирующий атомно-силовой микроскопы.

Для демонстрации таких возможностей был изготовлен и экспериментально исследован комплект, состоящий из трех мер МШПС-2.0К, отличающихся друг от друга глубиной (высотой) H рельефа ($H \approx 635$ нм, $H \approx 275$ нм и $H \approx 92$ нм). Этот комплект позволяет выполнять калибровку РЭМ для измерений размеров элементов рельефа в диапазоне от 50 нм и выше.

Аттестация параметров профиля элементов рельефа меры МШПС-2.0К на растровом электронном микроскопе. Приведенное в паспорте аттестованной меры значение шага конкретной пары элементов рельефа является достаточным для того, чтобы можно было определить все параметры профиля элементов рельефа: верхние и нижние основания, проекцию боковой стороны на нижнее основание и высоту рельефа для любой пары элементов в любой из 15 шаговых структур всех пяти модулей [32]. Экспериментальное измерение параметров профиля элементов рельефа меры МШПС-2.0К может быть выполнено на любом современном растровом электронном микроскопе по прилагаемой к мере методике.

На рис. 9, б приведена схема шага меры МШПС-2.0К, на рис. 12, а реальная форма видеосигнала, а на рис. 12, б схема видеосигнала, получаемого при сканировании меры на растровом электронном микроскопе.

Так как размеры всех элементов шаговой структуры много больше диаметра d электронного зонда РЭМ,

$$s = h \operatorname{tg} \phi \gg d, \quad u_{p,t} \gg d, \quad b_{p,t} \gg d, \quad (28)$$

то, используя значение шага t структуры, можно в одном измерении определить не только увеличение M растрового электронного микроскопа

$$M = T/t, \quad (29)$$

но и диаметр d его электронного зонда:

$$d = D/M = tD/T. \quad (30)$$

Затем с помощью выражений (11) и (12) можно определить все размеры элементов структуры.

Структура имеет еще один параметр, для определения которого необходимо знать только значение шага t . Таким параметром является проекция боковой наклонной стенки выступа (канавки)

$$s = \frac{B_p - L_p}{2M} = \frac{L_t - B_t}{2M} = \frac{S}{M} = t \frac{S}{T}. \quad (31)$$

Выражение (31) указывает на то, что проекция наклонной стенки также, как и шаг структуры t ,

является аттестуемым инвариантным параметром. Причем аттестация проводится как опосредовано (используя значение шага, видеосигналы РЭМ и выражение (31)), так и непосредственно с помощью прямого измерения параметра S на электронно-оптических метрологических системах. Калибровка РЭМ с использованием аттестованного значения проекции наклонной стенки s осуществляется, используя выражения

$$M = S/s, \quad (32)$$

$$d = sD/S. \quad (33)$$

Отметим следующий важный вывод. Параметры профиля элементов меры МШПС-2.0К могут быть определены прямыми измерениями, когда не обязательно знать значение диаметра зонда РЭМ. Из рис. 21 и соотношений (11) и (12) видно, что размер отрезка B между точками, лежащими на середине между уровнем сигнала, характеризующим точки излома крыльев кривой ВС и уровнем среднего сигнала фона, соответствует размеру ширины нижнего основания выступа (канавки)

$$b = B/M, \quad (34)$$

а размер верхнего основания выступа (канавки) определяется из выражения

$$u = (B - 2S)/M. \quad (35)$$

Экспериментально установлено, что указанный прямой метод измерений на РЭМ параметров профиля элементов меры может применяться при условии выполнения неравенства

$$s/d \geq 1,5, \quad (36)$$

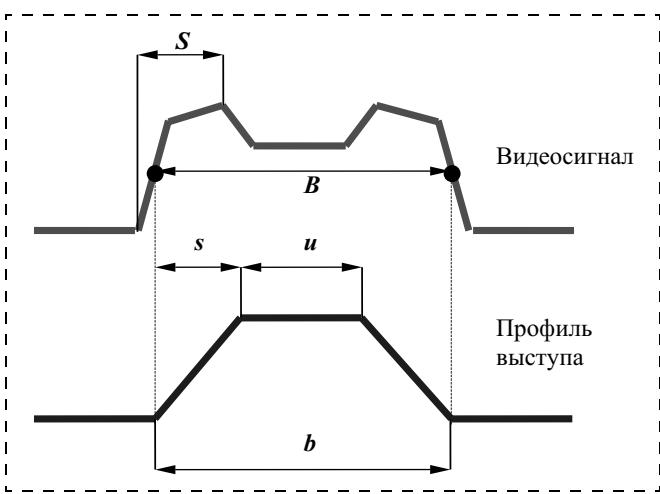


Рис. 21. Схема ВС и соответствующего ему выступа меры МШПС-2.0К, поясняющие прямое измерение размера нижнего основания выступа

где s — проекция боковой грани элемента рельефа на плоскость его нижнего основания, а d — диаметр зонда РЭМ.

Таким образом, на видеосигналах, полученных при сканировании на РЭМ элементов рельефа с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок, впервые локализованы точки, соответствующие положению краев нижних оснований элементов рельефа.

Использование меры МШПС-2.0К в атомно-силовой микроскопии. Калибровка атомно-силового микроскопа (определение цены деления шкалы АСМ вдоль оси сканирования m_x и вертикальной шкалы m_z) с помощью шаговой структуры с большими углами наклона боковых стенок [32] может быть осуществлена при известном шаге t структуры и высоты (глубины) h структуры:

$$m_x = t/T, \quad (37)$$

$$m_z = h/H. \quad (38)$$

В случае наличия неортогональности Z-сканера, ее можно определить по формуле

$$Z_x = \frac{m_x}{m_z} \frac{S_L - S_R}{2H}. \quad (39)$$

Знание размеров верхних и нижних оснований выступов и канавок структуры позволяет определить эффективный радиус острия кантилевера

$$\begin{aligned} r &= \frac{m_x U_p - u_p}{Q(\phi)} = \frac{m_x B_p - b_p}{Q(\phi)} = \frac{u_t - m_x U_t}{Q(\phi)} = \\ &= \frac{b_t - m_x B_t}{Q(\phi)}, \end{aligned} \quad (40)$$

где

$$Q(\phi) = 2 \left(\frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} \right) = \sqrt{6} - \sqrt{2} = 1,0353, \quad (41)$$

является универсальной константой для меры и определяется только углом ϕ наклона ее боковых стенок, который является природной константой — углом между кристаллографическими плоскостями (100) и (111) монокремния.

Универсальность меры МШПС-2.0К для линейных измерений на различных измерительных приборах. Мера МШПС-2.0К является универсальной линейной мерой для калибровки растровых электронных и атомно-силовых микроскопов и измерения на них линейных размеров микроструктур.

1. Аттестуемым элементом меры является ее шаг.
2. Аттестация шага меры проводится методом интерференции оптического излучения.

3. Аттестация шага проводится на небольшой площади. Положение аттестуемых элементов рельефа легко определить.

4. Измерение ширины линии (размеров верхних и нижних оснований выступов и канавок) меры осуществляется на любом современном РЭМ и АСМ с использованием аттестованного значения шага.

5. Измеряемые размеры элементов меры перекрывают большой диапазон размеров в микрометровой, субмикрометровой и нанометровой областях.

6. Мера позволяет определять увеличение РЭМ и диаметр его зонда (калибровать РЭМ) по одному регистрируемому изображению.

7. Калибровка РЭМ с использованием меры нечувствительна к ошибкам фокусировки зонда РЭМ.

8. Мера применяется для аттестации атомно-силовых микроскопов по трем координатам, используя только один аттестованный размер — шаг.

9. Мера позволяет определять нелинейность сканирования АСМ по X , Y и Z координатам, неортогональность Z -сканера и эффективный радиус остряя кантилевера.

10. Мера может использоваться для проведения сличения результатов измерений линейных размеров ее элементов на разных измерительных установках: оптических, электронных и атомно-силовых.

Сравнение меры МШПС-2.0К с прототипом стандарта ширины линии, предложенным специалистами Национального института стандартов и технологий США. В работе [10] описана конструкция прототипа меры ширины линии, предложенная специалистами Национального института стандартов и технологий (NIST) США. Эта мера представляет собой набор шаговых рельефных структур (каждая структура состоит из пяти элементов) с вариацией шага от 100 до 1000 нм. Рельеф выполнен в слое поликристаллического кремния на кремниевой подложке. Шаг структур аттестуется на метрологической системе NIST с использованием интерферометрии.

В предлагаемом прототипе меры не известна точная форма профиля элементов рельефа. Аттестация ширины линии связана с результатами сравнения данных по моделированию процессов формирования видеосигналов в РЭМ и АСМ с экспериментальными данными, полученными на различных измерительных установках. Такая конструкция меры не позволяет определить размеры зонда РЭМ и АСМ. Для контроля резкости изображения в РЭМ (контроль фокусировки зонда) специалисты NIST используют дополнительную меру RM8091, которая позволяет установить минимальный размер зонда, но не позволяет определить его диаметр.

Таким образом, выпущенная и аттестованная в России мера МШПС-2.0К по своим функциональным возможностям (полная калибровка измерительного оборудования с определением увеличения прибора и параметров его зонда) превосходит предложенный специалистами NIST прототип меры ширины линии и может быть рекомендована в качестве вторичного эталона для измерения малых длин в диапазоне 1...1000 нм на измерительном оборудовании, используемом в промышленности.

7. Подтверждение достоверности и единства линейных измерений. Круговые сличения

Прямым подтверждением достоверности измерений малых длин могут быть только совпадение экспериментальных результатов определения длины одного и того же отрезка, выполненные на измерительных установках, работающих на основе разных физических принципов. Так, например, измерение периода (шага) периодической (шаговой) структуры может быть проведено либо путем измерения углов, под которыми наблюдаются главные дифракционные максимумы при освещении структуры монохроматическим светом, либо путем измерения малых перемещений структуры, расположенной на подвижном столике с зеркалом, являющимся одним из элементов оптического интерферометра. Сравнение таких результатов принято называть *сличением*. Возможно также проводить сличение измеряемой длины одного и того же малого отрезка на разных моделях растровых электронных или сканирующих зондовых микроскопов, если эти приборы откалиброваны с помощью эталонов, аттестованных в различных метрологических службах с использованием принятых мировых стандартов (аттестация на основе либо дифрактометрии, либо интерферометрии).

Единство линейных измерений обычно подтверждается совпадением результатов, полученных при измерении одного и того же малого отрезка на разных измерительных установках, работающих в разных режимах, например, на разных моделях РЭМ с различными значениями ускоряющего первичные электроны напряжения, которые откалиброваны с помощью метрологических эталонов высокой точности. При этом используется одна и та же методика измерений. Таким образом, экспериментально доказывается отсутствие зависимости измеряемого значения от используемой аппаратуры.

В итоге проведения настоящей работы были выполнены сличения результатов измерения периода специальных периодических мер (решетки, полученные голографическим способом, т. е. путем создания интерференционной картины при сложении двух пучков от лазерного источника) с двумя

Таблица 4

Результаты круговых сличений периодических мер

| Организация (город) | Номинальный период, нм | |
|----------------------|------------------------|-----------------|
| | 400 | 280 |
| ВНИИМ (С.-Петербург) | $391,0 \pm 0,6$ | $277,0 \pm 0,3$ |
| ВИРМ (Париж) | $391,0 \pm 0,5$ | $277,0 \pm 0,3$ |
| ФГУП НИЦПВ (Москва) | $391,0 \pm 0,4$ | 275 ± 1 |

разными номинальными периодами. Измерение периодов выполнялось на лазерных метрологических дифрактометрах Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ, Санкт-Петербург) и Международного бюро мер и весов (ВИРМ, Париж), а в НИЦПВ измерения выполнялись на эталонной интерференционно-фазометрической системе на основе АСМ. Результаты сличений представлены в табл. 4.

Как видно из таблицы, результаты взаимных сличений периодических мер в нанометровом диапазоне, проведенных на эталонных установках, работающих на различных физических принципах, показали, что расхождение значений периодов одних и тех же структур не превышает 1 нм, что свидетельствует о достоверности измерений малых длин в нанометровом диапазоне на этих установках.

Таблица 5

Результаты измерений параметров профиля одних и тех же элементов рельефа на разных РЭМ

| Элемент структуры | Параметр | Микроскоп, энергия электронов зонда | | |
|-------------------------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| | | CamScan S-4 $E = 25 \text{ кэВ}$ | S-806 $E = 25 \text{ кэВ}$ | S-6200 H $E = 0,85 \text{ кэВ}$ |
| Канавка | Верх, нм | 1488 ± 2 | 1498 ± 3 | 1487 ± 5 |
| | Низ, нм | 563 ± 1 | 571 ± 5 | 567 ± 4 |
| Выступ | Верх, нм | 524 ± 1 | 524 ± 4 | 539 ± 4 |
| | Низ, нм | 1450 ± 2 | 1450 ± 5 | 1465 ± 5 |
| Проекция наклонной стенки, нм | | 465 ± 1 | 464 ± 2 | 462 ± 4 |

Таблица 6

Результаты измерений параметров профиля одних и тех же элементов рельефа в разных странах

| Элемент структуры | Параметр | Организация (страна), энергия РЭМ | |
|-------------------------------|----------|-----------------------------------|---|
| | | РТВ (ФРГ) $E = 1 \text{ кэВ}$ | ОАО НИИМЭ и Микрон (Россия) $E = 25 \text{ кэВ}$ |
| Выступ | Верх, нм | 582 ± 7 | 573 ± 5 |
| | Низ, нм | 1473 ± 7 | 1473 ± 4 |
| Канавка | Верх, нм | 1406 ± 5 | 1423 ± 4 |
| | Низ, нм | 511 ± 5 | 524 ± 4 |
| Проекция наклонной стенки, нм | | 445 ± 2 | 449 ± 4 |

Проверка отсутствия зависимости линейных измерений в микрометровом и нанометровом диапазонах от измерительных РЭМ разных моделей осуществлялась путем сравнения результатов измерений параметров профиля одной и той же группы элементов рельефа меры МШПС-2.0К. Измерения выполнялись как на РЭМ с ускоряющим напряжением 0,85...1,0 кВ, так и на РЭМ с ускоряющим напряжением 25 кВ. Эксперименты проводились в России (ОАО НИИМЭ и Микрон, завод "Ангстрем", Зеленоград) и в ФРГ в Национальном институте метрологии (PTB, Брауншвейг). Результаты измерений представлены в табл. 5 и 6.

Как видно из приведенных таблиц, в пределах одной суммарной ошибки измерений все значения параметров профиля одних и тех же элементов, используемых в конкретном опыте, совпадают, что подтверждает единство измерений на приборах различных фирм, работающих при разных ускоряющих напряжениях.

(*Окончание статьи читайте в следующем номере журнала*).

Список литературы

- Федорин В. Л. Государственный первичный эталон единицы длины // Российская метрологическая энциклопедия. С.-Петербург: Лики России. 2001. С. 228–231.
- The National Technology Roadmap for Semiconductors. 1994. SIA. San Jose, California. USA. 168 р.
- International Technology Roadmap for Semiconductors. 2001 Edition. Metrology. <http://public.itrs.net>.
- Перечень критических технологий Российской Федерации / Утвержден Президентом Российской Федерации 30 марта 2002 г. № ПР-578.
- Nyssonen D. N. // J. Opt. Soc. Amer. 1982. V. 72. N. 10. P. 1425.
- Wilson T., Sheppard C. J. R. Theory and practice of the scanning optical microscopy. L: Acad. Press. 1984.
- Postek M. T. Critical Issues in Scanning Electron Microscope Metrology // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1994. V. 99. P. 641–671.
- Новиков Ю. А., Раков А. В. Проблемы РЭМ-измерений размеров субмикронных элементов рельефа поверхности твердого тела (ч. 1 и ч. 2) // Микроэлектроника. 1996. Т. 25. № 6. С. 417–435.
- Новиков Ю. А., Раков А. В. Метрология критических размеров элементов СБИС // Измерительная техника. 1999. № 1. С. 14–18.
- Postek M. T. Critical-Dimension Metrology and the Scanning Electron Microscope // In "Handbook of silicon semiconductor metrology". Pt. 14. 2001. New York — Basel: Marcel Dekker. Inc. P. 205–333.
- Nyssonen D. N., Postek M. T. SEM-based system for the calibration of linewidth SEM's for the IC industry // Proceedings SPIE. 1985. V. 565. P. 181–186.
- Natsuzawa T., Toyoda K., Tanimura Y. Metrological Electron Microscope System for Microfeature of very Large Scale Integrated Circuits // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. N. 3. P. 975–979.
- Huessler-Grohne W., Bosse H. An electron optical metrology system for pattern placement measurements // Meas. Sci. Technol. 1998. V. 9. P. 1120–1128.
- Binning G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. Tunneling through a controllable vacuum gap // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. P. 178–180.
- Биннинг Г., Рорер Г. Сканирующая тунNELьная микроскопия — от рождения к юности // УФН. 1988. Т. 151. № 2. С. 261–278.

16. Бухараев А. А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии // Заводская лаборатория. 1994. № 10. С. 15—23.
17. Binning G., Quate C. F., Gerber Ch. Atomic Force Microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 930—933.
18. Быков В. А., Лемешко С. В., Новиков Ю. А., Раков А. В. Исследование субмикронных канавок с помощью атомно-силовых микроскопов // 12 Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черноголовка. 2001. "Богородский печатник". Тезисы докладов. С. 173.
19. Волк Ч. П., Новиков Ю. А., Раков А. В. Калибровка РЭМ с помощью периодической линейной меры микронного и субмикрометрового диапазонов // Измерительная техника. 2000. № 4. С. 48—52.
20. Волк Ч. П., Горнен К. С., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В. Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В. Тестовый объект для калибровки растровых электронных микроскопов // Патент на изобретение № 2207503. Дата приоритета 29.03.2001.
21. Postek M. T., Keery W. J., Larrabee R. D. The relationship between accelerating voltage and electron detection modes to linewidth measurement an SEM // Scanning. 1988. V. 10. P. 10—18.
22. Postek M. T. Low accelerating voltage SEM imaging and metrology using backscattered electrons // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 60. № 12. P. 3750—3754.
23. Novikov Yu. A., Rakov A. V. About Accuracy of Dimensions Measurements of Microrelief Elements in an SEM // Preprint № 3. General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences. 1996. 9 p.
24. Hatsuzawa T., Toyoda K., Tanimura Y. Metrological electron microscope system for microfeature of very large scale integrated circuits // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. № 3. P. 975—979.
25. Miyoshi M., Kanoh M., Yamaji H., Okumura K. A precise and automatic very large scale integrated circuit pattern linewidth measurement method using a scanning electron microscope // J. Vac. Sci. Technol. 1986. V. B4. P. 493—499.
26. Postek M. T., Vladar A. E., Villarrubia J. Is a Production Level Scanning Electron Microscope Linewidth Standard Possible? // Proceedings SPIE. 2000. V. 3998. P. 42—56.
27. Новиков Ю. А., Раков А. В. Вторичная электронная эмиссия рельефной поверхности твердого тела // Труды ИОФАН. 1998. Т. 55. С. 3—99.
28. Kalendin V. V., Chernyakov V. N., Todua P. A., Zhelkobaev Zh. Etalon Inter-ferometric Comparator for 3D Measurements of Surface Topography Based on the Scanning Tunnel and Atomic Force Microscopes // Progress in Precision Engineering and Nanotechnology (Proceedings of the 9th International Precision Seminar. Braunschweig. Germany) 1997. V. 1. P. 138—139.
29. Новиков Ю. А., Пешехонов С. В., Стрижков И. Б. Щелевидная линейная мера для калибровки растровых электронных микроскопов и измерений рельефных элементов в субмикронном и нанометровом диапазонах // Труды ИОФАН. 1995. Т. 49. С. 20—40.
30. Новиков Ю. А., Стеколин И. Ю. Калибровка растровых электронных микроскопов для измерения линейных размеров в субмикронном и нанометровом диапазонах // Труды ИОФАН. 1995. Т. 49. С. 41—65.
31. Новиков Ю. А., Прохоров А. М., Раков А. В. Эмиссия электронов из поверхностных состояний // Поверхность. Физика, химия, механика. 1993. № 3. С. 22—24.
32. Волк Ч. П., Горнен Е. С., Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Прохоров А. М., Раков А. В. Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрового диапазонов для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 4. С. 243—262.

УДК 539.2

К. П. Гайкович, д-р физ.-мат. наук,
В. Л. Миронов, канд. физ.-мат. наук,
Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА ПО ДАННЫМ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ¹

Деконволюция изображений с учетом нелокальности взаимодействия зонд — поверхность дала возможность впервые реализовать субатомную разрешающую способность в сканирующей туннельной микроскопии, что позволило получить изображение тонкой структуры плотности электронных состояний решетки пиролитического графита.

Введение

Одним из основных факторов, ограничивающих разрешающую способность методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), является конечная апер-

тура используемых зондов. Это приводит к тому, что получаемое двумерное СЗМ-изображение поверхности представляет собой сложную функцию, содержащую информацию как о рельефе поверхности, так и о структуре взаимодействующей части зонда. При СЗМ-исследованиях образцов с сильно развитым рельефом

основным сглаживающим фактором является геометрический фактор, обусловленный тем, что при сканировании зонд взаимодействует с поверхностью различными своими точками. В этом случае восстановление рельефа поверхности осуществляется методами, основанными на учете конкретной формы зонда и геометрии взаимодействия зонда с поверхностью (см., например, [1]), причем взаимодействие в системе зонд — поверхность считается локальным. Однако для атомарно гладких поверхностей и в условиях, когда неровности рельефа много меньше характерных размеров рабочей части зонда, геометрический фактор становится менее значимым, а основным фактором, сглаживающим изображение, становится существенная нелокальность взаимодействия в системе зонд — поверхность.

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 01-02-16444.

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) позволяет исследовать рельеф поверхности образцов с разрешением вплоть до атомарного. Для реализации атомарного разрешения необходимо, чтобы размеры зонда, его расстояние до поверхности и характерный радиус взаимодействия с поверхностью имели масштабы порядка размера атома. В этом случае взаимодействие зонда с поверхностью определяется перекрытием волновых функций пустых и заполненных электронных состояний зонда и образца. При удалении зонда от поверхности данное взаимодействие спадает экспоненциально с характерным масштабом порядка 0,1 нм (1 Å) [2]. Это приводит к тому, что туннельный ток протекает практически только между крайним атомом зонда и поверхностью образца. Таким образом, при СТМ-исследованиях атомарно гладких поверхностей рабочая апертура зонда определяется фактически крайним атомом на его кончике. В случае, когда кончик зонда не удается сделать достаточно острый, наблюдаются проявления многоатомного взаимодействия зонда с поверхностью [3], но такие случаи легко идентифицируются по характерным деталям получаемого СТМ-изображения.

На основании теории симметричной передаточной функции зонда [4] получаемое двумерное распределение туннельного тока интерпретируется как изображение локальной плотности электронных состояний образца. Эта теория, достаточно хорошо работает для металлов, но для полуметаллов (в частности, для исследуемого в данной работе графита) или полупроводников, имеющих более тонкую структуру плотности состояний, получаемое изображение существенно сглаживается и может быть приближенно описано сверткой распределения локальной плотности состояний

с передаточной функцией зонда [5]. В настоящей работе решается обратная задача восстановления СТМ-изображения поверхностной плотности электронных состояний на поверхности пиролитического графита на основе деконволюции уравнения свертки. Специфика этого материала, в СТМ-изображениях которого видна только половина атомов решетки [6, 7], делает его весьма подходящим тестовым объектом для последующего анализа.

Учет нелокальности взаимодействия зонд—поверхность в СТМ

Согласно работе [5], двумерное распределение (изображение) туннельного тока j^δ , измеренное в режиме постоянной высоты ($z = \text{const}$), может быть представлено в виде двумерной свертки поверхностной плотности электронных состояний ψ передаточной функции зонда K :

$$j^\delta(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x - s, y - t) \times \psi_e(s, t) ds dt. \quad (1)$$

Уравнение (1) представляет собой интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода. Нахождение решения данного уравнения представляет собой некорректную задачу, требующую применения методов регуляризации. Если использовать информацию о принадлежности решения к классу интегрируемых с квадратом функций, имеющих интегрируемую с квадратом производную второго порядка W_2^2 , приближенное решение (1) ψ^α может быть найдено методом обобщенной невязки Тихонова [9]. Предполагается, что известна оценка интегральной ошибки измерений δ и мера погрешности h приближенно известного оператора K_h , которые удовлетворяют условиям

бражении. Кроме того, мы аппроксимировали передаточную функцию двумерной гауссовой функцией с полушириной 0,2 нм (2 Å), как это было сделано в работе [5] для расчета сглаживания наблюдаемых распределений туннельного тока, и оказалось, что результаты в обоих случаях практически совпадают. Для удобства сравнения исходного и восстановленного изображений передаточная функция K нормировалась так, чтобы интеграл от этой функции был равен 1 (единичная нормировка ядра).

Для решения (1) относительно $\psi(s, t)$ нами использовался метод обобщенной невязки Тихонова [9]. Данный метод широко применяется для решения некорректных задач рассматриваемого типа в различных физических задачах [8].

Метод деконволюции Тихонова

Как было указано выше, уравнение (1) является интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода, решение которого представляет собой некорректную задачу, требующую применения методов регуляризации. Если использовать информацию о принадлежности решения к классу интегрируемых с квадратом функций, имеющих интегрируемую с квадратом производную второго порядка W_2^2 , приближенное решение (1) ψ^α может быть найдено методом обобщенной невязки Тихонова [9]. Предполагается, что известна оценка интегральной ошибки измерений δ и мера погрешности h приближенно известного оператора K_h , которые удовлетворяют условиям

$$\|j - j^\delta\|_{L_2} \leq \delta; \\ \|K - K_h\|_{W_2^2 \rightarrow L_2} \leq h, \quad (2)$$

где j — левая часть (1), соответствующая точному решению; j^δ — данные измерений с ошибкой δ ,

заданной в метрике L_2 функций, интегрируемых с квадратом. Согласно методу Тихонова, приближенное решение (1) находится из условия минимума функционала обобщенной невязки

$$\begin{aligned} M_\alpha[\psi^\alpha] = & \|K_h\psi^\alpha - j^\delta\|_{L_2}^2 + \\ & + \alpha \|\psi^\alpha\|_{W_2^2}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

при дополнительном условии, которое выражает принцип обобщенной невязки и позволяет найти значение параметра регуляризации α при заданном уровне погрешностей измерений и оператора:

$$\begin{aligned} \|K_h\psi^\alpha - j^\delta\|_{L_2}^2 = & \\ = & (\delta + h \|\psi^\alpha\|_{W_2^2}^2)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Для решения двумерных задач с большой размерностью используются свойства преобразования Фурье:

$$\begin{aligned} \psi^\alpha(s, t) = & \frac{1}{4\pi^2} \times \\ \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} & \frac{\tilde{K}_h^*(\omega, \Omega)\tilde{j}^*(\omega, \Omega)e^{i(\omega s + \Omega t)}d\omega d\Omega}{L(\omega, \Omega) + \alpha[1 + (\omega^2 + \Omega^2)^2]}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\tilde{K}_h^*(\omega, \Omega) = \tilde{K}_h(-\omega, -\Omega)$;

$$L(\omega, \Omega) = |\tilde{K}_h(\omega, \Omega)|;$$

$$\begin{aligned} \tilde{j}^*(\omega, \Omega) = & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} j^\delta(x, y) \times \\ \times e^{-i(\omega x + \Omega y)} & dx dy; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{K}_h(\omega, \Omega) = & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K_h(u, w) \times \\ \times e^{-i(\omega u + \Omega w)} & du dw. \end{aligned} \quad (7)$$

Эти формулы позволяют решить проблему быстрых вычислений на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье.

Восстановление электронной структуры поверхности пиролитического графита по данным СТМ

СТМ-исследования поверхности пиролитического графита проводились с помощью многомодового микроскопа "Solver P-47", разработанного фирмой НТ-МДТ (Зеленоград, Россия). В эксперименте измерялось двумерное распределение туннельного тока между зондом из платино-иридевого сплава и поверхностью графита в режиме постоянной высоты ($z = \text{const}$). Начальное значение туннельного тока устанавливалось порядка 2,5 нА при напряжении на туннельном промежутке 20 мВ. Скорость сканирования зонда над поверхностью составляла 410 нм/с (4100 Å/с). Получаемое СТМ-изображение представляло собой массив данных, состоящий из 128×128 элементов с размером пикселя порядка 0,01 нм (0,1 Å).

Плотность состояний на поверхности пиролитического графита исследовалась во многих работах. Особенностью СТМ-изображений пиролитического графита с гексагональной решеткой является то, что туннельный ток в местах расположения атомов, имеющих ближайший соседний атом во втором слое, существенно меньше, чем для мест атомов, под которыми атом углерода во втором слое отсутствует. На изображении атомы первого типа (А-тип) выглядят, как тени между атомами второго типа (Б-тип) [6, 7], т. е. в СТМ-изображении отчетливо наблюдается только половина атомов решетки графита.

На рис. 1 представлено измеренное распределение туннельного тока на поверхности пиролитического графита. Среднее квадратическое значение погрешности измерений составляло 0,08 нА (около 10 % от максимального перепада тока в измеряемом сигнале). Ошибка в соседних пикселях была практически некоррели-

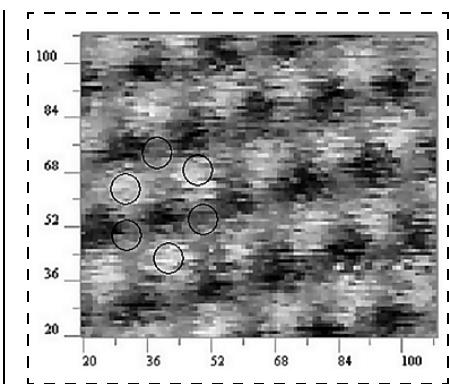


Рис. 1. Исходное СТМ-изображение измеренного распределения туннельного тока. Кружки обозначают положение атомов в решетке пиролитического графита. Размер пикселя $0,0135 \times 0,0101$ нм ($0,135 \times 0,101$ Å)

рованная. Несмотря на довольно высокий уровень ошибки, в экспериментальных данных имеется значительная статистическая избыточность, которая позволяет эффективно уменьшить ошибки.

Ошибки исходного изображения для периодических структур могут быть значительно уменьшены путем пространственного усреднения данных по периоду решетки. На рис. 2 (слева) представлено изображение, полученное в результате усреднения СТМ-данных (по 40 атомам). Из сравнения с рис. 1 видно, что качество изображения существенно возрастает, поскольку соответствующая средняя квадратическая ошибка уменьшается примерно в 6 раз и составляет менее 0,15 нА. При таком низком уровне погрешности оказывается возможным восстановить существенно более тонкие детали изображения (рис. 2, справа). Во-первых, на восстановленном изображении можно ясно видеть структуру гексагональной решетки графита: атомы А-типа различимы так же хорошо, как и атомы Б-типа. Во-вторых, проявляется более тонкая, субатомная структура электронных состояний в решетке (размер наименьших деталей в изображении составляет около 0,04 нм (0,4 Å)). Полученное в результате восстановления

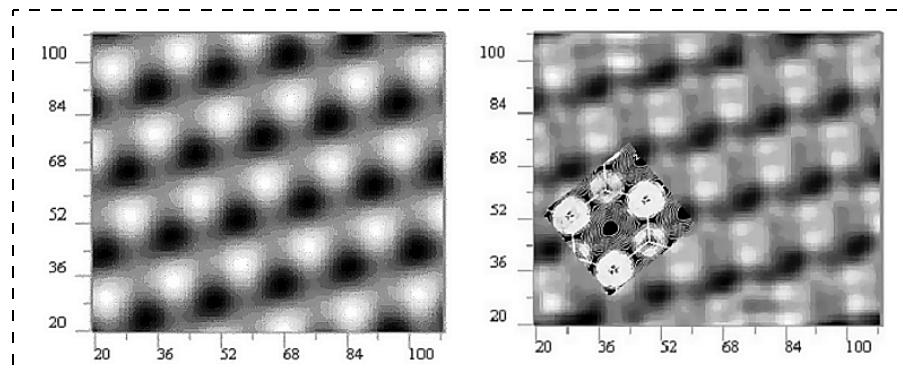


Рис. 2. СТМ-изображение, усредненное по периоду решетки (слева) и восстановленное распределение плотности электронных состояний (справа). Вставка — результаты модельных расчетов

СТМ-изображение качественно согласуется с результатами расчетов локальной плотности состояний, приведенных в работе [6] и показанных на вставке на рис. 2 (справа).

Следует отметить, что в восстановленном изображении содержатся некоторые погрешности, связанные с недостаточной точностью исходных данных и передаточной функции зонда. Однако, сравнивая полученные изображения с результатами теоретических расчетов плотности электронных состояний, можно попытаться уточнить вид передаточной функции и реализовать еще более высокое пространственное разрешение.

Численное моделирование

Известно, что точность восстановления для некорректных задач может быть оценена только

на основе результатов численного моделирования по замкнутой схеме: задается исходное распределение, по нему вычисляются точная левая часть (1), на нее накладывается случайная погрешность, чтобы получить "данные измерений", уравнение (1) решается и результаты восстановления сравниваются с исходным распределением.

Важным преимуществом рассматриваемого метода является сходимость получаемого приближенного решения к точному в метрике W_2^2 и, следовательно, равномерная сходимость (т. е. по максимуму модуля) по мере уменьшения погрешности измерений в интегральной (!) метрике [9]. Значения параметров погрешности измерений δ и h (оцененные в метрике L_2) определяют качество восстановления, неявно регулируя параметр регуляризации, от

которого зависит степень заглаживания приближенного решения. При $(\delta, h) \rightarrow 0$ восстановленное распределение равномерно сходится к точному решению. Поэтому нет необходимости использовать большие статистические ансамбли для получения представительных оценок точности восстановления, как это требуется в других методах, обладающих интегральной или средней квадратической сходимостью, — достаточно выполнить численное моделирование для типичных и, может быть, для экстремальных распределений.

В качестве исходного распределения для моделирования был выбран результат восстановления, представленный на рис. 2 (справа). По нему из (1) вычислялось соответствующее распределение туннельного тока, на которое "набрасывалась" нормально распределенная, некоррелированная между соседними пикселями ошибка со стандартным отклонением, соответствующим ошибке реального эксперимента. В результате получались "данные измерений", показанные на рис. 3 (слева). Можно видеть, что полученное распределение очень похоже на реально измеренное СТМ-изображение (см. рис. 1). Далее по этим "данным измерений" решалась обратная задача в соответствии с описанной выше процедурой, и результат восстановления представлен на рис. 3 (справа). Видно, что восстановленное изображение достаточно хорошо воспроизводит исходное на рис. 2 (справа). Таким образом, можно полагать, что полученное в результате обработки реальных данных распределение поверхности плотности электронных состояний пиролитического графита действительно близко к реальному.

Заключение

Представленные результаты показывают, что развитый в ра-

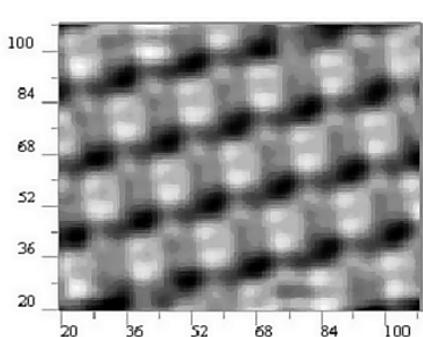


Рис. 3. Численное моделирование. "Данные измерений" (слева) и результаты восстановления (справа)

боте метод восстановления СТМ-изображений с учетом нелокальности взаимодействия в системе зонд—поверхность позволяет существенно улучшить пространственное разрешение при исследовании атомарно гладких поверхностей. Применение этого метода к данным СТМ-измерений поверхности пиролитического графита позволило восстановить изображение тонкой структуры локальной плотности электронных состояний и впервые достичь субатомного разрешения.

Список литературы

1. Buckaraev N. V., Berdunov D. V., Ovchinnikov K. M., Salikov K. M. Three-dimensional probe and surface reconstruction for atomic-force microscopy using deconvolution algorithm // Scanning Microscopy. 1997. Vol. 11. N. 2. P. 25–31.
2. Binning G. In touch with atoms // Reviews of Modern Physics. March 1999. Vol. 71. Special Issue. 1999. P. 324–330.
3. Mizes H. A., Park Sang-il, Harrison W. A. Multiple-tip interpretation of anomalous scanning-tunneling-microscopy images of layered materials // Phys. Rev. B. 1987. Vol. 36. N. 8. P. 4491–4494, (1987).
4. Tersoff J. and Hamann D. R. Theory and Application for the Scanning Tunneling Microscope // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 50. N. 25. P. 1998–2001.
5. Tersoff J. Role of tip electronic structure in scanning tunneling microscope im-
- ges / Phys. Rev. B. 1990. Vol. 41. N 2. P. 1235–1238.
6. Tomanek D. and Louie S. G. First-principles calculation of highly asymmetric structure in scanning-tunneling-microscopy of graphite // Phys. Rev. B. 1988. Vol. 37. N. 14. P. 8327–8336.
7. Binning G., Fuchs H., Gerber Ch., Rohrer H., Stall E. and Tosatti E. Energy-dependent state-density corrugation of a graphite surface as seen by scanning tunneling microscopy // Europhys Lett. 1986. Vol. 1. N. 1. P. 31–36.
8. Манолов В. П., Пытьев Ю. П. Информативность изображения в задаче интерпретации измерения на туннельном электронном микроскопе // Вестник МГУ Сер. 3 Физика. Астрономия. 1999. Т. 34. № 6. С. 14–21.
9. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягода А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.

РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержаных РФФИ по итогам конкурса 1998 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 6 за 1998 г. <http://intra.rfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Нетрадиционные логики и семиотические модели в исследовании и проектировании многоагентных систем

Номер проекта: 98-01-00227

Год представления отчета: 2001

Проект посвящен фундаментальной научной проблеме искусственного интеллекта (ИИ) — исследованию и проектированию многоагентных систем (МАС) на основе нетрадиционных (модальных, нечетких, немонотонных, псевдофизических, а также гибридных) логик и семиотических моделей, обобщающих классические формальные системы. На заключительном этапе выполнения проекта в 2000 г. проведена разработка теоретических основ построения агентов на базе трехуровневой двухконтурной модели организации деятельности и анализа различных интенциональных характеристик. Рассмотрены логические подходы к формализации интенций и действий, указаны пути построения нетрадиционных логик для проектирования интенциональных интеллектуальных агентов. Даны примеры нечеткой и возможностной интерпретации модальных логик. Построена общая методология нисходящего и смешанного V-образного проектирования многоагентных систем и виртуальных организаций на базе полярных шкал критериев, опреде-

ления допустимых типов оценок с помощью псевдологических матриц и формирования организационных архетипов с учетом экстремальных принципов.

В контексте развития подходов искусственной жизни и биореинжиниринга организаций проведено изучение процессов многоуровневой адаптации, самоуправления и самореорганизации в МАС, состоящих из коллективных агентов. Разработаны теоретически основы построения интеллектуальных производственных систем и сетевых (виртуальных) предприятий как МАС. Предложена концепция многомерной компьютерной интеграции сетевых предприятий вокруг системы жизненных циклов, проведен сравнительный анализ различных моделей жизненных циклов.

Термомеханика и трибология нестационарных процессов в углерод-углеродных композиционных материалах

Номер проекта: 98-01-00996

Год представления отчета: 2001

Получили дальнейшее развитие модели микромеханики пространственно армированных композитов, позволяющие учесть влияние случайности расположения армирующих элементов и температуры на различных

структурных уровнях (пироуглеродная матрица, односторонние структурные элементы) на свойства проектируемых новых пространственно армированных углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ). Разработана методика выбора параметров рациональных схем армирования углерод-углеродных тормозных дисков и других конструкций. Методика основана на моделировании нестационарных полей температур и напряжений. Поля напряжений рассматриваются на двух уровнях: макроуровне и уровне односторонних расчетных элементов. Созданы Windows-приложения с использованием объектно-ориентированного программирования, реализующие разработанные модели для расчета и рационального проектирования конструкций различного назначения из новых пространственно армированных УУКМ на основе анализа структурных напряжений в односторонних элементах за время работы конструкции, при интенсивном термосиловом нагружении. На основе вычисления структурных напряжений в течение всего времени работы конструкции выбирались рациональные осесимметричные пространственные схемы армирования. Выявлялись наиболее тяжелонагруженные зоны в конструкциях по критериям для структурных напряжений. Сделана постановка пространственных задач микромеханики для определения структурных напряжений на уровне матрицы и волокон в этих зонах.

Влияние эффектов неоднородности, вязкости и капиллярности на распространение нелинейных волн в жидкостях

Номер проекта: 98-01-00660

Год представления отчета: 2001

В проекте проводилось теоретическое исследование процессов распространения волн в неоднородных средах с учетом реальных эффектов. В итоге получены следующие важнейшие результаты. В рамках точной нелинейной постановки доказано существование стоячих волн в канале с ровным дном. Разработан алгоритм построения решения задачи Римана для уравнений вихревой мелкой воды и найден новый класс точных решений для этой модели. Установлена разрешимость в целом по времени задачи, описывающей в приближении Стокса эволюцию границы раздела двух несмешивающихся сжимаемых жидкостей, с учетом действия капиллярных сил в классе мерозначных вариофолд-решений. Для линеаризованной модели длинных волн на поверхности слоя вязкой несжимаемой жидкости (учет вязкости в приближении полограничного слоя), а также для нелинейной модели вихревой мелкой воды строго доказано, что границы области определенности решения задачи Коши задаются обобщенными характеристиками систем интегродифференциальных уравнений. Проанализированы процессы распространения возмущений в течениях, описывающих трехмерными нестационарными уравнениями взаимодействующего ламинарного гиперзвукового полограничного слоя. Найдены субхарактеристики системы уравнений и выведено интегральное условие, определяющее скорость распространения возмущений. Для

простейших трехмерных течений (пограничный слой на скользящем крыле) определены диаграммы скоростей распространения возмущений. Исследована нелинейная стадия развития неустойчивости тяжелой сжимаемой жидкости в наклонном канале под крышкой. Показано, что уравнения модуляций для устойчивых периодических нелинейных волновых пакетов имеют гиперболический тип. Найдены аномальные режимы течения, отвечающие переходу от расслоенного течения к снарядному режиму. Получена математическая модель, описывающая как расслоенный, так и пробковый режимы течения в канале. Для модели движения идеальной жидкости в удлиненном эластичном канале вычислены скорости распространения возмущений, установлено существование простых волн, найдены классы инвариантных решений. Исследованы условия гиперболичности и основные свойства системы кинетических уравнений Руссо-Смереки, описывающей течение жидкости с пузырьками, найдены инварианты Римана, бесконечная серия законов сохранения и построены классы точных решений. Выведена новая система кинетических уравнений, описывающая движение сжимаемых пузырьков в жидкости. Дан асимптотический вывод новых уравнений и построены приближенные решения, описывающие динамику сред со слабосжимаемыми компонентами, включая фазовые переходы и ударные волны.

Методы интеллектуального и нейросетевого управления мультиагентными робототехническими системами

Номер проекта: 98-01-01088

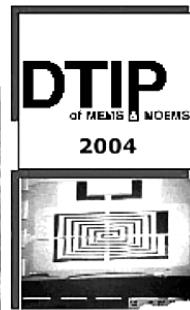
Год представления отчета: 2001

Было проведено теоретическое исследование общих принципов и развитие конкретных методов интеллектуального и нейросетевого управления роботами, позволяющих им решать задачи моделирования среды, планирования оптимальных маршрутов, полигональной и полиномиальной интерполяции движений и оптимального нейросетевого управления исполнительными механизмами роботов. Определенное внимание было уделено разработке подходов к групповому (мультиагентному) управлению сложными робототехническими системами в изменяющейся среде. При этом робототехническая система исследовалась с позиций теории управления как множество (группа) электромеханических агентов с элементами искусственного интеллекта, связанных между собой каналами обмена информацией. Были разработаны методы супervизорного управления мультиагентными робототехническими системами, основанные на иерархической декомпозиции общей задачи группового управления на ряд локальных задач управления электромеханическими агентами и координации их взаимодействия для предотвращения возможных конфликтов. Актуальность полученных результатов определяется тем, что теория нейросетевого управления роботами и группового управления мультиагентными робототехническими системами слабо развита, а ее приложения для автоматизации подводных и космических исследований и технологических процессов очень важны.

ИНФОРМАЦИЯ

Symposium on

Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS



DTIP 2004, 12–14 May 2004 — Montreux, Switzerland.

Chair: **Bernard COURTOIS**, TIMA Labs, Grenoble, France

Co-Chair: **Karen MARKUS**, Zeus Strategies, LLC, Durham, USA

Conferences

CAD, Design and Test

Chair: J. KORVINK,

University of Freiburg, Germany

Co-Chair: J. M. KARAM,

MEMSCAP, Bernin, France

Microfabrication, Integration and Packaging

Chair: A. IONESCU,

EPFL Lausanne, Switzerland

Co-Chair: M. ESASHI,

Tohoku University, Japan

Including

Workshop on MEMS packaging
organized by E. JUNG, IZM, Berlin,
Germany

CAD, Design and Test

The topics for this Conference include (preliminary):

- Technology CAD in general
- Modeling and simulation of fabrication processes
- Devices and components (sensors, actuators, ...)
- MEMS/MOEMS libraries and IP
- Signal processing
- Integrated CAD tools
- Numerical simulation
- Yield estimation
- Failure mechanisms
- Fault modeling
- Fault simulation and test pattern generation
- Mechanical simulation
- Thermal evaluation
- Interoperability of CAD/CAE tools
- Multiphysics simulation
- Structured design methodologies
- Languages for interchange data among design and tools
- Model order reduction

Invitation to participate

This Symposium will be a follow-up to the very successful issues held in 1999 and 2000 in Paris and in 2001, 2002 and 2003 in Mandelieu-La Napoule. This series of Symposia is a unique singlemeeting event expressly planned to bring together participants interested in manufacturing microstructures and participants interested in design tools to facilitate the conception of these microstructures. Again, a special emphasis will be put on the very crucial needs of MEMS/MOEMS in terms of packaging solutions. The goal of the Symposium is to provide a forum for in-depth investigations and interdisciplinary discussions involving design, modeling, testing, micromachining, microfabrication, integration and packaging of structures, devices, and systems.

We look forward to welcoming you to Montreux and encourage you to participate by submitting an abstract for one of the two Conferences.

B. COURTOIS
K. MARKUS

Microfabrication, Integration and Packaging

The topics for this Conference include (preliminary):

- Integrated processes (micromachining, micromolding, ...)
- Process integration between MEMS and electronics
- Microlithography issues unique to MEMS/MOEMS
- Manufacturing
- Materials
- Assembly technologies
- Packaging for harsh environments
- MOEMS packaging
- RF and microwave packaging
- Test structures
- Devices & components (sensors, actuators, ...)
- Dimensional measurements
- Physical measurements
- Failure analysis
- Reliability
- Characterization
- Process monitoring
- Non destructive evaluation

<http://tima/imag.fr/Conferences/dtip>



MANCEF

Micro and Nanotechnology Commercialization Education Foundation

COMS 2004 is coming to Edmonton, Alberta, Canada

29 August – 2 September, 2004

MANCEF is proud to announce that Edmonton, Alberta, Canada will join the family of COMS hosts.

Advance Call for Papers: COMS 2004 **Appel de communications: COMS2004**

About the Commercialization of Micro and Nano Systems Conference Series

COMS is the leading international conference on the commercialization of MEMS/MST/micromachining and nanotechnology. This Conference fosters the commercialization of micro- and nanotechnologies and addresses commercialization issues unique to these emerging and disruptive technologies. COMS brings together key people from all over the world and from every sector of the supply chain, including top researchers in the field, equipment suppliers, end users and financial experts.

The Conference utilizes a "Gordon-style" environment that strongly encourages interaction among the attendees. COMS 2004 provides an ideal opportunity to meet decision-makers in the micro- and nanotechnology communities and to gain valuable insights and information about industrial trends. It is a follow-up to the earlier highly successful MANCEF-sponsored COMS conferences held in Banff (1994), Hawaii (1996), San Diego (1998), Dortmund (1999), Santa Fe (2000), Oxford (2001), Ypsilanti (2002), and Amsterdam (2003).

Scope of Conference Topics

COMS 2003 addresses recent advances in micro/nanotechnology for physical, chemical and biological systems and their impact on commercial markets.

The markets addressed include:

- Transportation
- Biological
- Industrial

- Consumer
- Communications
- Environmental
- Security and homeland defense

Topics include:

- Roadmapping
- Strategic management of technology
- Cost modeling
- Standards
- Relationships needed for commercialization

- The role of foundries in commercialization
- Investment strategies
- The role of venture capital in commercialization
- Government's role in commercial development
- Universities' role in commercial development

An exhibition of equipment suppliers, service providers, product suppliers and consultants will be held in conjunction with the Conference.

Conference Venue

Offering a spectacular view of Edmonton's river valley from the banks of the North Saskatchewan river, the award winning Shaw Conference Centre is situated in the heart of the City's vibrant downtown core. Gain easy access to Edmonton's major hotels, fine restaurants, theatre, and downtown shopping district through direct pedway connections.

©MANCEF — Micro And Nanotechnology Commercialization Education Foundation 160 Washington SE M/S #47
|Albuquerque, NM 87108 USA| (505) 255-1826 (phone) | (505) 255-1827 (fax)
All rights reserved. Updated: September 2, 2003

<http://www.mancef.org/coms2004.htm>

European Micro and Nano systems 2004

First Issue
Advances & Application for Micro & Nano Systems
20—21 October 2004

| Organizing Committee | TOPICS |
|--|---|
| Chair: Dr. Daniel H. FRUMAN, <i>Consultant Engineer, ASME, France</i> | Industrial aspects: <ul style="list-style-type: none"> • Commercialization of μ & n systems • Information technology based applications • Biological technology based applications • Energy technology based applications • Medical technology based applications |
| Prof. Mohamed AKIL, ESIEE, <i>France</i> | Research aspects: <ul style="list-style-type: none"> a. μ & n materials <ul style="list-style-type: none"> i. silicon ii. polymers iii. ceramics iv. material testing and characterization b. μ & n fabrication/manufacturing <ul style="list-style-type: none"> i. ultrasonic ii. erosion iii. machining iv. printing c. μ & n mechanics/devices <ul style="list-style-type: none"> i. fluidics ii. actuators iii. robotics iv. motors v. optics d. μ & n design/integration <ul style="list-style-type: none"> i. self-assembly ii. computational tools iii. multiscale modeling iv. use of μ for n exploration |
| Mr. Michel BOURGEOT, <i>GST-MIA, AFM, France</i> | |
| Mr. Jean FABRI, <i>Secretary of MN04,</i> <i>AFM, France</i> | |
| Prof. Didier GEIGER, <i>Univ. Paris XII</i> <i>Val-de-Marne, France</i> | |
| Mr. Pierre-Alain HACQ, <i>Executive Director, AFM,</i> <i>France</i> | |
| Mr. Raj MANCHANDA, <i>ASME, U. S. A.</i> | |
| M. Xavier BOUTIN, <i>Club nano-microtechnologie, France</i> | |
| Prof. Skandard BASROUR, <i>TIMA Labs, Grenoble, France</i> | |

Contacts:

Jean FABRI

Secrétaire Général du GST/MIA
Maison de la Mécanique
39—41 rue Louis Blanc
92038 Paris la Défense Cedex
France
Tel: +33 1 47 17 64 89
Fax: +33 147 17 61 31

Daniel H. FRUMAN

16 Allée Bellevue
78230 Le Pecq
France
Tel: +33 1 39 17 00 13
Fax: +33 1 39 17 00 13

Bernard COURTOIS

TIMA-CMP
46 avenue Félix Viallet
38031 Grenoble Cedex
France
Tel: +33 4 76 57 46 15
Fax: +33 4 76 47 38 14

Rai MANCHANDA

ASME Nanotechnology Institute
Three Park Avenue
New York, NY 10016, USA
Tel: +1 212 591 7789
Fax: +1 212 591 7059

<http://tima.imag.fr/Conferences/EMN/>

CONTENTS

- Teletc V. A. Microelectromechanical Inertial Transducers
of Physical Quantities: Typical Design Variants** 2

The microelectromechanical accelerometers are the leaders of sales of inertial microelectromechanical systems (MEMS) due to automobile electronics development. However the inertial MEMS-devices market keeps spreading by the high sensitive micro- seismosensors and gyroscopes. Most widely used designs of them are briefly overviewed.

- Luchko V. A. MEMS-technology Changed Notion about Technology
of Infrared Vision.** 6

In this article the matrix receiver of infrared vision consisted of thousand photosensitive microconsoles on a basis of SiC are described.

- Kozlov A. G. Modelling of Steady-State Temperature
Distribution in Gas Microsensors Based on Thermally
Isolated Structures** 8

An analytical method is presented that allows one to determine the steady-state temperature distribution in gas microsensors based on thermally isolated structures made with an anisotropic etching of silicon. The structure of a microsensor is divided into a number of two-dimensional rectangular regions in which the temperature distribution is obtained by means of Fourier method. Parameters characterising thermal conduction processes between adjacent regions are found using adjoint boundary conditions. As an example, the temperature distribution in two structural variants of catalytic gas sensor on the thermally isolated structures is determined.

- Balan N. N. Definition of Mems-Structures Elastic
Properties** 14

It is described a finite element method of multilayered plates modeling, offered to use at modeling of elements of MEMS-structures. On an example of a tunnel sensor membrane simulation and comparison of the received results with analytical calculation efficiency of application of the offered method is shown. Lacks of a method and ways of their elimination are discussed.

- Usanov D. A., Skripal A. V., Kamyshanckiy A. S. Velocity
Measurement of Object Movement by the Spectrum of Autodyne
Signal of Semiconductor Laser on Dimensional Quantum
Structures** 19

The application possibility of laser autodyne on dimensional quantum structures for velocity measurements of nanometer displacements has been researched. Additional mechanical vibrations with amplitude no less than half of wavelength of laser radiation were excited in an object to provide autodyne signal normalization. In this case the displacement velocity were determined by phase changing of autodyne signal.

- Todua P. A., Bykov V. A., Volk Ch. P., Gornev E. S.,
Zhelkobaev Zh. etc. Scientific and Technological Bases
of Metrological Security of Length Dimension in Micrometer
and Nanometer Ranges and their Intrusion in Microelectronics
and Nanotech-nologies** 24

The bases of metrological security of the dimensions based on the methods of scanner probe microscopy and laser interferometer — phasemeter are represented. The methods and means of reproduction and transmission of the unit of length dimension in the indicated range with absolute binding to the state primary standard of the unit of length — the meter are offered; the technology is developed and tree-dimensional micro-nanorelief of surface are created and also the algorithms and the package of programs permitting to realize the automated tree-dimensional dimension of the condensed environments are created.

- Gaikovich K. P. Mironov V. L. Reconstruction of LDOS
of HOPG Surface by Data of Scanning Tunneling
Microscopy** 39

A sub-atomic resolution in the scanning tunneling microscopy is achieved by deconvolution of measured images taking into account the smoothing property of the probe transfer function. This method makes it possible to obtain the image of thin structure of LDOS of the HOPG lattice.

Подписку за рубежом принимают:

For foreign subscribers:
ЗАО МК-Периодика. E-mail: info@periodicals.ru;

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

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