

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 681.208

Л. В. Соколов, канд. техн. наук, доц.,
НИИ Авиационного оборудования,
В. М. Школьников, д-р техн. наук, проф.,
МАИ им. С. Орджоникидзе

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫЙ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ С ТРЕХМЕРНОЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МЕМБРАННОЙ СТРУКТУРОЙ И ДАТЧИК ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ НА ЕГО ОСНОВЕ

На основе разработанного кремниевого термокомпенсированного тензопреобразователя мембранного типа изготовлены датчики перепада давления повышенной точности для измерения распределения статического давления при испытаниях моделей авиационной техники в аэродинамической трубе.

Снижение основной погрешности измерений достигается оптимизацией трехмерной микромеханической конструкции кремниевого тензопреобразователя, а снижение температурной погрешности обеспечивается сформированной в чипе тензопреобразователя транзисторно-резисторной схемой термокомпенсации и калибровки.

Введение

Сенсор как интегральный преобразователь входного неэлектрического параметра в электрический сигнал является ключевым элементом любой информационно-измерительной и управляющей системы, так как именно его точностные характеристики определяют прецизионность всей системы [1].

Мероприятиями Федеральной целевой программы на 2000—2006 гг. в разделе "Развитие технологической базы и создание конкурентоспособных ИЭТ" предусмотрены исследование и разработка базовых технологий и конструктивных принципов создания изделий микромехатроники для высокоинтегрированных интеллектуальных микросистем [2].

Использование современных достижений технологии в области твердотельной микроэлектроники и пьезорезистивного эффекта в полупроводниках позволяет создавать тензопреобразователи механических параметров повышенной точности,

отличающиеся высоким уровнем выходного сигнала при малом потреблении электроэнергии, что делает возможным их применение, например, в информационно-вычислительных системах самолетов для определения высотно-скоростных параметров [1, 3—5].

Интегральные преобразователи давления (ИПД) относятся к "традиционным" изделиям микросистемотехники, а ИПД с трехмерными микромеханическими структурами, сформированными методами мехатронной технологии, являются в то же время изделиями микромехатроники [6—8].

По сравнению с емкостными ИПД пьезорезистивные ИПД обладают такими преимуществами, как низкий импеданс, меньшая восприимчивость к электромагнитным помехам, меньшие размеры [8].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований интегральных термокомпенсированных тензопреобразователей давления (ИТПД) с оптимизированной по минимальной погрешности нелинейности Y_H микромеханической структурой мембраны с жестким центром (Е-типа).

Основные вопросы проектирования и изготовления

За основу проектирования данного объекта микросистемной техники принимались конкретные технические требования обеспечения точности измерения статического давления воздуха как



Рис. 1. Электрическая схема транзисторно-резисторной термокомпенсации и калибровки для пьезорезистивного ИТПД перепада давления: R_1 — R_5 — интегральные тонкопленочные подгоночные резисторы; $R_{м1}$ — $R_{м4}$ — диффузионные пьезорезисторы измерительной мостовой схемы; VT — биполярный транзистор термокомпенсации

по основной, так и по температурной погрешностям при заданных параметрах чувствительности и значении напряжения питания в указанном диапазоне рабочих температур. Для обеспечения этих требований был спроектирован и изготовлен кремниевый ИПД с профилированной анизотропным травлением трехмерной микромеханической структурой на тонкой мембране, с транзисторной схемой термокомпенсации и тонкопленочной схемой калибровки, сформированными в одном и том же чипе (рис. 1, 2, 3). Микроэлектронные фотографии (рис. 2 и 3) получены с помощью электронного микроскопа PHILIPS SEM-515 при ускоряющем напряжении 16 кВ.

Оптимизация по минимальной погрешности нелинейности конструктивных параметров ИПД проводилась в соответствии с разработанным методом [9].

Одной из базовых технологий формирования объемных кремниевых микромеханических структур остается анизотропное травление кремния в водных растворах КОН [11].

Тонкая мембрана с жестким на изгиб центром формировалась методом глубинного анизотропного травления в плоскости (100) монокристаллического кремния *n*-типа в водном растворе КОН.

Методом диффузии формировались четыре объединенные в мост Уитстона пьезорезистора в форме меандров, ориентированные попарно в тангенциальном и радиальном направлениях и симметрично расположенные в близлежащих к границе заземления мембраны областях. При этом первоначальный разбаланс (35–50 мВ) обеспечивался прецизионным позиционированием пьезорезисторов,

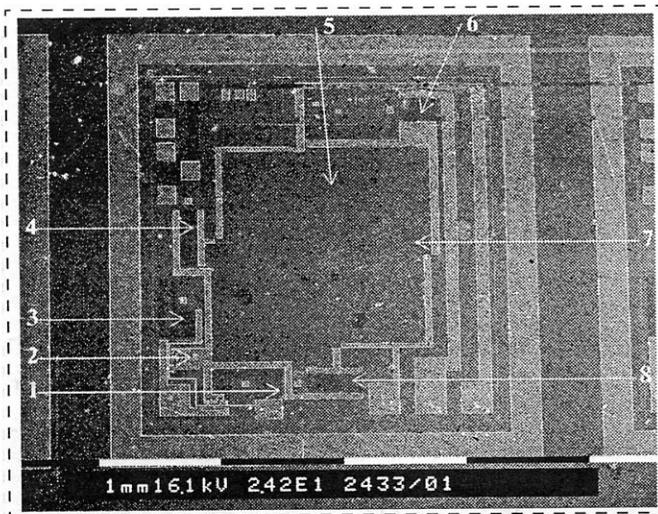


Рис. 2. РЭМ микроэлектронная фотография сенсорного ИПД с транзисторно-резисторной схемой термокомпенсации и калибровки (со стороны формирования схемы): 1, 3, 4, 6, 8 — тонкопленочные подгоночные резисторы; 2 — область расположения транзистора термокомпенсации; 5, 7 — области расположения одной пары пьезорезисторов (тангенциального и радиального соответственно)

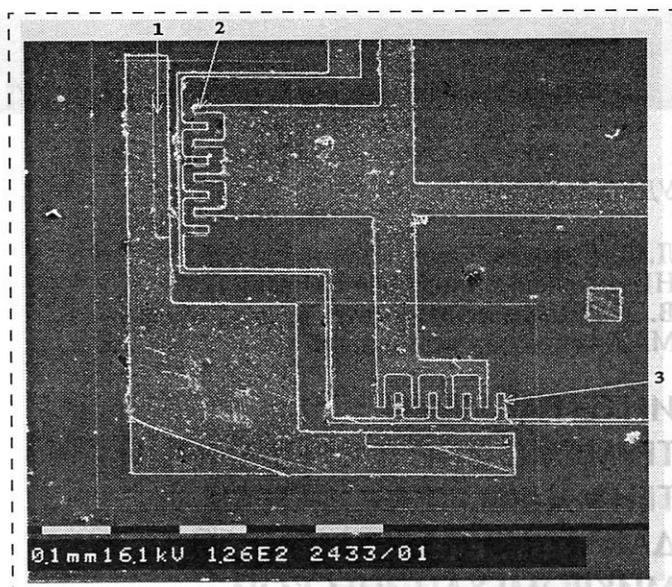


Рис. 3. РЭМ микроэлектронная фотография фрагмента ИПД с биполярным транзистором схемы термокомпенсации и калибровки:

1 — область расположения коллектора; 2 и 3 — база и эмиттер со встречно-штыревой структурой

а также максимально близкими коэффициентами температурного расширения (ТКР) слоев в структуре мембраны и оптимальным соотношением по толщине этих слоев.

Лазерной подгонкой резисторов на установке АМЦ-077 обеспечивался требуемый уровень термокомпенсации (с помощью резисторов R_{1*} , R_{2*}), балансировка мостовой схемы (с помощью резисторов R_{3*} , R_{4*}), нормирование выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (R_{5*}). После подгонки разбаланс принимал значение от единиц до десятков микровольт. В качестве материала тонкопленочных резисторов использовался резистивный сплав РС-3001, обладающий высокой удельной мощностью теплового рассеяния и низким ТКС.

Особенностью транзисторно-резисторной схемы термокомпенсации является разработанная топология транзистора с встречно-штыревой структурой эмиттер—база (рис. 3), создающая развитую площадь электрического перехода эмиттер—база при большой площади коллектора, а следовательно, уменьшение плотности тока через транзистор. Это позволяет свести к минимуму нагревание транзистора и его влияние на температурную погрешность ИПД.

Тензочувствительный модуль, состоящий из неразъемного соединения чипа кремниевого ИПД и опорного элемента из стекла группы "Пирекс", формировался на разработанном специальном технологическом оборудовании групповым методом электротермокомпрессионной сварки.

После подгонки резисторов и закрепления тензомодуля в доработанном под датчик перепада давле-

ния стандартном керамическом корпусе типа 402.16 проводились исследования метрологических характеристик и параметров датчиков, предназначенных для измерения статического давления при испытаниях моделей авиационной техники в аэродинамической трубе.

Испытательное оборудование и параметры датчиков

На основе разработанного кремниевого тензопреобразователя мембранного типа изготовлены датчики перепада давления повышенной точности для измерения распределения статического давления при испытаниях моделей авиационной техники в аэродинамической трубе.

Для испытаний и исследования лабораторных образцов датчиков использовалась высокоточная аппаратура и оборудование.

Автоматизированный градуировочный комплекс (АГК) позволяет задавать с требуемым шагом точную дозировку давления воздуха на входе датчиков по заданию, вводимому с клавиатуры ПЭВМ, и снимать преобразовательные характеристики датчиков с точностью 0,04 % групповым способом.

Закрепленные в специальных устройствах (типа пневмокоммутаторов) датчики помещались в камеру тепла—холода МС-81 с регулятором температуры "Табай" (модель РМ5-В2), поддерживающим в камере температуру с точностью 1,5 °С.

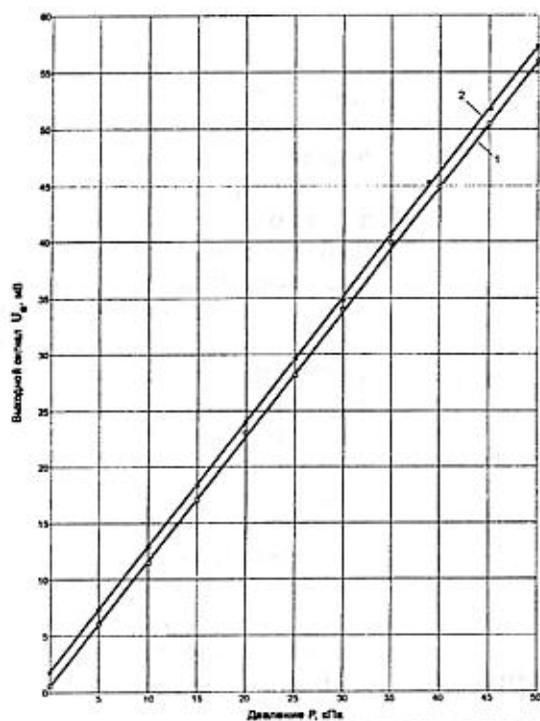


Рис. 4. Градуировочные характеристики пьезорезистивного термокомпенсированного датчика перепада давления для граничных значений температуры 10 °С (1) и 55 °С (2)

Напряжение $5 \pm 0,005$ В подавалось на датчики от стабилизированного источника питания Б5-46.

Расчет метрологических параметров проводился в соответствии с ГОСТ 22520-85.

Из градуировочных характеристик датчика (рис. 4), снятых в диапазоне измеряемых давлений для заданных граничных значений температуры 10 и 55 °С, следует, что в интервале температур 45 °С выходное напряжение и начальный разбаланс изменяются незначительно — не более, чем на 2 мВ. При этом с ростом температуры выходное напряжение не уменьшается. Для промежуточных температур градуировочные характеристики не показаны на рис. 4, поскольку они попадают в область между прямыми 1 и 2 и усложняют восприятие зависимостей из-за совпадения точек.

Допустимое значение погрешности, обусловленной влиянием изгибных термомеханических напряжений, достигается конструкцией тензочувствительного модуля, подбором согласованных по КТР материалов, способом крепления тензочувствительного модуля в корпусе датчика.

На рис. 5 показан характер изменения погрешности нелинейности датчика в диапазоне дифференциального давления 0—50 кПа. При этом значение погрешности нелинейности, полученное как среднее значение по результатам шести измерений, не превышает 0,2 % в интервале давлений от пороговых до номинальных.

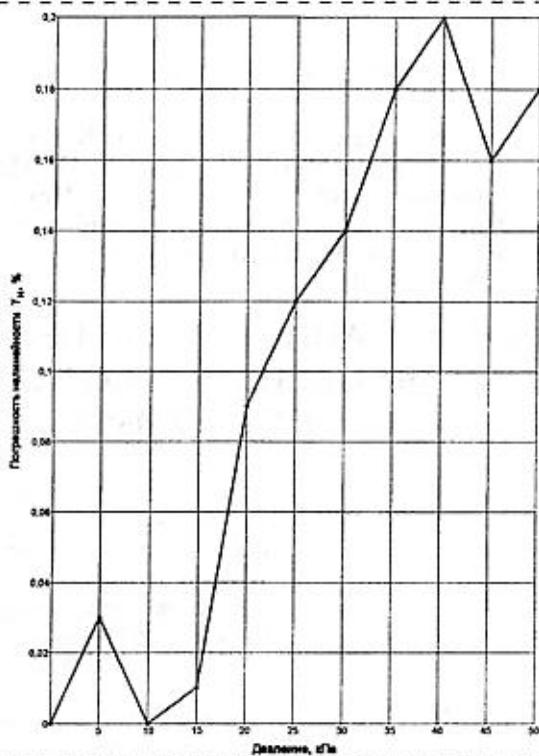


Рис. 5. Зависимость погрешности нелинейности от давления термокомпенсированного датчика перепада давления в полном диапазоне давлений

Основные технические характеристики датчика

Номинальное давление, кПа	50
Напряжение питания, В	6
Номинальный выходной сигнал, мВ	50
Сопротивление мостовой схемы, Ом	1300 ± 130
Температурный дрейф нуля, %/К, не более	0,05
Температурный коэффициент чувствительности, %/К, не более	0,02

Основные технические характеристики, приведенные выше, отвечают требованиям заказчика к датчику и достигнуты при использовании метода оптимизации трехмерной микромеханической конструкции кремниевого интегрального преобразователя и сформированной в чипе преобразователя транзисторно-резисторной схемы термокомпенсации и калибровки.

Для прецизионных ИТПД с часто используемой топологией мостовой измерительной схемы, когда тангенциальные пьезорезисторы расположены попарно на периферии и по контуру границы жесткого центра с мембраной, особенно важна симметрия распределения механических напряжений в локальных областях ИТПД, соответствующих зонам попарного расположения пьезорезисторов одного знака напряжений. Это в значительной степени обеспечивается прецизионной технологией формирования микромеханической структуры за-

данной геометрии и параметров, которая в большинстве случаев определяется экспериментально для каждого конкретного варианта.

Список литературы

1. Соколов Л. В., Школьников В. М. О техническом уровне современных интегральных датчиков давления для авиационных информационно-измерительных систем // Датчики и системы. 2001. № 4. С. 26–29.
2. Программные мероприятия. Развитие технологической базы и создание конкурентоспособных ИЭТ // с:\Мои документы\PROG 2010\ФЦП МО\Федеральная целевая программа.doc. 108 с.
3. Соколов Л. В. Полупроводниковые пьезорезистивные датчики давления // Зарубежная электронная техника. М.: ЦНИИ "Электроника". 1990. № 4. С. 68–95.
4. ЭИ № 20. Серия: Авиационные системы и приборы. 1990. С. 4–6.
5. Соколов Л. В. О новых исследованиях и разработках в области сенсорных МЭМС-устройств // Датчики и системы. 1999. № 3. С. 58–61.
6. Соколов Л. В. Твердотельные микроприборы и микросистемы с интегрированными микромеханическими структурами // Зарубежная электронная техника. М.: ЦНИИ "Электроника". 1998. № 2. С. 62–78.
7. Соколов Л. В. Сенсорные твердотельные микроприборы и микросистемы на основе MEMS-технологии // Зарубежная электронная техника. М.: ЦНИИ "Электроника". 1999. № 1. С. 93–115.
8. Соколов Л. В., Школьников В. М. Метод оптимизации микромеханической структуры кремниевого интегрального преобразователя давления Е-типа // Тез. докл. на третьей Международной научно-технической конференции "Электроника и информатика — XXI век" (Зеленоград, 22–24 ноября 2000 г.) М. 2000.
9. Scroder H. and Obermeier E. A new model for Si (100) convex corner undercutting in anisotropic KOH etching // J. Micro-mech. Microeng., 2000. Vol. 10, 2. P. 163–170.

УДК 001:542+548.58+661.887+546.185-325

Х. Д. Мохаммед, д-р хим. наук, В. А. Кутвицкий, М. А. Гольдштрах, канд. хим. наук, Л. П. Маслов, канд. хим. наук, О. В. Сорокина, канд. хим. наук, Л. Д. Исхакова, Московская Государственная Академия тонкой химической технологии имени М. В. Ломоносова
E-mail: tetran@deol.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВИСМУТА В КАЧЕСТВЕ ХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Предложен метод получения газочувствительных гетерогенных структур на основе висмутосодержащих соединений. Исследована чувствительность получаемых гетероструктур по отношению к сероводороду, аммиаку, влажности. Показана высокая чувствительность и хорошие метрологические характеристики гетероструктур по отношению к сероводороду ($C_{min} = 0,005 \text{ мг/м}^3$, $S_r = 0,05$), малые времена отклика (15 с) и релаксации (10 с).

В настоящее время все большую актуальность приобретает проблема мониторинга окружающей среды, в частности, контроль за состоянием атмосферы.

Наиболее перспективными приборами для решения этой задачи являются химические сенсоры как наиболее дешевые доступные портативные аналитиче-

ские приборы для непрерывного определения концентрации определяемого компонента в газе.

Важнейшим элементом таких датчиков служит чувствительный (активный) слой, изменение свойств которого при взаимодействии с определяемым газом приводит к формированию аналитического сигнала. Необходимая селективность может быть достигнута путем введения каталитически активных добавок в газочувствительный слой [1], в частности, гетерополисоединений (ГПС) с получением гетероструктуры, т. е. устойчивой матрицы одного соединения с диспергированными в ней активными частицами другого.

В этом качестве для создания активного слоя перспективно использовать висмутосодержащие соединения (в частности, германосилленит $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и германозв-

Основные технические характеристики датчика

Номинальное давление, кПа	50
Напряжение питания, В	6
Номинальный выходной сигнал, мВ	50
Сопротивление мостовой схемы, Ом	1300 ± 130
Температурный дрейф нуля, %/К, не более	0,05
Температурный коэффициент чувствительности, %/К, не более	0,02

Основные технические характеристики, приведенные выше, отвечают требованиям заказчика к датчику и достигнуты при использовании метода оптимизации трехмерной микромеханической конструкции кремниевого интегрального преобразователя и сформированной в чипе преобразователя транзисторно-резисторной схемы термокомпенсации и калибровки.

Для прецизионных ИТПД с часто используемой топологией мостовой измерительной схемы, когда тангенциальные пьезорезисторы расположены попарно на периферии и по контуру границы жесткого центра с мембраной, особенно важна симметрия распределения механических напряжений в локальных областях ИТПД, соответствующих зонам попарного расположения пьезорезисторов одного знака напряжений. Это в значительной степени обеспечивается прецизионной технологией формирования микромеханической структуры за-

данной геометрии и параметров, которая в большинстве случаев определяется экспериментально для каждого конкретного варианта.

Список литературы

1. Соколов Л. В., Школьников В. М. О техническом уровне современных интегральных датчиков давления для авиационных информационно-измерительных систем // Датчики и системы. 2001. № 4. С. 26–29.
2. Программные мероприятия. Развитие технологической базы и создание конкурентоспособных ИЭТ // с:\Мои документы\PROG 2010\ФЦП МО\Федеральная целевая программа.doc. 108 с.
3. Соколов Л. В. Полупроводниковые пьезорезистивные датчики давления // Зарубежная электронная техника. М.: ЦНИИ "Электроника". 1990. № 4. С. 68–95.
4. ЭИ № 20. Серия: Авиационные системы и приборы. 1990. С. 4–6.
5. Соколов Л. В. О новых исследованиях и разработках в области сенсорных МЭМС-устройств // Датчики и системы. 1999. № 3. С. 58–61.
6. Соколов Л. В. Твердотельные микроприборы и микросистемы с интегрированными микромеханическими структурами // Зарубежная электронная техника. М.: ЦНИИ "Электроника". 1998. № 2. С. 62–78.
7. Соколов Л. В. Сенсорные твердотельные микроприборы и микросистемы на основе MEMS-технологии // Зарубежная электронная техника. М.: ЦНИИ "Электроника". 1999. № 1. С. 93–115.
8. Соколов Л. В., Школьников В. М. Метод оптимизации микромеханической структуры кремниевого интегрального преобразователя давления Е-типа // Тез. докл. на третьей Международной научно-технической конференции "Электроника и информатика — XXI век" (Зеленоград, 22–24 ноября 2000 г.) М. 2000.
9. Scroder H. and Obermeier E. A new model for Si (100) convex corner undercutting in anisotropic KOH etching // J. Micro-mech. Microeng., 2000. Vol. 10, 2. P. 163–170.

УДК 001:542+548.58+661.887+546.185-325

Х. Д. Мохаммед, д-р хим. наук, В. А. Кутвицкий, М. А. Гольдштрах, канд. хим. наук, Л. П. Маслов, канд. хим. наук, О. В. Сорокина, канд. хим. наук, Л. Д. Исхакова, Московская Государственная Академия тонкой химической технологии имени М. В. Ломоносова
E-mail: tetran@deol.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВИСМУТА В КАЧЕСТВЕ ХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Предложен метод получения газочувствительных гетерогенных структур на основе висмутосодержащих соединений. Исследована чувствительность получаемых гетероструктур по отношению к сероводороду, аммиаку, влажности. Показана высокая чувствительность и хорошие метрологические характеристики гетероструктур по отношению к сероводороду ($C_{min} = 0,005 \text{ мг/м}^3$, $S_r = 0,05$), малые времена отклика (15 с) и релаксации (10 с).

В настоящее время все большую актуальность приобретает проблема мониторинга окружающей среды, в частности, контроль за состоянием атмосферы.

Наиболее перспективными приборами для решения этой задачи являются химические сенсоры как наиболее дешевые доступные портативные аналитиче-

ские приборы для непрерывного определения концентрации определяемого компонента в газе.

Важнейшим элементом таких датчиков служит чувствительный (активный) слой, изменение свойств которого при взаимодействии с определяемым газом приводит к формированию аналитического сигнала. Необходимая селективность может быть достигнута путем введения каталитически активных добавок в газочувствительный слой [1], в частности, гетерополисоединений (ГПС) с получением гетероструктуры, т. е. устойчивой матрицы одного соединения с диспергированными в ней активными частицами другого.

В этом качестве для создания активного слоя перспективно использовать висмутосодержащие соединения (в частности, германосилленит $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и германозв-

литин $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), образующие на поверхности при взаимодействии с ортофосфорной кислотой нерастворимый осадок-матрицу с высокоразвитой поверхностью и хорошей адгезией к подложке. Также известна способность катионов висмута к образованию гетерополисоединений, например на основе молибденфосфорной кислоты [2], широко используемых в гетерогенном катализе [3, 4]. Сочетание этих особенностей висмутсодержащих соединений дало возможность предложить относительно простой способ получения газочувствительных гетероструктур, состоящий из двух этапов:

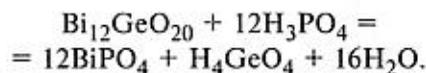
- получение слоя осадка-матрицы на поверхности висмутсодержащего оксидного соединения;
- модифицирование его, т. е. получение в объеме осадка активных центров на базе ГПС.

Первоначально исследовали процесс растворения висмутсодержащих соединений (германосилленита $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и германозелитина $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) в концентрированной (86%) ортофосфорной кислоте при постоянном перемешивании (частота вращения мешалки $\omega = 120 \text{ мин}^{-1}$) в температурном интервале 343–393 К. Размеры реакционной поверхности варьировали от 0,04 до 0,49 см^2 . Кинетические кривые $V_{\text{тр}} = f(\tau)$ для всех исследуемых условий имели характерный участок спада при увеличении времени, что обусловлено, очевидно, увеличением толщины слоя осадка и затруднением доступа частиц травителя к поверхности. Таким образом, лимитирующей стадией процесса травления должна была быть диффузия H_3PO_4 в слое осадка. Такое утверждение подтвердилось получением линейной зависимости обратной массы от обратного времени, согласно работам А. В. Николаева [5], и хорошо согласуется с рассчитанными по уравнению Аррениуса значениями энергии активации, лежащими в интервале 10–50 кДж/моль.

Диффузионный контроль процесса позволил получать равно-

мерные однородные слои осадка на подложках германосилленита. Анализ всех кинетических закономерностей и результаты исследования структуры осадка выявили, что для получения слоя с высокоразвитой поверхностью и достаточным уровнем адгезии процесс травления нужно проводить при постоянном перемешивании в течение 15 мин при 373 К, в качестве подложек использовать германосилленит. В этом случае толщина получаемой пленки нерастворимого продукта травления составляет 30–40 мкм, размер пор — порядка 0,1 мкм.

Состав осадка, образующегося на поверхности кристалла в результате взаимодействия с ортофосфорной кислотой, однозначно идентифицирован как ортофосфат висмута BiPO_4 методами рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-4-13 на $\text{Cu K}\alpha$ -излучении), комплексонометрического титрования и ИК спектроскопии (Фурье-спектрометр BRUCER JFFS-113V). Наряду с установленным фактом практически полного перехода германия в раствор (согласно совпадению в пределах погрешности концентраций германия, найденных из спектрофотометрических данных и рассчитанных по убыли масс образца) можно записать предполагаемое уравнение реакции:



Для получения гетероструктуры (модифицированного осадка травления) по результатам экспериментов было предложено последовательно обрабатывать полученный на подложке фосфат висмута (концентрации 0,02 моль/л) растворами парамолибдата аммония $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ и молибденфосфорной кислоты $\text{H}_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}$ с последующей 48-часовой сушкой при нормальной температуре и отжигом при 573 К в течение 2 ч (условия выбраны как оптимальные по результатам экспериментов). На дифрактограмме модифицированного таким образом слоя присутствуют линии, соответствующие BiPO_4 и 12-молибдофосфату аммония. Рассчитанный параметр кристаллической ячейки кубической сингонии составляет 1,166 нм, что характерно для ГПС. В ИК спектре присутствует интенсивная полоса поглощения в области 1400–1450 см^{-1} , характерная для деформационных колебаний N—H в ионе аммония NH_4^+ , которая отсутствует в ИК спектре молибденфосфорной кислоты и ИК спектре BiPO_4 , т. е. образование 12-молибдофосфата аммония $(\text{NH}_4)_3[\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}]$ в объеме осадка достоверно подтверждено методами ИК спектроскопии и рентгенофазового анализа (рис. 1).

На сформированную гетероструктуру сверху наносили контакты и исследовали чувствительность полученного сенсорного элемента

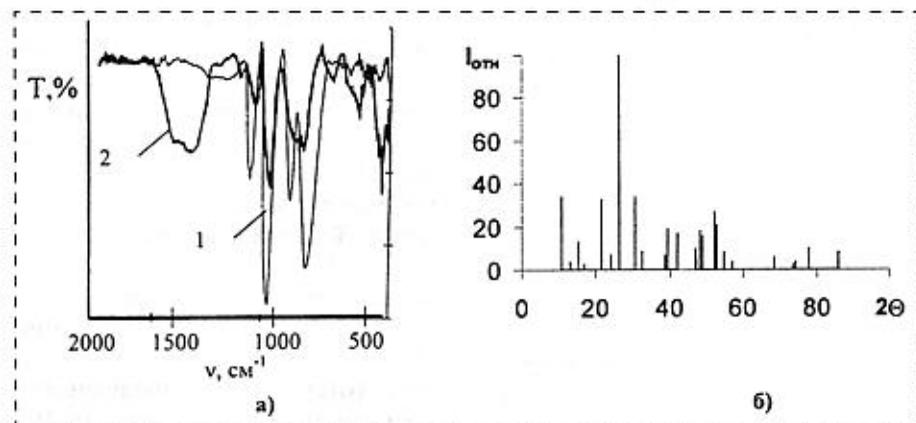


Рис. 1. Идентификация состава модифицированного слоя:

а — ИК спектр гетероструктуры (1 — спектр молибденфосфорной кислоты; 2 — спектр модифицированного слоя); б — штрих-диаграмма по данным рентгенофазового анализа

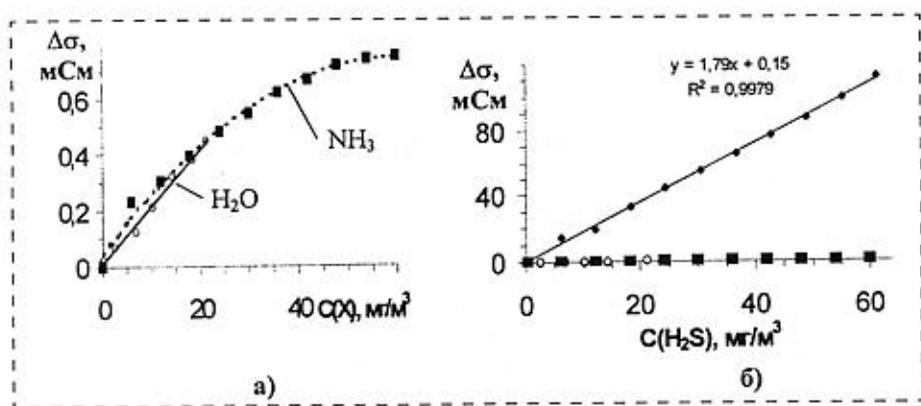


Рис. 2. Градуировочные характеристики газочувствительного слоя (гетероструктуры): а — по отношению к парам воды и аммиаку; б — к сероводороду на фоне сигнала к парам H₂O и NH₃

по отношению к парам воды, аммиаку, сероводороду. Для измерения сопротивления получаемых пленок использовали иммитансометр Е7-8 с электронной индикацией показаний. Измерительной ячейкой служила трехгорлая колба, в которой размещались сам датчик, термометр для контроля температуры газовой смеси и устройство ввода пробы (шприц). Таким образом, исследуемые компоненты получали в самой измерительной ячейке путем проведения химических реакций.

Для исследования чувствительности полученной гетероструктуры по отношению к парам воды использовали растворы серной кислоты различных концентраций ($\omega(\text{H}_2\text{SO}_4) = 0\div 24\%$ мас.).

Для изучения зависимости проводимости сенсора от концентрации NH₃ в воздухе в интервале до трех ПДК (0–60 мг/м³) дозировали раствор хлорида аммония точно известной концентрации в

колбу к раствору гидроксида натрия ($\omega(\text{NaOH}) = 13,25\%$ мас.).

Сероводород в интервале до шести ПДК (0–60 мг/м³) получали добавлением 0–5 мл с шагом 0,5 мл раствора сульфида натрия ($T(\text{Na}_2\text{S}) = 17,9\text{ мг/л}$) к серной кислоте ($\omega(\text{H}_2\text{SO}_4) = 7,76\%$ мас.).

Как видно из экспериментальных данных, для сероводорода достигается ярко выраженная селективность, так как сигнал $\Delta\sigma$ примерно на три порядка выше, чем для паров воды и аммиака (рис. 2). Также на основании градуировочного графика был рассчитан предел обнаружения сероводорода, который составил примерно 0,005 мг/м³, что ниже его ПДК в атмосфере (0,008 мг/м³) и существенно ниже ПДК рабочих зон (10 мг/м³).

Для оценки возможности применения газочувствительных слоев весьма важными параметрами являются время отклика и время релаксации. Они обуславливают быстродействие сенсора и возможность непрерывного контроля за составом газовой атмосферы. Проведенные эксперименты по изучению $\Delta\sigma = f(\tau)$ показали, что 90 % сигнала достигается в течение 15 с с момента поступления определяемого компонента в рабочий объем, а время релаксации системы после снятия возмущения (отсутствие определяемого компонента) не превышало 10 с (рис. 3). Следует подчеркнуть, что все данные получены для нормальной температуры, в то

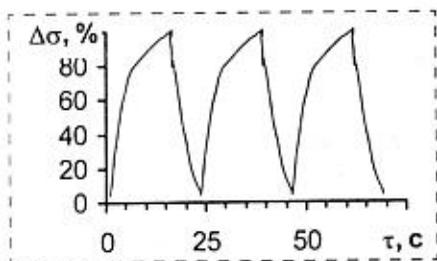


Рис. 3. Динамическая характеристика газочувствительного слоя (время отклика — релаксации), $C(\text{H}_2\text{S}) = 20\text{ мг/м}^3$

время как известные сенсоры релаксационного типа для получения примерно таких же результатов по селективности и временам отклика — релаксации требуют температур порядка 600 К [7; 8]. Была достигнута хорошая воспроизводимость результатов, стандартное отклонение S_r не превышало 0,05 (доверительная вероятность $P = 0,95$, число опытов $n = 9$). Для определения возможной лимитирующей стадии процесса взаимодействия полученной гетероструктуры с сероводородом были проанализированы зависимости проводимости от температуры в интервале от 293 до 333 К при содержании сероводорода 12–60 мг/м³ (рис. 4). Из данных $\ln\sigma = f(1/T)$ была рассчитана средняя энергия активации, равная примерно 60 кДж/моль (0,6 эВ). Такое значение, согласно литературным данным [1], свидетельствует о хемосорбции сероводорода на поверхности газочувствительного слоя.

Таким образом, гетероструктуры на основе висмутсодержащих соединений обладают хорошими сенсорными свойствами:

- низкой рабочей температурой;
- широким интервалом линейности;
- низкими временами отклика — релаксации;
- четко выраженной селективностью по отношению к сероводороду.

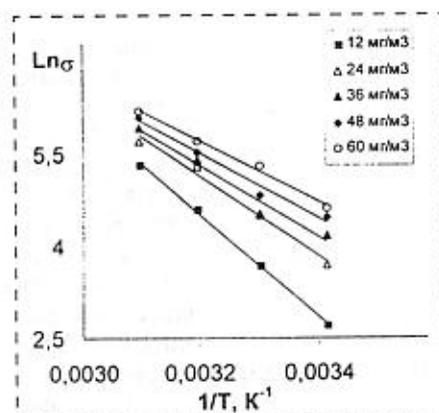


Рис. 4. Температурные зависимости проводимости газочувствительного слоя, $C(\text{H}_2\text{S}) = 12\div 60\text{ мг/м}^3$

Эти свойства позволяют рекомендовать их для контроля H_2S в воздухе рабочих и жилых зон.

Выводы

- ◆ На основании исследований процесса растворения висмутсодержащих соединений ($Bi_{12}GeO_{20}$, $Bi_4Ge_3O_{12}$) в ортофосфорной кислоте предложен способ получения газочувствительных гетероструктур, заключающийся:
 - в проведении процесса травления висмутсодержащего образца в H_3PO_4 для получения осадка заданной толщины с достаточным уровнем адгезии и высоко развитой поверхностью;
 - в модифицировании полученного нерастворимого продукта 12-молибдофосфатом аммония путем формирования его в объеме осадка.

- ◆ Определены хорошие газочувствительные свойства по отношению к парам воды и аммиака.
- ◆ Установлена высокая селективность полученной гетероструктуры к сероводороду по сравнению с парами воды и аммиаком, ее высокие метрологические характеристики (широкий интервал линейности, хорошая воспроизводимость результатов ($S_r = 0,05$), предел обнаружения — 5 мкг/м^3 для сероводорода), низкие значения времени отклика (15 с) и релаксации (10 с), что позволяет рекомендовать указанные структуры для использования в качестве сенсорных элементов при определении сероводорода в воздухе рабочих зон.

Список литературы

1. Мясников Н. А., Сухарев В. Я., Куприянов Л. Ю., Завьялов С. А. Полупро-

водниковые сенсоры в физико-химических исследованиях, М.: Наука. 1991. 327 с.

2. Hargis L. G. A spectrophotometric Reaction Rate Method for Determination of Bismuth Using a Dimetric Heteropolymolybdate // Analytical chemistry. 1969. V. 41. N 4. P. 597—599.

3. Mamoru Ai. Characteristics of heteropoly compounds as catalysts for selective oxidation // Journal Catal. 1981. V. 71. N 1. P. 88—98.

4. Awad A. M., Abd El-Salaam K. M. Action of salt formation on the bifunctional nature of 12-molybdophosphoric acid and their relationship to the catalytic activity // Croat. chem. acta. 1987. V. 60. N 4. P. 677—686.

5. Защитные пленки на солях. / Под ред. А. В. Николаева, АН СССР. 1944. 48 с.

6. Горюновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. Киев: Наукова думка. 1974. 820 с.

7. Ando M., Suto S., Suzuki T. и др. H_2S and CH_3SH sensor using a thick film of gold-loaded tungsten oxide // Chemistry Letters. 1994. N 2. P. 335—338.

8. Кисин В. В., Сысоев В. В., Воршилов С. А., Симакон В. В. и др. Металлоокисный датчик токсичных газов. // Тез. 1 Поволж. науч.-техн. конференции. 1995. Ч. 2. С. 55—56.

УДК 531.787.084.2

А. А. Федосеев,
ФГУП Научно-исследовательский институт
физических измерений (г. Пенза)

КРЕМНИЕВЫЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ СО ВСТРОЕННОЙ СХемой ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ПАРАМЕТРОВ

Описывается метод настройки полупроводникового чувствительного элемента для датчиков абсолютного и избыточного давлений с помощью расположенных непосредственно на чувствительном элементе металлопленочных резисторов, номинал которых формируется с использованием лазера.

Одна из главных задач, стоящих перед разработчиком датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) в настоящее время, заключается в снижении габаритных размеров изделия при одновременном повышении качества. Главными направлениями в решении этой задачи являются использование полупроводниковой технологии при изготовлении чув-

ствительного элемента (ЧЭ) ДПА и настройка его выходных характеристик (температурной стабилизации начального выходного сигнала и чувствительности, нормирование номинального выходного сигнала и др.). Изготовление ЧЭ из кремния с монокремниевыми тензорезисторами достаточно хорошо освоено [1], однако настройка выходных параметров часто проводится с помощью навесных дополнительных элементов, использование которых увеличивает габаритные размеры изделия и его стоимость.

В НИИ физических измерений были разработаны конструкция и технология изготовления полупроводникового интегрального ЧЭ для датчиков абсолютного и избыточного давлений (ЧЭ представляет собой кремниевый кристалл, соединенный со стеклянным основанием электростатическим способом), топология которого приведена на рис. 1, а. ЧЭ содержит монокремниевые тензорезисторы $R1-R4$, расположенные в областях наибольших поверхностных напряжений на мембране, терморезистор $R5$, нечувствительный к прикладываемому давлению, а также многослойные металлопленочные резисторы [2] $R6-R9$ из сплава $X20H75Ю + MP47BP$ с поверхностным удельным сопротивлением $50 \text{ Ом/}\square$, расположенные на пе-

Эти свойства позволяют рекомендовать их для контроля H_2S в воздухе рабочих и жилых зон.

Выводы

- ◆ На основании исследований процесса растворения висмутсодержащих соединений ($Bi_{12}GeO_{20}$, $Bi_4Ge_3O_{12}$) в ортофосфорной кислоте предложен способ получения газочувствительных гетероструктур, заключающийся:
 - в проведении процесса травления висмутсодержащего образца в H_3PO_4 для получения осадка заданной толщины с достаточным уровнем адгезии и высоко развитой поверхностью;
 - в модифицировании полученного нерастворимого продукта 12-молибдофосфатом аммония путем формирования его в объеме осадка.

- ◆ Определены хорошие газочувствительные свойства по отношению к парам воды и аммиака.
- ◆ Установлена высокая селективность полученной гетероструктуры к сероводороду по сравнению с парами воды и аммиаком, ее высокие метрологические характеристики (широкий интервал линейности, хорошая воспроизводимость результатов ($S_r = 0,05$), предел обнаружения — 5 мкг/м^3 для сероводорода), низкие значения времени отклика (15 с) и релаксации (10 с), что позволяет рекомендовать указанные структуры для использования в качестве сенсорных элементов при определении сероводорода в воздухе рабочих зон.

Список литературы

1. Мясников Н. А., Сухарев В. Я., Куприянов Л. Ю., Завьялов С. А. Полупро-

водниковые сенсоры в физико-химических исследованиях, М.: Наука. 1991. 327 с.

2. Hargis L. G. A spectrophotometric Reaction Rate Method for Determination of Bismuth Using a Dimetric Heteropolymolybdate // Analytical chemistry. 1969. V. 41. N 4. P. 597—599.

3. Mamoru Ai. Characteristics of heteropoly compounds as catalysts for selective oxidation // Journal Catal. 1981. V. 71. N 1. P. 88—98.

4. Awad A. M., Abd El-Salaam K. M. Action of salt formation on the bifunctional nature of 12-molybdophosphoric acid and their relationship to the catalytic activity // Croat. chem. acta. 1987. V. 60. N 4. P. 677—686.

5. Защитные пленки на солях. / Под ред. А. В. Николаева, АН СССР. 1944. 48 с.

6. Горюновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. Киев: Наукова думка. 1974. 820 с.

7. Ando M., Suto S., Suzuki T. и др. H_2S and CH_3SH sensor using a thick film of gold-loaded tungsten oxide // Chemistry Letters. 1994. N 2. P. 335—338.

8. Кисин В. В., Сысоев В. В., Воршилов С. А., Симаков В. В. и др. Металлоокисный датчик токсичных газов. // Тез. 1 Поволж. науч.-техн. конференции. 1995. Ч. 2. С. 55—56.

УДК 531.787.084.2

А. А. Федосеев,
ФГУП Научно-исследовательский институт
физических измерений (г. Пенза)

КРЕМНИЕВЫЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ СО ВСТРОЕННОЙ СХЕМОЙ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ПАРАМЕТРОВ

Описывается метод настройки полупроводникового чувствительного элемента для датчиков абсолютного и избыточного давлений с помощью расположенных непосредственно на чувствительном элементе металлопленочных резисторов, номинал которых формируется с использованием лазера.

Одна из главных задач, стоящих перед разработчиком датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) в настоящее время, заключается в снижении габаритных размеров изделия при одновременном повышении качества. Главными направлениями в решении этой задачи являются использование полупроводниковой технологии при изготовлении чув-

ствительного элемента (ЧЭ) ДПА и настройка его выходных характеристик (температурной стабилизации начального выходного сигнала и чувствительности, нормирование номинального выходного сигнала и др.). Изготовление ЧЭ из кремния с монокремниевыми тензорезисторами достаточно хорошо освоено [1], однако настройка выходных параметров часто проводится с помощью навесных дополнительных элементов, использование которых увеличивает габаритные размеры изделия и его стоимость.

В НИИ физических измерений были разработаны конструкция и технология изготовления полупроводникового интегрального ЧЭ для датчиков абсолютного и избыточного давлений (ЧЭ представляет собой кремниевый кристалл, соединенный со стеклянным основанием электростатическим способом), топология которого приведена на рис. 1, а. ЧЭ содержит монокремниевые тензорезисторы $R1-R4$, расположенные в областях наибольших поверхностных напряжений на мембране, терморезистор $R5$, нечувствительный к прикладываемому давлению, а также многослойные металлопленочные резисторы [2] $R6-R9$ из сплава $X20H75Ю + MP47BP$ с поверхностным удельным сопротивлением $50 \text{ Ом/}\square$, расположенные на пе-

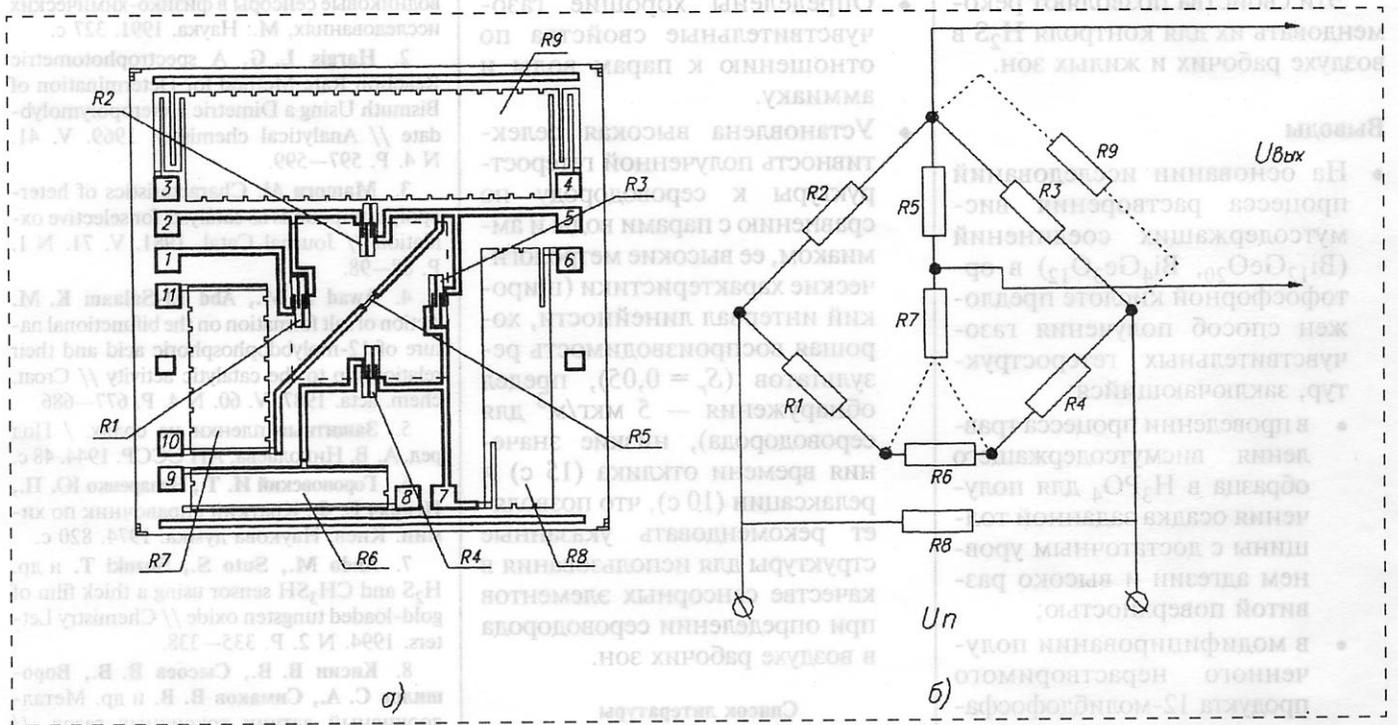


Рис. 1. Топология и электрическая схема ЧЭ

риферии ЧЭ, с помощью которых создается пассивная схема компенсации температурных погрешностей и нормирования выходного сигнала.

Электрическая схема датчика на основе такого ЧЭ представлена на рис. 1, б.

Принцип настройки ЧЭ основан на расчете необходимых номиналов резисторов R6—R9 и последующем их формировании путем подгонки лазером.

Разработанная технология производства ЧЭ представляет собой синтез полупроводниковой и металлопленочной технологий (напыление многослойного резистивного сплава на оксид кремния, формирование тонкопленочных резисторов и подгонка лазером их номиналов на кремниевом кристалле), применение которых позволяет создать ЧЭ датчиков давления, характеризующихся высокой чувствительностью (которая обеспечивается монокремниевыми тензорезисторами) и высокой температурной стабильностью (за счет стабильности металлопленочных резисторов, имеющих температурный коэффициент сопротивления порядка $5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$).

Ниже приводится последовательность настройки описываемого ЧЭ [3].

Исходные значения номиналов резисторов (после изготовления ЧЭ), Ом:

R1—R4	400—500
R5	3000—5000
R6	5—20
R7	70—130
R8	800—1200
R8	3000—5000

На первом этапе работ осуществляются балансировка и обеспечение температурной стабильности начального выходного сигнала с помощью резисторов R6 и R9. Определяются температурные коэффициенты тензорезисторов в диапазоне рабочих температур ЧЭ по формуле

$$\gamma_i = \frac{R_{i\max} - R_{i\min}}{R_{i\min} \Delta T}, \quad (1)$$

где $R_{i\max}$ — сопротивление тензорезистора R_i при максимальной температуре, Ом; $R_{i\min}$ — сопротивление тензорезистора R_i при минимальной температуре, Ом; ΔT — диапазон температур, $^\circ\text{C}$.

Далее определяются контрольные соотношения температурных коэффициентов сопротивлений по формулам:

$$C_1 = \frac{\gamma_1 + \gamma_3 - \gamma_2}{\gamma_4}; \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{\gamma_2 + \gamma_4 - \gamma_1}{\gamma_3}; \quad (3)$$

$$C_3 = \frac{\gamma_3 + \gamma_1 - \gamma_4}{\gamma_2}; \quad (4)$$

$$C_4 = \frac{\gamma_4 + \gamma_2 - \gamma_3}{\gamma_1}; \quad (5)$$

Контрольные соотношения температурных коэффициентов	Номер плеча для установки		Формулы для расчета		
	$R6$	$R9$	K	$R6$	$R9$
$C_1 > C_5$ $C_4 > C_5$	1	4	$\frac{\gamma_3 - \gamma_2}{2\gamma_4} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_3 - \gamma_2}{2\gamma_4}\right)^2 + \frac{R_1 R_3 \gamma_1}{R_2 R_4 \gamma_4}}$	$\frac{R_2 R_4}{R_3} K - R_1$	$R_4 \frac{K}{1 - K}$
$C_1 > C_6$ $C_4 > C_6$	4	1	$\frac{\gamma_2 - \gamma_3}{2\gamma_1} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_2 - \gamma_3}{2\gamma_1}\right)^2 + \frac{R_2 R_4 \gamma_4}{R_1 R_3 \gamma_1}}$	$\frac{R_1 R_3}{R_2} K - R_4$	$R_1 \frac{K}{1 - K}$
$C_4 < C_5$ $C_2 < C_6$	1	3	$\frac{\gamma_2 + \gamma_4}{\gamma_3 + \gamma_1 R_1 R_3 / R_2 R_4}$	$\frac{R_2 R_4}{R_3 K} - R_1$	$R_3 \frac{K}{1 - K}$
$C_1 < C_6$ $C_3 < C_5$	4	2	$\frac{\gamma_1 + \gamma_3}{\gamma_2 + \gamma_4 R_2 R_4 / R_1 R_3}$	$\frac{R_1 R_3}{R_2 K} - R_4$	$R_2 \frac{K}{1 - K}$
$C_4 > C_5$ $C_3 > C_5$	1	2	$\frac{\gamma_3 - \gamma_4}{2\gamma_2} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_3 - \gamma_4}{2\gamma_2}\right)^2 + \frac{R_1 R_3 \gamma_1}{R_4 R_2 \gamma_4}}$	$\frac{R_2 R_4}{R_3} K - R_1$	$R_2 \frac{K}{1 - K}$
$C_1 > C_6$ $C_2 > C_6$	4	3	$\frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2\gamma_3} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2\gamma_3}\right)^2 + \frac{R_2 R_4 \gamma_4}{R_1 R_3 \gamma_3}}$	$\frac{R_1 R_3}{R_2} K - R_4$	$R_3 \frac{K}{1 - K}$

$$C_5 = \frac{R_1 R_3}{R_2 R_4}; \quad (6)$$

$$C_6 = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}. \quad (7)$$

С учетом контрольных соотношений определяются расчетные значения резисторов $R6$ и $R9$, а также номера плеч, в которые их необходимо включить ($R6$ — последовательно, а $R9$ — параллельно). Соотношения и расчетные формулы приведены в таблице.

После расчета осуществляется подгонка номиналов на лазерной установке [4] согласно рис. 2.

Топологии резисторов рассчитаны таким образом, чтобы в ходе подгонки получать номиналы для резистора $R9$ в диапазоне 3000—45000 Ом, а

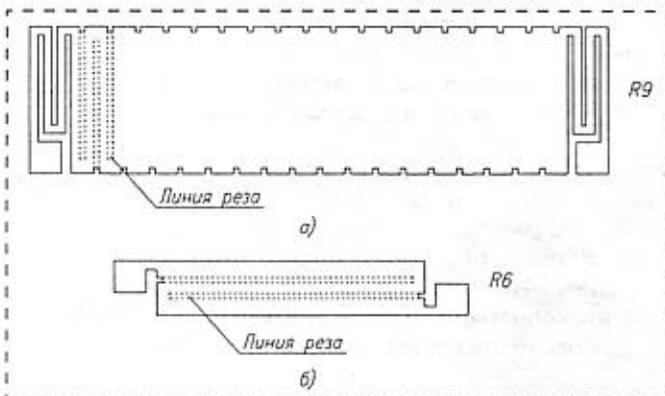


Рис. 2. Топологии резисторов $R9$ и $R6$ и их подгонка

для резистора $R6$ — в диапазоне 10—200 Ом. После подгонки резисторы включаются в схему.

На втором этапе работ осуществляется компенсация температурной погрешности чувствительности и нормирование номинального выходного сигнала с помощью резисторов $R7$ и $R8$, а также терморезистора $R5$.

Расчетное значение резистора $R7$ определяется по формуле

$$R_7 = \frac{U_{\text{ном. min}} R_{5 \text{ min}} (R_{\text{max. max}} - R_{5 \text{ max}}) - U_{\text{ном. max}} R_{5 \text{ max}} (R_{\text{max. min}} + R_{5 \text{ min}})}{U_{\text{ном. max}} R_{5 \text{ max}} - U_{\text{ном. min}} R_{5 \text{ min}}}, \quad (8)$$

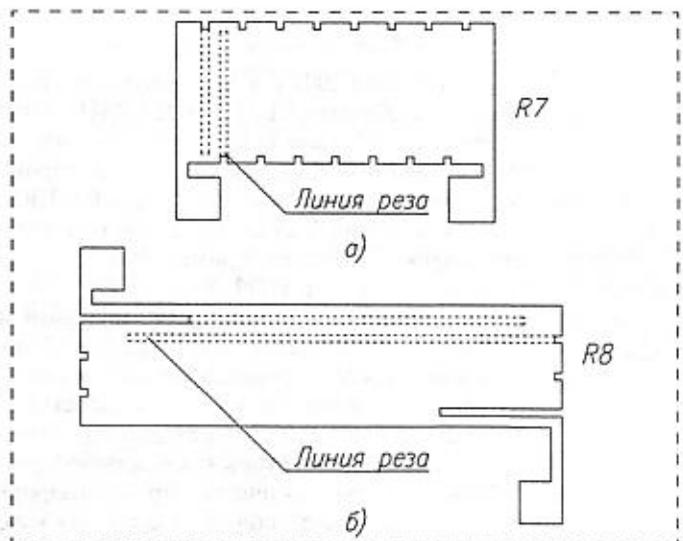


Рис. 3. Топологии резисторов $R7$ и $R8$ и их подгонка

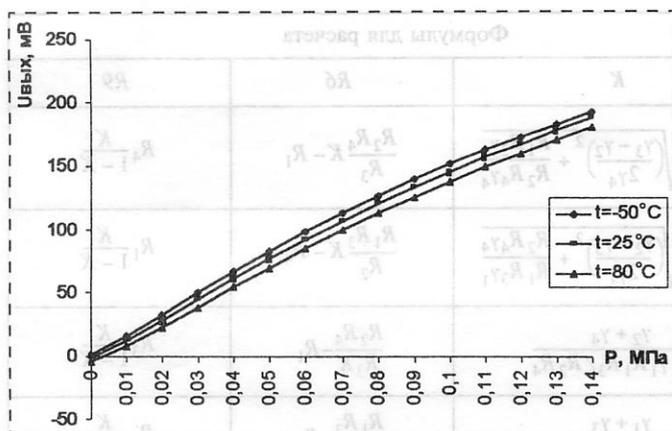


Рис. 4. Градуировочные характеристики ЧЭ после настройки

где $U_{\text{ном.мин}}$, $U_{\text{ном.мах}}$ — номинальный выходной сигнал при минимальной и максимальной температурах рабочего диапазона, мВ; $R_{5\text{мин}}$, $R_{5\text{мах}}$ — сопротивления терморезистора R_5 при минимальной и максимальной температурах рабочего диапазона, Ом; $R_{\text{вых.мин}}$, $R_{\text{вых.мах}}$ — выходные сопротивления мостовой схемы при минимальной и максимальной температурах рабочего диапазона.

Номинал резистора R_8 определяется путем его имитации магазином сопротивлений, включенном в схему согласно рис. 1 (номинал подбирается для установления номинального выходного сигнала при номинальном давлении).

После определения необходимых значений сопротивлений R_7 и R_8 их подгонка осуществляется согласно рис. 3.

Топологии резисторов рассчитаны таким образом, чтобы в ходе подгонки получать номиналы для резистора R_7 в диапазоне 100—3000 Ом, а для

резистора R_8 — в диапазоне 1000—10000 Ом. После подгонки резисторы включаются в схему.

На рис. 4 приведены градуировочные характеристики настроенного ЧЭ при различных температурах (толщина мембраны кристалла 20 мкм).

Настроенный ЧЭ имеет следующие характеристики:

- начальный выходной сигнал ± 5 мВ;
- температурный коэффициент начального выходного сигнала $0,025 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ от номинального сигнала;
- температурный коэффициент чувствительности $0,027 \text{ \%}/^\circ\text{C}$;
- погрешность номинального выходного сигнала $\pm 0,5 \text{ \%}$.

Достоинства описанного метода настройки в том, что он обеспечивает настройку ЧЭ непосредственно на кремниевом кристалле до сборки датчика и позволяет прогнозировать метрологические характеристики приборов на ранних стадиях изготовления. Одновременно снижаются габаритные размеры и стоимость датчиков за счет отказа от дополнительных настроечных резисторов.

Разработанная технология позволяет формировать любые дополнительные схемы настройки из высокостабильных металлопленочных резисторов непосредственно на кремниевых кристаллах или ЧЭ.

Список литературы

1. Ваганов В. И. Интегральные преобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
2. Патент РФ № 1820416, Н 01 С 17/00 "Способ изготовления высокотемпературного тонкопленочного тензорезистора".
3. Сгибов А. П., Трухачев Б. С., Носовский А. В. Температурная компенсация ухода нуля мостового тензопреобразователя // Приборы и системы управления. 1975. № 11. С. 24—26.
4. Лобко Э. В., Лобко С. И., Сакун Л. В., Шулаков В. А. Расчет и лазерная подгонка номиналов прецизионных резисторов // Электронная промышленность. 1986. № 4. С. 34—35.

16 октября 2001 г. в Наноцентре состоялся семинар Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ РАН), Института нанотехнологий Международного фонда конверсии, Московского государственного инженерно-физического института (технического университета) "Математическое моделирование процессов в нанотехнологиях и структурах" под председательством член-корр. РАН Ю. П. Попова.

На семинаре был сделан доклад на тему "Одностенные углеродные нанотрубки: синтез, физические свойства, применения". Докладчик Е. Д. Образцова (Центр естественно-научных исследований ИОФ РАН).

В докладе был охарактеризован новый наноструктурный углеродный материал — одностенные углеродные нанотрубки, дан обзор методов его синтеза и идентификации. Особое внимание уделено оптическим исследованиям нанотрубок (методами комбинационного рассеяния света и оптического поглощения) и возможности получения информации о структуре и электронных свойствах материала из оптических данных. Проанализирована возможность применения нанотрубок в качестве эффективного низковольтного эмиттера электронов и обсуждены технологические проблемы формирования пленочных углеродных катодов и изготовления источников света с такими катодами.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.371:551.46 + 551.526 + 615.47

В. Л. Вакс, К. П. Гайкович, д-р физ.-мат. наук,
А. Н. Резник, д-р физ.-мат. наук, Н. В. Юрасова,
Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород

БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ПОДПОВЕРХНОСТНАЯ СВЧ РАДИОТЕРМОМЕТРИЯ*

В тепловом радиоизлучении поглощающей среды обнаружен эффект ближнего поля. Эффект заключается в том, что эффективная глубина формирования принимаемого излучения d_{eff} оказывается меньше, чем толщина скин-слоя и зависит от размера D приемной антенны и ее высоты h над поверхностью среды. Зависимость $d_{eff}(D, h)$ была получена в результате измерений излучения температурно-стратифицированной водной среды на длине волны 31 см с использованием специально разработанной электрически малой антенны. Эффект использован как основа нового метода восстановления подповерхностного профиля температуры.

Введение

СВЧ радиометрические измерения теплового излучения широко используются для подповерхностной диагностики сред. В задачах определения температуры такие измерения находят вне конкуренции среди прочих дистанционных (неинвазивных) методов. В основе радиометрического метода лежит тот факт, что интенсивность теплового излучения пропорциональна средневзвешенной температуре в слое толщиной d_{eff} , в котором это излучение формируется. Изменение d_{eff} позволяет восстанавливать подповерхностный температурный профиль $T(z)$. Для этой цели ранее использовалась только зависимость d_{eff} от длины волны λ , т. е. восстановление $T(z)$ осуществлялось по данным измерений теплового излучения на нескольких длинах волн. Такой подход применялся в медицинских исследованиях, в диагностике плазмы, водной среды, грунта и т. д.

В [1] теоретически было показано, что ближнепольный (квазистационарный) компонент теплового излучения должен существенно влиять на интенсивность сигнала, измеряемого радиометром, если антенна имеет малые электрические размеры

*Результаты данной статьи получены по программе государственного контракта № 107-3 (00-П) и при поддержке РФФИ, грант № 01-02-16432.

$D \ll \lambda$ и расположена на высоте $h \ll \lambda$ над излучающей поверхностью. В этом случае d_{eff} определяется не только λ , но также и параметрами антенны D, h . Таким образом, появляется новая возможность управления величиной d_{eff} путем изменения параметров D и h . В данной статье представлены разработанная радиометрическая система для ближнепольных измерений, результаты исследования ближнепольных эффектов в тепловом излучении и восстановления подповерхностного температурного профиля среды по данным ближнепольных радиометрических измерений.

Измерения

Тепловое излучение измерялось радиометром на рабочей частоте $\nu_0 = 950$ МГц с шириной полосы приема $\Delta\nu = 200$ МГц и с уровнем флуктуационной чувствительности $\delta_T = 0,05$ К при постоянной интегрирования $\tau = 1$ с. Ключевым элементом приемной системы служила электрически малая антенна с размером $D = 1$ см ($D/\lambda = 0,03$), показанная на рис. 1. Она состоит из двух синфазных диполей, соединенных с симметричной полосковой линией, работающей как согласующий резонатор (прототип такой антенны описан в [2]). В качестве исследуемой среды была выбрана вода. В случае, когда антенна находилась в контакте с водной поверхностью ($h = 0$), она была согласована с входом радиометра так, что коэффициент отражения R , усредненный по частотной полосе приема радиометра $\Delta\nu$, не превосходил 0,03 (рис. 2).

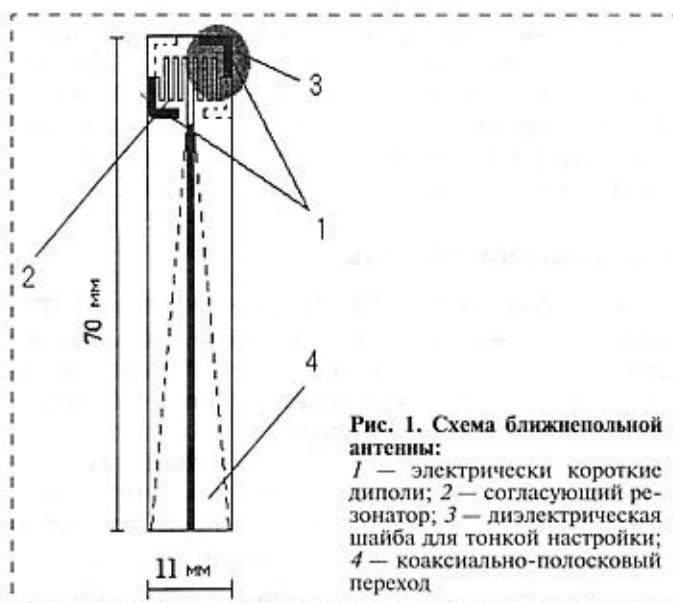


Рис. 1. Схема ближнепольной антенны:
1 — электрически короткие диполи; 2 — согласующий резонатор; 3 — диэлектрическая шайба для тонкой настройки; 4 — коаксиально-полосковый переход

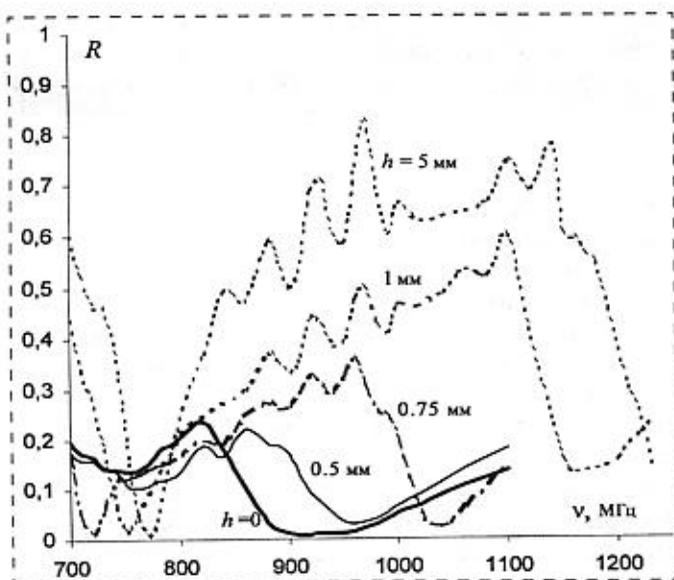


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения антенны для различных высот над поверхностью водной среды

Коэффициент отражения R , КПД η и чувствительность δT_b антенн были исследованы в зависимости от частоты и диэлектрических параметров измеряемой среды. Поскольку диэлектрические параметры воды сильно зависят от температуры и солености, исследовалась зависимость характеристик антенны от этих величин. Установлено, что коэффициент отражения антенны практически не зависит от температуры и солености воды в полосе частот радиометра $\nu_0 \pm \Delta\nu/2$. КПД антенны при $h = 0$ составил $\eta = 0,85$. Увеличение высоты приводит как к рассогласованию антенны (возрастанию R), так и к уменьшению η . Порог чувствительности к температурным вариациям возрастает от 0,06 К при $h = 0$ до 1 К при максимально возможной для измерений высоте $h_{\max} = 2,5$ мм. Дальнейшее уменьшение чувствительности при $h > h_{\max}$ сделало невозможными измерения на таких высотах. Таким образом, в отличие от аналогичных систем активной локации, известных как ближнепольные микроскопы, согласованная высокоэффективная антенна является необходимым компонентом ближнепольной радиометрической системы.

Ближнепольные эффекты

Для измерений d_{eff} путем использования нагревателя на поверхности и охладителя у дна цилиндрического сосуда создавался устойчивый квазилинейный профиль $T(z)$ (рис. 3). При этом удалось достичь значения стационарного градиента температуры $dT/dz = 2,5$ К/см. Для линейного $T(z)$ получено простое выражение для измеряемой яркостной температуры: $T_b = T(z = -d_{\text{eff}})$, которое и было использовано для определения d_{eff} . Поскольку диэлектрическая проницаемость воды ϵ удовле-

творяет условию $|\epsilon| \gg 1$, для волновой компоненты теплового излучения значение d_{eff} равно значению толщины скин-слоя $d_{sk} = \lambda / (4\pi \text{Im} \sqrt{\epsilon})$. Для ближнепольного компонента имеем $d_{\text{eff}}(D, h) < d_{sk}$. В наших измерениях было получено, что $d_{\text{eff}}(d = 1 \text{ см}, h = 0) \approx 0,5 d_{sk}$.

Выражение для эффективной яркостной температуры принимаемого на длине волны λ излучения может быть представлено в компактном виде:

$$T_b(h, D) = \int_{-\infty}^0 T(z) K(h, D, z) dz, \quad (1)$$

где h — высота антенны над поверхностью среды; D — эффективный размер антенны. Ядро K можно представить как сумму вкладов квазистационарного и волнового компонентов поля. Квазистационарный компонент преобладает, когда $D \ll \lambda$ и $h \ll \lambda$. В этом случае глубина слоя, который дает основной вклад в значение измеряемого теплового излучения в (1) (эффективная глубина формирования яркостной температуры)

$$d_{\text{eff}} = \left| \int_{-\infty}^0 z K(h, D, z) dz \right|,$$

может быть много меньше, чем величина скин-слоя поглощения d_{sk} . Волновой компонент доминирует, когда $D \geq \lambda$ или $h \geq \lambda$, тогда $d_{\text{eff}} \rightarrow d_{sk}$. В произвольном случае, когда принимаемое излучение включает оба компонента, d_{eff} будет зависеть от высоты антенны и ее размера, т. е.

$$d_{\text{eff}} = d_{\text{eff}}(h, D) < d_{sk}.$$

Интегральное уравнение (1) использовалось в [4] для вычислений яркостной температуры в целях постановки и численного моделирования решения обратной задачи восстановления температурного профиля по известной зависимости $T_b(D)$ или $T_b(h)$. Оно также используется ниже для расчетов T_b по известному профилю $T(z)$ для сравнения с экспериментальными результатами.

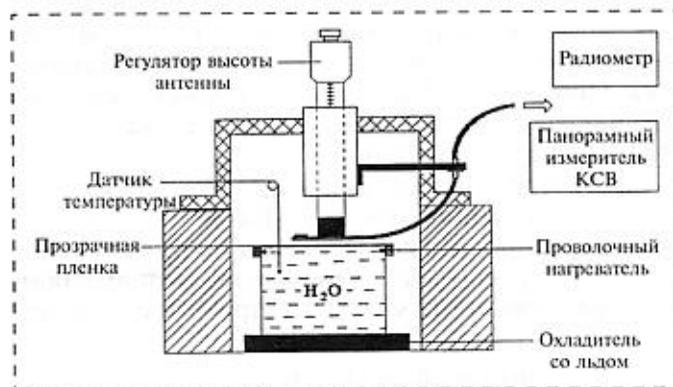


Рис. 3. Схема измерительной установки

Измерения температурно-стратифицированной водной среды проводились при трех значениях солености S : 0 , $1,8 \cdot 10^{-3}$ и $5,0 \cdot 10^{-3}$ г/см³. Значение солености $S = 1,8 \cdot 10^{-3}$ г/см³ является некоторой особой точкой, поскольку при этом значении на данной частоте толщина скин-слоя воды практически не зависит от температуры и среда может рассматриваться как однородная по диэлектрическим свойствам.

Вычисления T_b при других S также проводились в приближении однородной среды с постоянным по глубине значением диэлектрической проницаемости воды для температуры $T(z = -d_{eff})$. Самый существенный результат измерений состоит в том, что была зарегистрирована зависимость яркостной температуры T_b и эффективной толщины d_{eff} от размера и высоты антенны, и эти зависимости оказались в хорошем соответствии с вычисленными теоретически на основе (1) (см., в частности, рис. 4, а). Вычисленная и определенная по экспериментальным данным зависимость эффективной толщины

d_{eff} от солености воды при контактных измерениях ($h = 0$) вместе с аналогичной зависимостью скин-слоя поглощения d_{sk} представлены на рис. 4, б. Существенное различие между d_{eff} и d_{sk} является наиболее очевидным проявлением ближнеполюсного эффекта. Эти экспериментальные результаты доказывают наличие ближнеполюсной компоненты в принимаемом тепловом излучении среды [3].

Восстановление подповерхностного температурного профиля

Обнаруженная зависимость $d_{eff}(D, h)$ может быть использована для развития новых методов радиотепловой диагностики среды. В данной статье представлены первые результаты восстановления подповерхностного профиля температуры водной среды по измеренной зависимости $d_{eff}(D)$. Яркостная температура воды измерялась с использованием двух антенн размером $D = 1$ и 4 см в процессе нагревания водной поверхности проволочным нагревателем (рис. 5). Дополнительно к этим изме-

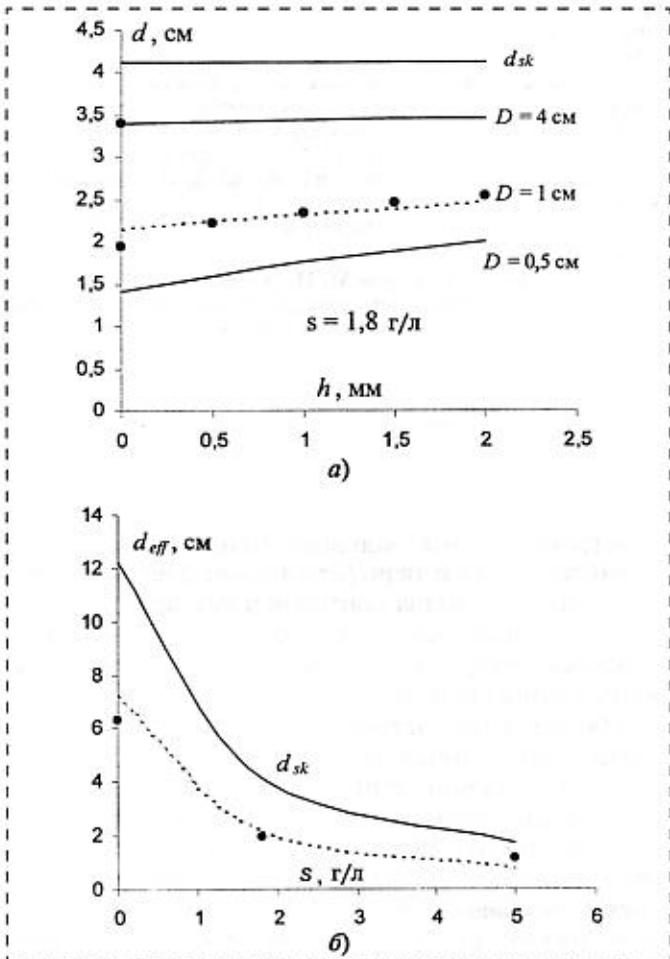


Рис. 4. Эффективная толщина d_{eff} : а — в зависимости от высоты антенны при различных размерах антенны (кружки — измерения; линии — результаты расчетов); б — измеренная (кружки) и рассчитанная (пунктир) зависимости от солености S воды (сплошная линия — вычисленная зависимость толщины скин-слоя поглощения)

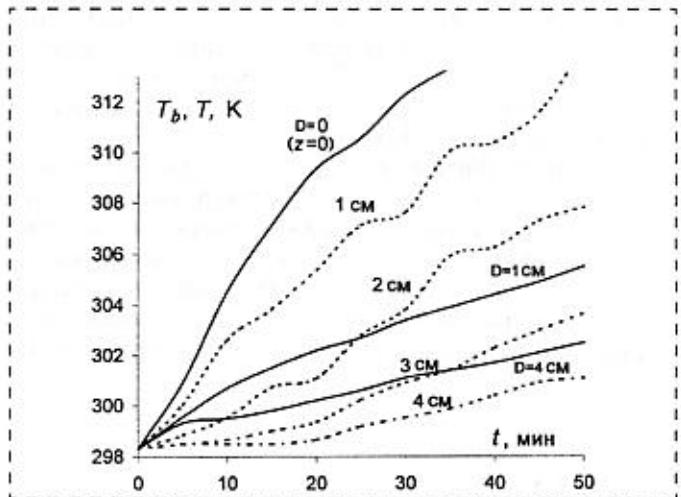


Рис. 5. Измерения динамики яркостной температуры (сплошные линии) и прямые измерения динамики температуры на различных уровнях в толще воды (пунктир)

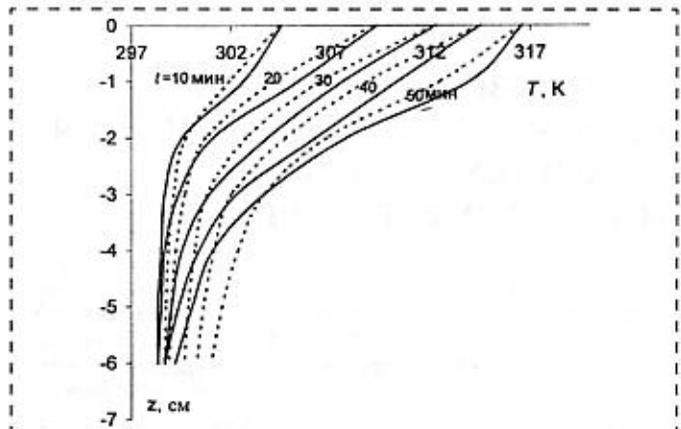


Рис. 6. Профили $T(z)$, восстановленные с интервалом 10 мин по измерениям $T_b(D)$ — пунктирные линии; профили $T(z)$, измеренные контактным термометром — сплошные

рениям (рис. 6) для восстановления профиля использовались прямые измерения поверхностной температуры воды $T(z=0)$ в качестве данных при нулевом размере антенны $D=0$, поскольку $T_b(D=0) = T(z=0)$. Алгоритм и программа для восстановления $T(z)$ из решения интегрального уравнения (1) был разработан на основе теории некорректных обратных задач Тихонова [4]. Восстановленные профили $T(z)$ в процессе нагревания поверхностного слоя воды показаны на рис. 6 вместе с профилями, полученными путем контактных измерений температуры. Можно видеть, что точность восстановления $T(z)$ составила $\sim(0,5-1)$ К при $0 < z < d_{sk} \approx 4$ см.

Заключение

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода может быть связано с увеличением чувствительности радиометрической системы на высотах антенны $h > h_{\max}$ (в наших измерениях $h_{\max} = 2,5$ мм), а также с уменьшением размера антенн (в область размеров $D < 1$ см). Для увеличения высоты необходимо добиться согласования антенны на произвольной высоте, что не является принципиальной проблемой. Однако КПД электрически малых антенн неизбежно уменьшается с ростом h/λ и уменьшением D/λ . Возможным подходом к решению этой проблемы является улучшение конструкции миниатюрных антенн и использование материалов с предельно низкими омическими потерями, таких как высокотемпературные сверхпроводники. Эффективность этих материалов с точки зрения миниатюризации антенн исследовалась в [5, 6]. Наши предварительные оценки показывают,

что ближнепольные радиометрические измерения возможны в интервале высот антенны $0 < h/\lambda < 0,1$ и при размерах $D/\lambda > 0,01$. Тогда эффективную толщину слоя, в котором формируется принимаемое излучение, можно будет варьировать в диапазоне $0,2d_{sk} < d_{eff} < d_{sk}$. Предложенный метод одноволнового подповерхностного зондирования температуры может оказаться более простым в практической реализации по сравнению с известными многочастотными методами [7].

Список литературы

1. Резник А. Н. Квазистационарное поле теплового излучения в теории контактной радиотермометрии // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 5. С. 512–517.
2. Абрамов В. И., Резник А. Н. Миниатюризация вибраторной сверхпроводниковой антенны // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 2. С. 158–167.
3. Гайкович К. П., Резник А. Н. Эффект ближнего поля теплового радиоизлучения // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 2. Вып. 11. С. 792–796.
4. Gaikovich K. P., Reznik A. N. Near-field subsurface radiothermometry // 8-th International Conf. "Microwave and Telecommunication Technology" (Crimea, Ukraine, September 14–17, 1998, Sevastopol), Sevastopol: Veber Co., Conference Proceedings. 1998. V. 2. P. 629–630.
5. Климов А. Ю., Красильник З. Ф., Резник А. Н., Абрамов В. И. и др. Миниатюрная высокотемпературная сверхпроводящая антенна СВЧ диапазона // Сверхпроводимость: Физ., Хим., Техн. 1993. Т. 6. № 11–12. С. 2150–2159.
6. Абрамов В. И., Климов А. Ю., Резник А. Н., Тагунов Б. Б. Электрически малая полосковая антенна из высокотемпературного сверхпроводника // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 19. С. 60–65.
7. Гайкович К. П., Сумин М. И., Троицкий Р. В. Определение глубинного профиля температуры методом многочастотной радиотермографии в медицинских приложениях // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 9. С. 1104–1112.

УДК 621.3

Г. И. Леонович, д-р техн. наук,
С. А. Матюнин, канд. техн. наук,
Самарский государственный аэрокосмический
университет им. С. П. Королева

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ В ДАТЧИКАХ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматриваются датчики линейных и угловых перемещений, основанные на методе спектрального взаимодействия. Датчики реализованы на волоконно-оптических элементах, имеют спектральное уплотнение канала связи.

Использование метода спектрального взаимодействия элементов многокомпонентной оптической структуры (МОС) позволяет реализовать как датчики линейных и угловых перемещений [4], так

и устройства спектрального уплотнения каналов связи датчиков с периферийными электронными блоками, устройства контроля и коррекции источников погрешностей датчиков (погрешности от перекося кодирующего устройства, люфтов в элементах привода и др.).

На рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) показан позиционный датчик угловых перемещений вала с подвижной кодирующей маской. В датчике реализована функция спектрального уплотнения волоконно-оптического канала связи [1, 2]. Датчик состоит из источника излучения 1, диафрагмы 2, двух спектроформирующих элементов (СФЭ) 3, 6, N -разрядной кодирующей маски 4, закрепленной на валу 5, фоклина 7, волоконно-оптического кабеля 8, оптического демультиплексора 9, приемников излучения 10 и блока электроники 11. Осветитель 1 с помощью диафрагмы 2 формирует точечный источник светового потока, который через первый спектроформирующий элемент 3, распо-

рениям (рис. 6) для восстановления профиля использовались прямые измерения поверхностной температуры воды $T(z=0)$ в качестве данных при нулевом размере антенны $D=0$, поскольку $T_b(D=0) = T(z=0)$. Алгоритм и программа для восстановления $T(z)$ из решения интегрального уравнения (1) был разработан на основе теории некорректных обратных задач Тихонова [4]. Восстановленные профили $T(z)$ в процессе нагревания поверхностного слоя воды показаны на рис. 6 вместе с профилями, полученными путем контактных измерений температуры. Можно видеть, что точность восстановления $T(z)$ составила $\sim(0,5-1)$ К при $0 < z < d_{sk} \approx 4$ см.

Заключение

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода может быть связано с увеличением чувствительности радиометрической системы на высотах антенны $h > h_{\max}$ (в наших измерениях $h_{\max} = 2,5$ мм), а также с уменьшением размера антенн (в область размеров $D < 1$ см). Для увеличения высоты необходимо добиться согласования антенны на произвольной высоте, что не является принципиальной проблемой. Однако КПД электрически малых антенн неизбежно уменьшается с ростом h/λ и уменьшением D/λ . Возможным подходом к решению этой проблемы является улучшение конструкции миниатюрных антенн и использование материалов с предельно низкими омическими потерями, таких как высокотемпературные сверхпроводники. Эффективность этих материалов с точки зрения миниатюризации антенн исследовалась в [5, 6]. Наши предварительные оценки показывают,

что ближнепольные радиометрические измерения возможны в интервале высот антенны $0 < h/\lambda < 0,1$ и при размерах $D/\lambda > 0,01$. Тогда эффективную толщину слоя, в котором формируется принимаемое излучение, можно будет варьировать в диапазоне $0,2d_{sk} < d_{eff} < d_{sk}$. Предложенный метод одноволнового подповерхностного зондирования температуры может оказаться более простым в практической реализации по сравнению с известными многочастотными методами [7].

Список литературы

1. Резник А. Н. Квазистационарное поле теплового излучения в теории контактной радиотермометрии // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 5. С. 512–517.
2. Абрамов В. И., Резник А. Н. Миниатюризация вибраторной сверхпроводниковой антенны // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 2. С. 158–167.
3. Гайкович К. П., Резник А. Н. Эффект ближнего поля теплового радиоизлучения // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 2. Вып. 11. С. 792–796.
4. Gaikovich K. P., Reznik A. N. Near-field subsurface radiothermometry // 8-th International Conf. "Microwave and Telecommunication Technology" (Crimea, Ukraine, September 14–17, 1998, Sevastopol), Sevastopol: Veber Co., Conference Proceedings. 1998. V. 2. P. 629–630.
5. Климов А. Ю., Красильник З. Ф., Резник А. Н., Абрамов В. И. и др. Миниатюрная высокотемпературная сверхпроводящая антенна СВЧ диапазона // Сверхпроводимость: Физ., Хим., Техн. 1993. Т. 6. № 11–12. С. 2150–2159.
6. Абрамов В. И., Климов А. Ю., Резник А. Н., Тагунов Б. Б. Электрически малая полосковая антенна из высокотемпературного сверхпроводника // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 19. С. 60–65.
7. Гайкович К. П., Сумин М. И., Троицкий Р. В. Определение глубинного профиля температуры методом многочастотной радиотермографии в медицинских приложениях // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 9. С. 1104–1112.

УДК 621.3

Г. И. Леонович, д-р техн. наук,
С. А. Матюнин, канд. техн. наук,
Самарский государственный аэрокосмический
университет им. С. П. Королева

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ В ДАТЧИКАХ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматриваются датчики линейных и угловых перемещений, основанные на методе спектрального взаимодействия. Датчики реализованы на волоконно-оптических элементах, имеют спектральное уплотнение канала связи.

Использование метода спектрального взаимодействия элементов многокомпонентной оптической структуры (МОС) позволяет реализовать как датчики линейных и угловых перемещений [4], так

и устройства спектрального уплотнения каналов связи датчиков с периферийными электронными блоками, устройства контроля и коррекции источников погрешностей датчиков (погрешности от перекоса кодирующего устройства, люфтов в элементах привода и др.).

На рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) показан позиционный датчик угловых перемещений вала с подвижной кодирующей маской. В датчике реализована функция спектрального уплотнения волоконно-оптического канала связи [1, 2]. Датчик состоит из источника излучения 1, диафрагмы 2, двух спектроформирующих элементов (СФЭ) 3, 6, N -разрядной кодирующей маски 4, закрепленной на валу 5, фоклина 7, волоконно-оптического кабеля 8, оптического демультиплексора 9, приемников излучения 10 и блока электроники 11. Осветитель 1 с помощью диафрагмы 2 формирует точечный источник светового потока, который через первый спектроформирующий элемент 3, распо-

ложенный под углом γ_1 к плоскости считывания, попадает на кодовую шкалу 4, установленную на поворотном валу 5.

В результате различия углов падения световых лучей на поверхность СФЭ каждой из N разрядных дорожек шкалы соответствует свой диапазон спектра излучения $\Delta\lambda_i = \lambda_1^i - \lambda_2^i$, где λ_1^i, λ_2^i — длины волн излучения, соответствующие внешней и внутренней границам i -го окна кодовой дорожки. Установка СФЭ под разными углами позволяет сдвинуть их спектральные характеристики на линейный участок их взаимодействия.

Для надежного разделения сигналов от соседних окон разрядных дорожек i, j по спектру необходимо выполнение условия: $\{\lambda_1^i, \lambda_2^i\} \neq \{\lambda_1^j, \lambda_2^j\}, i \neq j$.

С учетом этого для каждой разрядной дорожки получим:

$$\Delta\lambda_i = \lambda_0 \left[2 \sin \left(\frac{|\beta_1^i| + |\beta_2^i|}{2} - \gamma_0 \right) \right] \sin \left(\frac{|\beta_1^i| + |\beta_2^i|}{2} \right),$$

где β_1^i, β_2^i — углы падения светового потока на внешнюю и внутреннюю границы окна i -й разрядной дорожки. Значения углов падения световых лучей определяются конструктивными параметрами оптической системы и описываются формулой: $\beta_k^i = (R_k^i - R_0)/d$, где $k = 1, 2$; R_k^i, R_0 — внешний и внутренний радиусы нанесения окна i -й разрядной дорожки; R_0 — расстояние от оси вала до оптической оси диафрагмы; d — расстояние между диафрагмой и кодовой шкалой.

После кодовой шкалы световой поток с упорядоченным спектром через второй (антидифракционный) спектроформирующий элемент 6 (рис. 1) попадает на входной торец фоклина 7, концентрирующий торец которого с помощью световода 8 оптически связан с демультиплексором 9, который показан на рис. 2.

Демультиплексор [8] состоит из прозрачного основания 1 с нанесенным на него тонкопленочным световодом 2, содержит ряд призмных ответвителей 5 с узкополосными фильтрами 3, пропускающими излучение со строго определенными длинами волн $\{\lambda_1^i, \lambda_2^i\}$.

Число выходов оптического демультиплексора определяется числом разрядных дорожек кодовой маски. К выходам демультиплексора подключены разрядные приемники излучения 10 (см. рис. 1), каждый из которых воспринимает сигнал соответствующего спектрального диапазона. Электрические сигналы в блоке электроники 11 преобразуются в цифровой код перемещения. В результате введения спектроформирующих элементов достигается сокращение числа линий связи между оптическим блоком датчика и блоком электроники в N раз.

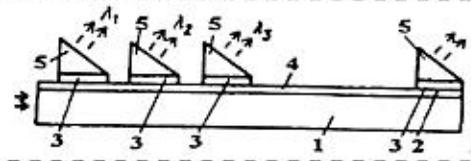


Рис. 2. Оптический демультиплексор

Другой вариант позиционного датчика угловых перемещений со спектральным кодированием [3] изображен на рис. 3, а (см. четвертую сторону обложки). Здесь применение спектрального кодирования позволяет значительно сократить рабочую зону кодовой шкалы, а значит, уменьшить чувствительность к перекосу кодовой маски. Кодовая шкала такого датчика выполнена в виде одностороннего комбинированного светофильтра, нанесенного на оптически прозрачную пластину. Световой поток от источника излучения 1 проходит через диспергирующий элемент (призму) 2 и кодовую шкалу 3 с нанесенным на нее комбинированным спектроформирующим элементом 4 и через световод 5 поступает на оптический демультиплексор 6. Блок приемников излучения 7 и блок электроники 8 осуществляют преобразование оптического сигнала в цифровой код положения кодовой шкалы 3.

Комбинированный СФЭ (рис. 3, б, см. четвертую сторону обложки) представляет собой многорезонансную узкополосную интерференционную систему и состоит из нанесенных на прозрачное основание 1 зеркальных четвертьволновых 3 и резонансной полуволновой 2 пленок, формирующих опорный слой кодовой дорожки. Порядок интерференции СФЭ выбирается так, чтобы в полосе чувствительности приемника излучения (ПИ) укладывалось необходимое число полос прозрачности интерференционной системы (по числу разрядов выбранного кода преобразования). На участки $1, 2, \dots, 2^i, \dots, 2^N$ кодовой дорожки с периодом $a_i = X_{\max}/2^i$ (где X_{\max} — максимальный диапазон измеряемых перемещений) наносятся дополнительные четвертьволновые зеркальные составляющие 3 шириной $a_i/2^i$. Эти составляющие вырезают из основных полос пропускания $\lambda_{m1}, \lambda_{m2}, \dots, \lambda_{mN}$,

Формирование кодовых комбинаций в оптоэлектронном датчике перемещений с двоичной шкалой спектрального кодирования

Выходной двоичный код			Наличие зеркальных отражающих слоев			Спектральный состав выходного излучения		
$i = 3$	$i = 2$	$i = 1$	λ_{m1}	λ_{m2}	λ_{m3}	λ_{m1}	λ_{m2}	λ_{m3}
0	0	0	+	+	+	-	-	-
0	0	1	-	+	+	+	-	-
0	1	0	+	-	+	-	+	-
0	1	1	-	-	+	+	+	-
1	0	0	+	+	-	-	-	+
1	0	1	-	+	-	+	-	+
1	1	0	+	-	-	-	+	+
1	1	1	-	-	-	+	+	+

соответствующих каждой разрядной дорожке, полосы, которые соответствуют двоичному коду положения кодовой маски. Такое расположение зеркальных составляющих позволяет осуществить спектральное кодирование светового потока, связанное с перемещением шкалы.

Для примера в таблице приведено соответствие между выходным кодом трехразрядного датчика и параметрами интерференционной системы.

Здесь в полосе чувствительности ПИ должны находиться три полосы пропускания интерференционной системы λ_{m1} , λ_{m2} , λ_{m3} . На основной слой кодовой дорожки с указанными полосами пропускания наносятся три дополнительных заграждающих четвертьволновых слоя. Первый слой, не пропускающий излучение с длиной волны λ_{m1} , наносится с периодом a_1 . На него с периодом $a_2 = 2a_1$ наносится слой, не пропускающий излучение с длиной волны λ_{m2} , и далее сверху с периодом

$a_2 = 4a_1$ наносится слой, не пропускающий излучение с длиной волны λ_{m3} .

Последовательное нанесение спектроформирующих элементов друг на друга в пределах одной дорожки позволяет достичь N -кратного сокращения рабочей зоны шкалы и совместить пространственное кодирование положения кодовой шкалы со спектральным кодированием передаваемой в блок электроники информации.

Список литературы

1. А. с. 1187270 SU Н 03 М 1/24. Преобразователь перемещения в код / Матюнин С. А., Леонович Г. И. № 3709343 // Открытия. Изобретения. 1985. Б. И. 39.
2. А. с. 1182672 SU, Н 03 М 1/24. Преобразователь перемещения в код / Матюнин С. А., Леонович Г. И. № 3709301 // Открытия. Изобретения. 1985. Б. И. 31.
3. А. с. 1254581 SU Н 03 М 1/24. Преобразователь перемещения в код / Леонович Г. И., Матюнин С. А., Матюнина Л. И. № 3775259 // Открытия. Изобретения. 1986. Б. И. 32.
4. Матюнин С. А. Многокомпонентные оптронные структуры. Самара: Изд. Самарского научного центра РАН. 2001 260 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 537.533

Н. В. Востоков, Д. М. Гапонова, В. М. Данильцев, М. Н. Дроздов, канд. физ.-мат. наук, Ю. Н. Дроздов, канд. физ.-мат. наук, А. В. Мурель, О. И. Хрыкин, В. И. Шашкин, канд. физ.-мат. наук, Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР СО СДВОЕННЫМИ СЛОЯМИ InGaAs ВБЛИЗИ ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ КРИТИЧЕСКУЮ ТОЛЩИНУ*

С помощью атомно-силовой микроскопии зарегистрированы различия поверхности структур со слоями InGaAs, выращенных на подложках GaAs(100) с отклонением 0,2 и 2°. Обсуждены возможные причины и варианты использования результатов для получения структур высокого качества.

Введение

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) широко используется в настоящее время для контроля морфологии поверхности полупроводниковых структур.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 01-02-16451, № 00-02-16486, № 00-02-16141, № 99-02-18037 и МНТП "Физика твердых наноструктур".

тур. Очевидно, что наблюдаемые дефекты поверхности частично связаны с дефектами внутренних активных слоев, хотя они и отделены от поверхности, поэтому АСМ может быть использована как чувствительный метод исследования структурных переходов в активных слоях. Эксперимент может проводиться на воздухе, *ex situ*, не требует препарирования образца. Вместе с тем, корректная интерпретация большого объема информации, заложенной в АСМ-изображении, возможна лишь с привлечением других методов, в рамках комплексного исследования структур.

В настоящей работе исследовались структуры со сдвоенными тонкими слоями (квантовыми ямами) InGaAs, выращенные методом газовой фазной эпитаксии на подложках GaAs(100). При создании структур на основе твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ часто стоит задача достижения максимальных концентраций In и толщины слоя. Превышение же некоторой концентрации при постоянной толщине, либо толщины при постоянной концентрации приводит к интенсивному дефектообразованию. В связи с этим область вблизи перехода через критическую толщину слоя представляет практический интерес. Несмотря на обилие исследований критической толщины слоев InGaAs на подложках GaAs(100) и теоретические оценки экспериментальные величины у разных авторов могут отличаться на порядок [1]. Такой фактор, как отклоне-

соответствующих каждой разрядной дорожке, полосы, которые соответствуют двоичному коду положения кодовой маски. Такое расположение зеркальных составляющих позволяет осуществить спектральное кодирование светового потока, связанное с перемещением шкалы.

Для примера в таблице приведено соответствие между выходным кодом трехразрядного датчика и параметрами интерференционной системы.

Здесь в полосе чувствительности ПИ должны находиться три полосы пропускания интерференционной системы λ_{m1} , λ_{m2} , λ_{m3} . На основной слой кодовой дорожки с указанными полосами пропускания наносятся три дополнительных заграждающих четвертьволновых слоя. Первый слой, не пропускающий излучение с длиной волны λ_{m1} , наносится с периодом a_1 . На него с периодом $a_2 = 2a_1$ наносится слой, не пропускающий излучение с длиной волны λ_{m2} , и далее сверху с периодом

$a_2 = 4a_1$ наносится слой, не пропускающий излучение с длиной волны λ_{m3} .

Последовательное нанесение спектроформирующих элементов друг на друга в пределах одной дорожки позволяет достичь N -кратного сокращения рабочей зоны шкалы и совместить пространственное кодирование положения кодовой шкалы со спектральным кодированием передаваемой в блок электроники информации.

Список литературы

1. А. с. 1187270 SU Н 03 М 1/24. Преобразователь перемещения в код / Матюнин С. А., Леонович Г. И. № 3709343 // Открытия. Изобретения. 1985. Б. И. 39.
2. А. с. 1182672 SU, Н 03 М 1/24. Преобразователь перемещения в код / Матюнин С. А., Леонович Г. И. № 3709301 // Открытия. Изобретения. 1985. Б. И. 31.
3. А. с. 1254581 SU Н 03 М 1/24. Преобразователь перемещения в код / Леонович Г. И., Матюнин С. А., Матюнина Л. И. № 3775259 // Открытия. Изобретения. 1986. Б. И. 32.
4. Матюнин С. А. Многокомпонентные оптронные структуры. Самара: Изд. Самарского научного центра РАН. 2001 260 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 537.533

Н. В. Востоков, Д. М. Гапонова, В. М. Данильцев,
М. Н. Дроздов, канд. физ.-мат. наук,
Ю. Н. Дроздов, канд. физ.-мат. наук,
А. В. Мурель, О. И. Хрыкин,
В. И. Шашкин, канд. физ.-мат. наук,
Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР СО СДВОЕННЫМИ СЛОЯМИ InGaAs ВБЛИЗИ ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ КРИТИЧЕСКУЮ ТОЛЩИНУ*

С помощью атомно-силовой микроскопии зарегистрированы различия поверхности структур со слоями InGaAs, выращенных на подложках GaAs(100) с отклонением 0,2 и 2°. Обсуждены возможные причины и варианты использования результатов для получения структур высокого качества.

Введение

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) широко используется в настоящее время для контроля морфологии поверхности полупроводниковых структур.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 01-02-16451, № 00-02-16486, № 00-02-16141, № 99-02-18037 и МНТП "Физика твердотельных наноструктур".

тур. Очевидно, что наблюдаемые дефекты поверхности частично связаны с дефектами внутренних активных слоев, хотя они и отделены от поверхности, поэтому АСМ может быть использована как чувствительный метод исследования структурных переходов в активных слоях. Эксперимент может проводиться на воздухе, *ex situ*, не требует препарирования образца. Вместе с тем, корректная интерпретация большого объема информации, заложенной в АСМ-изображении, возможна лишь с привлечением других методов, в рамках комплексного исследования структур.

В настоящей работе исследовались структуры со сдвоенными тонкими слоями (квантовыми ямами) InGaAs, выращенные методом газофазной эпитаксии на подложках GaAs(100). При создании структур на основе твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ часто стоит задача достижения максимальных концентраций In и толщины слоя. Превышение же некоторой концентрации при постоянной толщине, либо толщины при постоянной концентрации приводит к интенсивному дефектообразованию. В связи с этим область вблизи перехода через критическую толщину слоя представляет практический интерес. Несмотря на обилие исследований критической толщины слоев InGaAs на подложках GaAs(100) и теоретические оценки экспериментальные величины у разных авторов могут отличаться на порядок [1]. Такой фактор, как отклоне-

ние среза подложки, только начинает обсуждаться. В частности, авторами [2] показано, что в случае слоев InAs критическая толщина на 3°-срезе выше, чем на неотклоненном.

В настоящей статье с помощью АСМ проанализированы дефекты поверхности покрывающего слоя GaAs, связанные с толщиной отдельного внутреннего слоя InGaAs, температурой роста и отклонением среза подложки от (100). Структурные и оптические свойства слоев InGaAs контролировались методами рентгеновской дифрактометрии и фотолюминесценции.

Описание эксперимента

Эпитаксиальные слои выращивали методом металлоорганической газовой эпитаксии из соединений $\text{In}(\text{CH}_3)_3$, $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ и AsH_3 в вертикальном реакторе в потоке водорода при атмосферном давлении. Температура роста была $T_g = 500^\circ\text{C}$ (LT-структуры) или 600°C (HT). Нагрев подложкодержателя — индукционный. Подложками служили пластины GaAs(100) с отклонением 0,2 либо 2°. Структуры состояли из последовательности слоев GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs ($x \approx 0,35$). Промежуточный и покрывающий слои GaAs имели толщину около 14 нм, а толщина двух одинаковых слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ варьировалась. В ряде опытов для повышения корректности сравнения одновременно выращивали две структуры: на подложке с отклонением 0,2° — тип "А" и на подложке с 2°-срезом — тип "В". Сводные данные о структурах приведены в таблице.

Морфологию поверхности анализировали с помощью атомно-силового микроскопа Solver-P4 (NT-MDT, Россия) на воздухе. Рентгеновские дифракционные спектры регистрировали на дифрактометре ДРОН-4 в двухкристальной схеме с моно-

хроматором Ge(400) на излучении $\text{CuK}\alpha_1$. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измеряли при 77 К с Ag-лазером ($\lambda = 514 \text{ нм}$) в качестве источника света.

Результаты анализа

На рис. 1 приведены АСМ-изображения поверхности шести структур со шкалой высоты. Видно, что перепад высот поверхности больше на сильноотклоненном срезе по сравнению со слабоотклоненным и существенно (более, чем на порядок) возрастает при толщине слоя более 5 нм при температуре роста 600°C на 2°-срезе. В таблице приведены значения шероховатости поверхности, которые вычисляются как

$$R = \Sigma(h_i - h_{\text{mid}})/N,$$

где N — полное число точек на АСМ-изображении; h_i — высота в i -й точке; h_{mid} — среднее по всем h_i .

По своему строению сильно различаются поверхности на слабо- и сильноотклоненном срезе, но лишь при температуре роста 600°C . На слабоотклоненной подложке видны широкие ростовые террасы, разделенные ступенями с высотой ступе-

Данные о структурах и результаты измерений

Структура	$T_g, ^\circ\text{C}$	$\delta(100), ^\circ$	$h(\text{InGaAs}), \text{нм}$	$R, \text{нм}$	XRD-контраст	Пик PL, эВ
LT1A	500	0,2	9	0,15	+	1,118
LT1B	500	2	9	0,25	+	1,118
LT2A	500	0,2	12	0,6	+	—
LT3A	500	0,2	15	1,9	—	—
HT1A	600	0,2	4,5	0,11	+	1,196
HT1B	600	2	4,5	0,28	+	1,234
HT2A	600	0,2	6	0,19	+	1,17
HT2B	600	2	6	3,3	—	1,17
HT3A	600	0,2	8,5	0,39	+	1,16
HT3B	600	2	8,5	4,1	—	1,14

Примечания. T_g — температура роста; $\delta(100)$ — отклонение среза подложки; $h(\text{InGaAs})$ — толщина одного слоя $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$; R — шероховатость поверхности по данным АСМ; XRD-контраст — наличие интерференции между двумя слоями InGaAs в спектре рентгеновской дифракции; пик PL — положение пика фотолюминесценции.

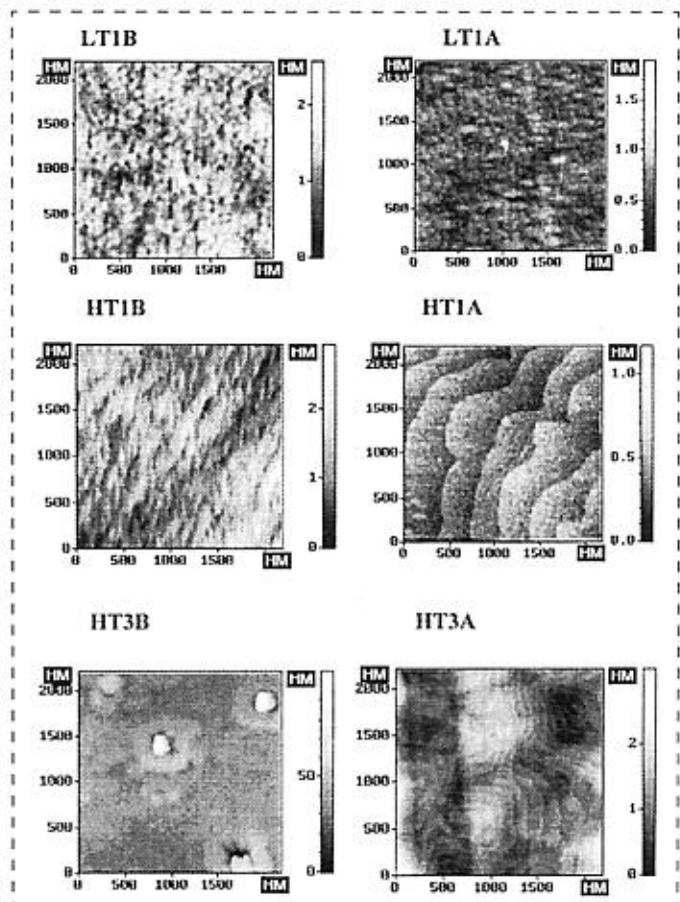


Рис. 1. Атомно-силовая микроскопия поверхности структур со шкалой высоты. Обозначения структур соответствуют таблице

ни около 0,3 нм. На сильноотклоненной — мелкий неоднородный рельеф и высокие выросты в случае слоев InGaAs с толщиной более 5 нм. Не показанные на рисунке поверхности структур HT2 "А" и "В" аналогичны соответственно HT3В.

Характерные рентгеновские дифракционные кривые качания в окрестности пика GaAs(400) приведены на рис. 2. Тонкому слою InGaAs с периодом решетки больше, чем у GaAs, соответствует слабый и широкий пик в сторону меньших брегговских углов от пика подложки. Наличие двух слоев, разделенных слоем GaAs, приводит к интерференционным осцилляциям, которые модулируют широкий пик одиночного слоя, если решетки слоев когерентны (см. спектры LT1, HT1, HT2А). Потеря когерентности приводит к пропаданию интерференционных осцилляций, что наблюдается для структур HT2В, HT3В, LT3А и частично для HT3А, LT2А. Сравнение спектров с вычисленными по динамической теории дало оценки концентрации индия и толщины слоев.

В спектрах фотолюминесценции наблюдается смещение пика в длинноволновую область (см. таблицу) в последовательности структур HT1-3, LT1, что связано с увеличением толщины квантовых ям. Для структур LT2, LT3 пик люминесценции отсутствует.

Обсуждение результатов

□ Рис. 1 наглядно демонстрирует возможность наблюдения с помощью АСМ ступеней роста на поверхности GaAs на воздухе, *ex-situ*, несмотря на окисление поверхности. Ступени связаны с вицинальным строением поверхности подложки [3], срезанной с некоторым отклонением (δ) от кристаллографической плоскости (100). Один монослой GaAs на (100) имеет высоту $h \approx 0,28$ нм (половина периода решетки), поэтому ширина терра-

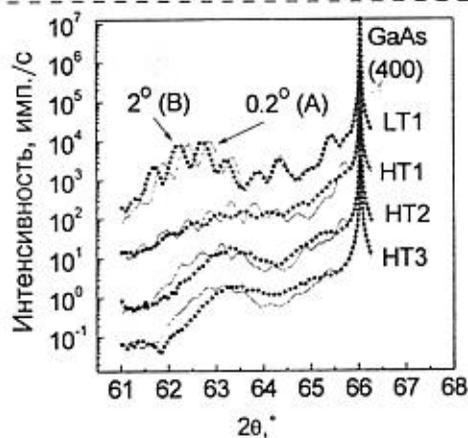


Рис. 2. Рентгеновские дифракционные кривые качания в окрестности пика GaAs(400). Точками обозначены кривые для 2°-среза, сплошной линией — для 0,2°-среза

сы (100) при монослойной ступени оценивается как $L_S = h/\sin\delta$ и составляет 80 нм для 0,2°-среза и 8 нм для 2°-среза. Наличие таких ступеней и террас на поверхности выращенных структур HTA однозначно свидетельствует о послойно-ступенчатом характере роста, при котором атомы встраиваются в край ступени и ступень в процессе роста движется по поверхности [3]. Послойно-ступенчатый рост для структур HT1А, HT2А сохранился до поверхности, т. е. на толщину более 100 монослоев InGaAs и GaAs без учета буферного слоя GaAs. В случае $\delta = 2^\circ$ ступени в наших условиях не регистрируются, хотя, по-видимому, характер роста и здесь послойно-ступенчатый.

□ При температуре роста 500 °С ступени на поверхности отсутствуют (см. LT1А на рис. 1). Высота неровностей рельефа остается низкой, слой InGaAs, по данным рентгеновской дифракции, когерентен, поэтому можно предположить различие в характере роста при высокой и низкой температуре. При температуре 600 °С длина поверхностной диффузии атомов (L_D) превышает ширину террасы, иначе невозможен был бы послойно-ступенчатый рост, а при 500 °С, видимо, $L_D < L_S$, атомы встраиваются на плоскость террасы, не успевая дойти до края. Рост остается послойным, о чем свидетельствует низкая шероховатость поверхности структуры LT1А, но преимущественно атомарно-послойным, при котором добавление нового слоя происходит не столько за счет продвижения ступеней в сумме на всю ширину поверхности подложки, сколько за счет заполнения террасы атомами до 100 %. Осциллирующий характер атомарно-послойного роста хорошо регистрируется в вакуумных установках эпитаксии по осцилляциям интенсивности рассеяния электронов и используется для определения параметров ростового процесса [4]. В газофазных реакторах возможности диагностики процессов существенно ограничены. Именно поэтому *ex situ* наблюдения очень важны для понимания процессов при газофазной эпитаксии, хотя многие заключения для своего доказательства нуждаются в более тщательном анализе.

□ Отклонение среза влияет на шероховатость поверхности структуры: во всех случаях на 2°-срезе шероховатость выше (см. таблицу). Влияет ли вицинальность на скорость роста и соотношение коэффициентов встраивания атомов In и Ga? При послойно-ступенчатом механизме роста угол отклонения среза определяет число ступеней и скорость движения ступени по поверхности. При одинаковой скорости наращивания монослоя скорость движения ступени на 0,2°-срезе должна быть в 10 раз больше, чем на 2°-срезе, и это может подавлять сегрегацию атомов In. По данным эксперимента, при 500 °С эффект, видимо, незначителен, поскольку пики фотолюминесценции струк-

тур LTA и LTB совпадают. Для 600 °С эффект заметен только для самых тонких слоев HT1A, B.

□ Экспериментальные данные показывают, что критическая толщина одного слоя InGaAs существенно зависит и от температуры роста, и от отклонения среза подложки. Известно, что в случае толстых слоев InGaAs превышение критической толщины приводит к сетке линий скольжения на поверхности, обусловленной наличием вертикальной компоненты вектора Бюргерса 60°-дислокации несоответствия [1–3]. В наших структурах на релаксированной поверхности не наблюдается поперечных штрихов, но факт превышения слоев критической толщины регистрируется по резкому увеличению шероховатости, пропаданию интерференции в спектре рентгеновской дифракции и снижению интенсивности люминесценции. Отсутствие сетки дислокации может быть связано с высоким содержанием индия, т. е. с большим рассогласованием периодов решеток, либо с малой толщиной слоя. Подробные данные для низкотемпературного роста на отклоненных срезах приведены нами в [5].

В количественном выражении переход наглядно представлен на графике зависимости АСМ-шероховатости (R) от толщины одного слоя InGaAs, h (рис. 3), где нанесены данные из таблицы и из работы [5]. Точки одной серии условно соединены прямыми линиями, хотя в области перехода зависимость может быть существенно нелинейной. Если в качестве критерия перехода выбрать $R > 0,3$ нм, то получим следующие оценки критической толщины слоя $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$ в двухслойной структуре: 5 нм — для 600 °С и $\delta = 2^\circ$; 8 нм — для 600 °С и $\delta = 0,2^\circ$; 10 нм — для 500 °С, $\delta = 0,2^\circ$ и $\delta = 2^\circ$. Эти значения несколько выше, чем приведенные в [6] 5 нм для структуры из двух слоев $\text{In}_{0,36}\text{Ga}_{0,64}\text{As}$, разделенных слоем GaAs 18 нм. Видимо, из-за

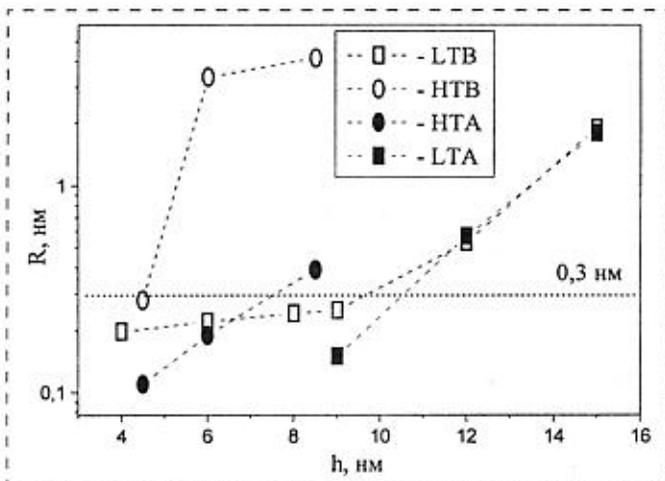


Рис. 3. Шероховатость поверхности структур (R) по данным атомно-силовой микроскопии в зависимости от толщины одного слоя $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$ (h); линия $R = 0,3$ нм — условно принятая граница перехода через критическую толщину слоя

того, что структура сильно неравновесная, при молекулярно-пучковой эпитаксии релаксационные процессы становятся заметны при меньших толщинах.

Повышение критической толщины с понижением температуры — факт хорошо известный и легко объяснимый, поскольку процессы дефектообразования носят термоактивационный характер и имеют определенную энергию активации. Практическое использование таких структур, тем не менее, ограничено в связи с ухудшением оптических свойств. В этих условиях использование слабоотклоненных срезов может предоставлять альтернативный путь увеличения толщины напряженного слоя InGaAs высокого качества.

Критическая толщина слоев InGaAs неоднократно исследовалась [1]. Наши результаты демонстрируют, что в этой задаче отклонение среза подложки является существенным фактором. В отличие от [2], наши данные говорят об увеличении критической толщины на слабоотклоненном срезе при температуре роста 600 °С. Причиной этого может быть различие механизмов перехода. Авторы [2] обсуждают дислокационный механизм: энергия образования дислокации на короткой ступени отклоненного среза повышается, что увеличивает энергетический барьер релаксации слоя, т. е. перехода через критическую толщину.

Вместе с тем известно, что в сильно напряженных слоях возможны другие механизмы — образование поверхностной неоднородности концентрации (модуляция) и резкий переход с образованием островков Странского — Крастанова [3].

Оба этих механизма не сопровождаются образованием дислокации, но приводят к нарушению планарности поверхности и, как следствие, к изменению спектров дифракции и люминесценции. В наших экспериментах содержание In в слое (35 %) было недостаточным для самоорганизации островков, но модуляция поверхности и постепенный переход к островковому росту возможны [1]. Сегрегация атомов индия в плоскости роста при движении ступени может способствовать модуляции, поскольку накопление избытка атомов In на фронте кристаллизации может приводить к "сбросу", что создает автоколебания поверхностной концентрации In. Кроме того, неоднородность, возникшая в одном n -м слое будет создавать локальную деформацию решетки и искажать потенциальный рельеф поверхности при росте $(n + 1)$ -го слоя.

В эксперименте на поверхности структур типа LTA, выращенных при пониженной температуре на слабоотклоненном срезе, видны овальной формы островки. Островки видны уже на структуре LT1A, хотя, судя по картине дифракции (см. рис. 2), два слоя остаются когерентными. Такие же по форме, но более крупные островки видны на структурах LT2A и LT3A, где кроме них появляются крупные

выросты. Начальную стадию перехода через критическую толщину можно, по-видимому, идентифицировать как переход от двумерных к трехмерным островкам. Ступенчатость поверхности при островковом характере роста не должна оказывать сильного влияния на критическую толщину слоя, что и наблюдается в эксперименте (см. ход ЛТА и ЛТВ на рис. 3). В отличие от этого, в случае 600°-структур начальная стадия перехода на слабоотклоненном срезе дает картину пирамид (см. НТЗА на рис. 1) по типу закрученных пирамид при росте на винтовой дислокации [3]. Отклонение среза, т. е. ширина исходных террас, здесь оказывает существенное влияние на критическую толщину слоя.

Таким образом, показано, что с помощью АСМ можно наблюдать ступени с высотой в 1 монослой GaAs в случае структур с квантовыми ямами InGaAs, выращенных при 600 °С на подложках с отклонением среза 0,2° от кристаллографической плоскости (100). Такой результат свидетельствует о сохранении послойно-ступенчатого механизма роста более 100 монослоев по всей толщине структуры.

Отсутствие подобных ступеней на структурах, выращенных при 500 °С на подложках с отклонением среза 0,2°, может быть объяснено другим механизмом роста в условиях, когда длина поверхностной диффузии атомов меньше ширины ступени.

Получены оценки критической толщины слоя $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$ в двухслойной структуре: 5 нм — для 600 °С и $\delta = 2^\circ$; 8 нм — для 600 °С и $\delta = 0,2^\circ$; 10 нм — для 500 °С, $\delta = 0,2^\circ$ и $\delta = 2^\circ$. Результаты показывают, что использование слабоотклоненных срезов может предоставлять альтернативный путь увеличения толщины напряженного слоя InGaAs.

Список литературы

1. Durstan D. J. Strain and strain relaxation in semiconductors // J. of Material Science: Materials in Electronics. 1997. V. 8. P. 337—375.
2. Nabetani U., Wakahara A., Sasaki A. Critical thickness of InAs grown on misoriented GaAs substrates // J. of Appl. Phys. 1995. V. 78. N 11. P. 6461—6468.
3. Чернов А. А., Гиваргизов Е. И., Багдасаров Х. С. и др. Современная кристаллография. Т. 3. Образование кристаллов. М.: Наука. 1980. 407 с.
4. Preobrazhensky V. V., Lubishev D. I., Pchelyakov O. P. et al. Effect of Substrate Temperature on RHEED Oscillations Features During the MBE Growth of GaAs(001) // Phys. Low-Dim. Structures. 1996. N 9/10. P. 75—80.
5. Vostokov N. V., Gaponova D. M., Daniltsev V. M. et al. Investigation of InGaAs based double quantum well heterostructures near the critical thickness transition // Phys. Low-Dim. Structures. 2001. N 3/4. P. 303—307.
6. Ekenstedt M. J., Chen W. Q., Andersson T. G. et al. Mediation of strain from InGaAs layers through GaAs barriers in multiple quantum well structures // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. N 25. P. 3242—3244.

УДК 621.3.049.77.002:621.793

Е. Г. Герасимов,
ФГУП Научно-исследовательский институт
физических измерений (г. Пенза)

ПРИГОТОВЛЕНИЕ РАСТВОРА ФОТОРЕЗИСТА ФН-11С ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Отработана и внедрена лабораторная технология изготовления раствора фоторезиста ФН-11С для защиты пассивной части электронных узлов (ГИС). Изготовлено и испытано оборудование для реализации технологии, что позволило обеспечить изготовление и поставку продукции в условиях прекращения промышленного производства фоторезиста ФН-11СК.

Для формирования защитного слоя на пассивной части электронных узлов более 15 лет с успехом использовался раствор фоторезиста ФН-11С,готавливаемый смешением фоторезистов ФН-11С и ФН-11СК (ТУ 6-36-00210134-130-95) в необходимом соотношении. Однако в настоящее время промышленное производство фоторезиста ФН-11СК полностью прекращено, что привело к проблемам в защите электронных компонентов (фоторезист ФН-11С не обеспечивает требуемую степень защиты — толщину защитной пленки) и поставило вновь вопрос обеспечения защитных свойств получаемых пленок.

Фоторезист ФН-11С (ТУ 6-36-00210134-130-95) представляет собой раствор химически модифицированного изопренового каучука в ксилоле с вязкостью 10—12 сСт и содержанием сухого остатка 10—14 % масс. Фоторезист ФН-11СК отличается от ФН-11С большей вязкостью и соответственно большим содержанием сухого остатка. Раствор фоторезиста ФН-11С для формирования защитного слоя на пассивной части электронных узлов (ГИС) должен иметь вязкость 18—20 сСт и соответствующее содержание сухого остатка. Следовательно, такой раствор может быть приготовлен посредством испарения части растворителя (ксилола) из стандартного фоторезиста ФН-11С, при этом содержание сухого остатка и вязкость увеличатся.

Однако ввиду высокой температуры кипения ксилола (136—141 °С) это невозможно осуществить при атмосферном давлении, так как при такой температуре происходит термодеструкция химически модифицированного каучука. Для снижения температуры испарения ксилола предлагается проводить процесс при пониженном остаточном давлении (под вакуумом), что позволяет выполнять упаривание раствора при температуре 45—55 °С. В таком случае возникает проблема предотвращения попадания паров ксилола в вакуумный насос, по-

выросты. Начальную стадию перехода через критическую толщину можно, по-видимому, идентифицировать как переход от двумерных к трехмерным островкам. Ступенчатость поверхности при островковом характере роста не должна оказывать сильного влияния на критическую толщину слоя, что и наблюдается в эксперименте (см. ход ЛТА и ЛТВ на рис. 3). В отличие от этого, в случае 600°-структур начальная стадия перехода на слабоотклоненном срезе дает картину пирамид (см. НТЗА на рис. 1) по типу закрученных пирамид при росте на винтовой дислокации [3]. Отклонение среза, т. е. ширина исходных террас, здесь оказывает существенное влияние на критическую толщину слоя.

Таким образом, показано, что с помощью АСМ можно наблюдать ступени с высотой в 1 монослой GaAs в случае структур с квантовыми ямами InGaAs, выращенных при 600 °С на подложках с отклонением среза 0,2° от кристаллографической плоскости (100). Такой результат свидетельствует о сохранении послойно-ступенчатого механизма роста более 100 монослоев по всей толщине структуры.

Отсутствие подобных ступеней на структурах, выращенных при 500 °С на подложках с отклонением среза 0,2°, может быть объяснено другим механизмом роста в условиях, когда длина поверхностной диффузии атомов меньше ширины ступени.

Получены оценки критической толщины слоя $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$ в двухслойной структуре: 5 нм — для 600 °С и $\delta = 2^\circ$; 8 нм — для 600 °С и $\delta = 0,2^\circ$; 10 нм — для 500 °С, $\delta = 0,2^\circ$ и $\delta = 2^\circ$. Результаты показывают, что использование слабоотклоненных срезов может предоставлять альтернативный путь увеличения толщины напряженного слоя InGaAs.

Список литературы

1. Durstan D. J. Strain and strain relaxation in semiconductors // J. of Material Science: Materials in Electronics. 1997. V. 8. P. 337—375.
2. Nabetani U., Wakahara A., Sasaki A. Critical thickness of InAs grown on misoriented GaAs substrates // J. of Appl. Phys. 1995. V. 78. N 11. P. 6461—6468.
3. Чернов А. А., Гиваргизов Е. И., Багдасаров Х. С. и др. Современная кристаллография. Т. 3. Образование кристаллов. М.: Наука. 1980. 407 с.
4. Preobrazhensky V. V., Lubishev D. I., Pchelyakov O. P. et al. Effect of Substrate Temperature on RHEED Oscillations Features During the MBE Growth of GaAs(001) // Phys. Low-Dim. Structures. 1996. N 9/10. P. 75—80.
5. Vostokov N. V., Gaponova D. M., Daniltsev V. M. et al. Investigation of InGaAs based double quantum well heterostructures near the critical thickness transition // Phys. Low-Dim. Structures. 2001. N 3/4. P. 303—307.
6. Ekenstedt M. J., Chen W. Q., Andersson T. G. et al. Mediation of strain from InGaAs layers through GaAs barriers in multiple quantum well structures // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. N 25. P. 3242—3244.

УДК 621.3.049.77.002:621.793

Е. Г. Герасимов,
ФГУП Научно-исследовательский институт
физических измерений (г. Пенза)

ПРИГОТОВЛЕНИЕ РАСТВОРА ФОТОРЕЗИСТА ФН-11С ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Отработана и внедрена лабораторная технология изготовления раствора фоторезиста ФН-11С для защиты пассивной части электронных узлов (ГИС). Изготовлено и испытано оборудование для реализации технологии, что позволило обеспечить изготовление и поставку продукции в условиях прекращения промышленного производства фоторезиста ФН-11СК.

Для формирования защитного слоя на пассивной части электронных узлов более 15 лет с успехом использовался раствор фоторезиста ФН-11С,готавливаемый смешением фоторезистов ФН-11С и ФН-11СК (ТУ 6-36-00210134-130-95) в необходимом соотношении. Однако в настоящее время промышленное производство фоторезиста ФН-11СК полностью прекращено, что привело к проблемам в защите электронных компонентов (фоторезист ФН-11С не обеспечивает требуемую степень защиты — толщину защитной пленки) и поставило вновь вопрос обеспечения защитных свойств получаемых пленок.

Фоторезист ФН-11С (ТУ 6-36-00210134-130-95) представляет собой раствор химически модифицированного изопренового каучука в ксилоле с вязкостью 10—12 сСт и содержанием сухого остатка 10—14 % масс. Фоторезист ФН-11СК отличается от ФН-11С большей вязкостью и соответственно большим содержанием сухого остатка. Раствор фоторезиста ФН-11С для формирования защитного слоя на пассивной части электронных узлов (ГИС) должен иметь вязкость 18—20 сСт и соответствующее содержание сухого остатка. Следовательно, такой раствор может быть приготовлен посредством испарения части растворителя (ксилола) из стандартного фоторезиста ФН-11С, при этом содержание сухого остатка и вязкость увеличатся.

Однако ввиду высокой температуры кипения ксилола (136—141 °С) это невозможно осуществить при атмосферном давлении, так как при такой температуре происходит термодеструкция химически модифицированного каучука. Для снижения температуры испарения ксилола предлагается проводить процесс при пониженном остаточном давлении (под вакуумом), что позволяет выполнять упаривание раствора при температуре 45—55 °С. В таком случае возникает проблема предотвращения попадания паров ксилола в вакуумный насос, по-

сколькo это может привести к его преждевременному выходу из строя. Низкотемпературные ловушки, обычно применяемые для решения этой проблемы, в данном случае не годятся, так как некоторые изомеры ксилола, в частности параксиллол, имеют достаточно высокую температуру замерзания (для параксиллола +13 °С). Это приводит к тому, что при температурах ниже +13 °С ловушка быстро забивается кристаллами параксиллола и процесс прекращается; при поддержании температуры в ловушке выше +13 °С наблюдается значительный проскок пара через ловушку и попадание его в масляную систему вакуум-насоса.

Для отработки технологии упаривания (концентрирования) фоторезиста ФН-11С была изготовлена лабораторная установка со специальными ловушками, обеспечивающими поддержание оптимального температурного режима и эффективность улавливания паров летучих растворителей, продемонстрировавшая эффективность принятых конструктивно-технологических решений.

Ввиду того, что в процессе упаривания раствора невозможно контролировать его вязкость и содержание сухого остатка, упаривание проводится до существенно больших значений вязкости (сухого остатка), а в дальнейшем этот параметр доводится до рабочих значений разбавлением упаренного раствора исходным. Получаемый раствор фоторезиста по своим технологическим и защитным характеристикам полностью соответствует требованиям п. 2.4 "Защита" ОСТ 92-1191-78 "Микросборки гибридные интегральные. Правила разработки топологии" в части получения защитной пленки требуемой толщины.

Разработанная технология используется в НИИФИ с января 2001 г. и позволила обеспечить бесперебойное изготовление ряда изделий предприятия в условиях полного прекращения промышленного производства фоторезиста ФН-11СК.

УДК 631.382.002.2

В. П. Бокарёв, канд. хим. наук, **О. П. Гущин**, **В. Н. Макаревич**,
А. Д. Просий, **А. А. Трусов**, **А. Н. Дюпина**,
АООТ "НИИМЭ—МИКРОН"

ГУФ СТАБИЛИЗАЦИЯ ФОТОРЕЗИСТОВЫХ МАСОК В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУМИКРОННЫХ И СУБПОЛУМИКРОННЫХ СБИС

Исследован и разработан процесс стабилизации термических свойств фоторезистовых масок (ФРМ) с субмикронными проектными нормами. Разработанный процесс использован в КМОП-маршруте изготовления тестового кристалла с проектными нормами 0,5 мкм перед проведением технологических операций реактивно-ионного травления субмикронных контактных окон, жесткой маски и четырехслойной металлизации. Прогресс стабилизации основан на облучении ФРМ ультрафиолетовым излучением с максимальной интенсивностью в спектральном диапазоне 280—360 нм с одновременным нагревом до температуры 180—230 °С. Впервые подобный процесс разработан фирмой Fusion (США) для стабилизации ФРМ при изготовлении СБИС с субмикронными проектными нормами.

Данная работа была проведена в рамках разработки процессов сухого травления для КМОП-технологии уровня 0,5 мкм.

Отечественное оборудование для проведения процессов плазмохимического травления снабжено реакторами диодного типа и не имеет эффективной системы термостабилизации обрабатываемых пластин. Это ограничивает

его производительность и затрудняет разработку высокоселективных процессов травления с применением новых полимеробразующих газов из-за неуправляемого полимеробразования на поверхности пластин при малых ВЧ мощностях. Освоение же субмикронной технологии требует разработки процессов с высокой селективностью к подслою, что под-

разумевает использование новых полимеробразующих газов. При разработке таких процессов необходимо увеличивать ВЧ мощность для перехода в область управляемого полимеробразования. Однако при увеличении ВЧ мощности необходимо усиливать теплоотвод от пластины, так как дополнительный разогрев приводит к плавлению фоторезиста с изменением профиля и уходом размеров маски, а иногда и с ее карбонизацией. Для увеличения термической стабильности фоторезистовых масок (ФРМ) перед процессом плазмохимического травления проводится процесс термического "дубления" фоторезиста либо дубления в сочетании с обработкой ультрафиолетовым излучением [1—3]. При отсутствии возможности стабилизации термических свойств ФРМ процессы плазмохимического травления необходимо проводить при небольших ВЧ мощностях (примерно 350 Вт), так как попытки проведения процессов при больших значениях ВЧ мощности приводят к деструкции ФРМ.

сколькo это может привести к его преждевременному выходу из строя. Низкотемпературные ловушки, обычно применяемые для решения этой проблемы, в данном случае не годятся, так как некоторые изомеры ксилола, в частности параксиллол, имеют достаточно высокую температуру замерзания (для параксиллола +13 °С). Это приводит к тому, что при температурах ниже +13 °С ловушка быстро забивается кристаллами параксиллола и процесс прекращается; при поддержании температуры в ловушке выше +13 °С наблюдается значительный проскок пара через ловушку и попадание его в масляную систему вакуум-насоса.

Для отработки технологии упаривания (концентрирования) фоторезиста ФН-11С была изготовлена лабораторная установка со специальными ловушками, обеспечивающими поддержание оптимального температурного режима и эффективность улавливания паров летучих растворителей, продемонстрировавшая эффективность принятых конструктивно-технологических решений.

Ввиду того, что в процессе упаривания раствора невозможно контролировать его вязкость и содержание сухого остатка, упаривание проводится до существенно больших значений вязкости (сухого остатка), а в дальнейшем этот параметр доводится до рабочих значений разбавлением упаренного раствора исходным. Получаемый раствор фоторезиста по своим технологическим и защитным характеристикам полностью соответствует требованиям п. 2.4 "Защита" ОСТ 92-1191-78 "Микросборки гибридные интегральные. Правила разработки топологии" в части получения защитной пленки требуемой толщины.

Разработанная технология используется в НИИФИ с января 2001 г. и позволила обеспечить бесперебойное изготовление ряда изделий предприятия в условиях полного прекращения промышленного производства фоторезиста ФН-11СК.

УДК 631.382.002.2

В. П. Бокарёв, канд. хим. наук, **О. П. Гущин**, **В. Н. Макаревич**,
А. Д. Просий, **А. А. Трусов**, **А. Н. Дюпина**,
АООТ "НИИМЭ—МИКРОН"

ГУФ СТАБИЛИЗАЦИЯ ФОТОРЕЗИСТОВЫХ МАСОК В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУМИКРОННЫХ И СУБПОЛУМИКРОННЫХ СБИС

Исследован и разработан процесс стабилизации термических свойств фоторезистовых масок (ФРМ) с субмикронными проектными нормами. Разработанный процесс использован в КМОП-маршруте изготовления тестового кристалла с проектными нормами 0,5 мкм перед проведением технологических операций реактивно-ионного травления субмикронных контактных окон, жесткой маски и четырехслойной металлизации. Прогресс стабилизации основан на облучении ФРМ ультрафиолетовым излучением с максимальной интенсивностью в спектральном диапазоне 280—360 нм с одновременным нагревом до температуры 180—230 °С. Впервые подобный процесс разработан фирмой Fusion (США) для стабилизации ФРМ при изготовлении СБИС с субмикронными проектными нормами.

Данная работа была проведена в рамках разработки процессов сухого травления для КМОП-технологии уровня 0,5 мкм.

Отечественное оборудование для проведения процессов плазмохимического травления снабжено реакторами диодного типа и не имеет эффективной системы термостабилизации обрабатываемых пластин. Это ограничивает

его производительность и затрудняет разработку высокоселективных процессов травления с применением новых полимеробразующих газов из-за неуправляемого полимеробразования на поверхности пластин при малых ВЧ мощностях. Освоение же субмикронной технологии требует разработки процессов с высокой селективностью к подслою, что под-

разумевает использование новых полимеробразующих газов. При разработке таких процессов необходимо увеличивать ВЧ мощность для перехода в область управляемого полимеробразования. Однако при увеличении ВЧ мощности необходимо усиливать теплоотвод от пластины, так как дополнительный разогрев приводит к плавлению фоторезиста с изменением профиля и уходом размеров маски, а иногда и с ее карбонизацией. Для увеличения термической стабильности фоторезистовых масок (ФРМ) перед процессом плазмохимического травления проводится процесс термического "дубления" фоторезиста либо дубления в сочетании с обработкой ультрафиолетовым излучением [1—3]. При отсутствии возможности стабилизации термических свойств ФРМ процессы плазмохимического травления необходимо проводить при небольших ВЧ мощностях (примерно 350 Вт), так как попытки проведения процессов при больших значениях ВЧ мощности приводят к деструкции ФРМ.

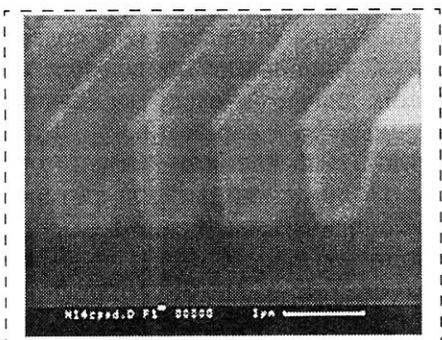


Рис. 1. Профиль ФРМ до ГУФ стабилизации термических свойств

Нами разработан процесс стабилизации термических свойств субмикронных ФРМ до температуры 230 °С обработкой глубоким ультрафиолетовым (ГУФ) излучением ($\lambda = 290\div 360$ нм) с одновременным подъемом температуры до требуемого значения [1].

Применение современного оборудования для глубокой ультрафиолетовой (ГУФ) стабилизации термических свойств ФРМ позволяет стабилизировать профиль ФРМ до температуры 230 °С за время, не превышающее трех минут. На рис. 1, 2 приведен профиль субмикронных элементов ФРМ до и после проведения операции ГУФ стабилизации термических свойств.

Как видно на приведенных рисунках, проведение ГУФ стабилизации ФРМ даже при температуре 230 °С не приводит к деформации профиля ФРМ и уходу линейных размеров из-за расте-

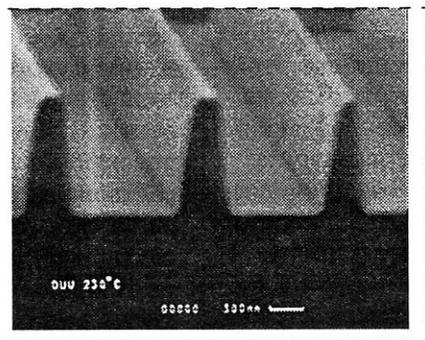


Рис. 2. Профиль ФРМ после ГУФ стабилизации при 230 °С

кания фоторезиста по поверхности пластины. Поэтому данный процесс обеспечивает стабильность термических свойств субмикронных ФРМ при проведении процессов плазмохимического травления с повышенной мощностью на отечественном оборудовании.

Разработанный процесс использовался при травлении субмикронных контактных окон и при травлении металлизации с повышенной ВЧ мощностью.

Как оказалось, использование повышенной ВЧ мощности при травлении металла приводит к снижению плотности сыпи между проводниками и уменьшению ее размеров примерно в 2 раза. При этом изменения линейных размеров не наблюдается.

В таблице приведено сопоставление линейных размеров исходной ФРМ с ФРМ после ГУФ стабилизации при 180 °С и ли-

нейными размерами протравленного металла.

Измерения проводились на установках MPV-CD и LTS-M фирмы *Leitz*. Погрешность измерений составляла $\pm 5\%$. Как видно из таблицы, применение операции ГУФ стабилизации ФРМ перед проведением процесса реактивно-ионного травления (РИТ) металла приводит к уменьшению разброса ЛР протравленного слоя металлизации. Причем ЛР металлизации с применением процесса ГУФ стабилизации более соответствует номинальному значению.

Использование стабилизированных до температуры 180 °С ФРМ позволяет увеличить ВЧ мощность при РИТ металла до 400 Вт, что делает возможным увеличение производительности установок и уменьшения дефектности типа "сыпь", что увеличивает выход годных. С использованием ГУФ стабилизации термических свойств ФРМ разработаны новые процессы РИТ SiO₂ с селективностью к Si более 15:1 при скорости травления SiO₂, равной 36 нм/мин. Разработанный процесс вскрытия контактных окон позволяет с высокой надежностью вскрывать эти окна размером до 0,35 мкм в борфосфорном/силикатном стекле толщиной до 1,0 мкм.

В связи с критичностью размеров при травлении поликремния и полицидов в КМОП-технологии применение ГУФ стабилизации ФРМ становится предпочтительной, так как позволяет получать высокое качество и воспроизводимость без потери критического размера. Применение ГУФ стабилизации ФРМ перед проведением процесса травления канавок в кремнии позволяет сохранять заданный профиль ФРМ и удалять твердые маскирующие слои, например SiO₂, во время травления. Применение ГУФ стабилизации термических свойств ФРМ перед проведением процесса ионной имплантации позволяет повышать энергию без потери устойчивости ФРМ, избежать ре-

Линейные размеры

Процесс травления металла	ВЧ мощность, Вт				
	280 (базовая)	350 (с ГУФ при 180 °С)	400 (с ГУФ при 180 °С)		400 (без ГУФ)
После проекционной фотолитографии	а) 1,26 мкм б) 1,20 мкм	1,10 ± 0,05 мкм	1,10 ± 0,05 мкм	1,24 мкм	1,30 мкм
После ГУФ	—	1,16 ± 0,05 мкм	1,10 ± 0,05 мкм	1,03 мкм	—
После ПХТ	а) 1,32 мкм б) 1,29 мкм	1,26 ± 0,05 мкм	1,23 ± 0,05 мкм	1,22 мкм	1,11 мкм
Номинальный топологический размер <i>N</i>	1,2 ± 0,2 мкм				

тикуляцию и карбонизацию фоторезиста и облегчает его последующее снятие.

Применение ГУФ стабилизации ФРМ перед проведением процесса РИТ металла позволяет повысить температуру обрабатываемых пластин во время РИТ-обработки без ухода размера, карбонизации и ретикуляции фоторезиста, что облегчает удаление малолетучих соединений меди при травлении сплавов Al—Cu. Кроме того, увеличение термической стойкости ФРМ позволяет проводить процесс травления при более высоких ВЧ мощностях, что делает возможной повышение ско-

рости травления, а значит, и производительности оборудования.

При травлении оксида фотостабилизация ФРМ позволяет использовать более высокие температуры и большие плотности плазмы, что делает возможным внедрение процессов с увеличенной селективностью травления без карбонизации и ретикуляции фоторезиста и с сохранением критических размеров во время процесса травления.

Таким образом, ГУФ стабилизация ФРМ является необходимой при применении в технологии уровня не более 0,5 мкм РИТ-оборудования с реакторами диодного

типа и недостаточно эффективной системой охлаждения пластин во время процесса травления.

Список литературы

1. Бокарев В. П., Гушин О. П., Просний А. Д., Лискин Л. А., Макаревич В. Н., Трусов А. А. Разработка процесса ГУФ стабилизации ФРМ для субмикронной технологии переноса изображения // Сб. докл. III научно-технической конференции АООТ "НИИМЭ и завод МИКРОН" (в печати).
2. Orvek K. J., Dennis M. L. // SPIE. 1987. Part IV. V. 771. P. 281—288.
3. Orvek K. J., Seha T., Hemming S., Clark D. // KTI Interface'88 Proceedings. 1988. P. 151—157.

НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.385.83

С. Ш. Рехвиашвили, канд. физ.-мат. наук,
Научно-исследовательский институт прикладной
математики и автоматизации КБНЦ РАН
(г. Нальчик)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОДУЛЯЦИОННОГО И ФРИКЦИОННОГО РЕЖИМОВ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

Анализируются некоторые важные вопросы теории атомно-силовой микроскопии. Приводятся расчеты сил взаимодействия для игл различной формы. Рассматриваются теоретические модели модуляционного и фрикционного силового микроскопии в приближении эффективной массы осциллятора. Рассчитывается траектория движения зонда с учетом эффекта прилипания — скольжения.

Введение

Одним из самых современных приборов, в котором широко используются различные микросистемы, является атомно-силовой микроскоп (АСМ) [1]. АСМ — прибор, позволяющий с помощью маленькой иглы получать изображения и исследовать

различные свойства поверхностей твердых тел с атомарным уровнем разрешения. В настоящее время АСМ стал незаменимым инструментом для исследований во многих областях науки и техники. Прежде всего, это физика и химия поверхности, биология и медицина, машиностроение и микроэлектроника.

АСМ зондирует поверхность образца с помощью острой иглы, которая располагается на свободном конце консоли кантилевера (рис. 1). Силы, возникающие между иглой и поверхностью образца, вызывают деформацию консоли, которая в процессе сканирования детектируется оптической системой. Сигнал с оптической системы используется для построения изображения исследуемой поверхности. В зависимости от расстояния сканирования h

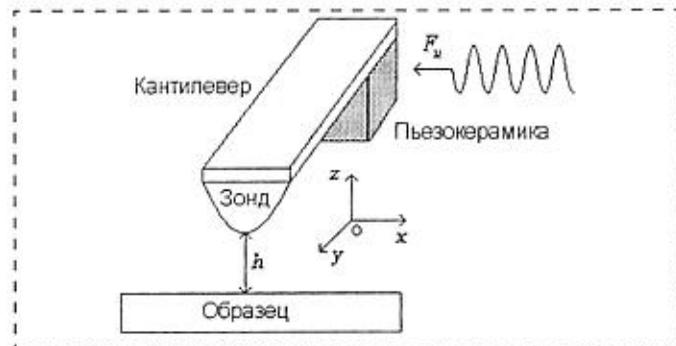


Рис. 1. Схема контакта в АСМ

тикуляцию и карбонизацию фоторезиста и облегчает его последующее снятие.

Применение ГУФ стабилизации ФРМ перед проведением процесса РИТ металла позволяет повысить температуру обрабатываемых пластин во время РИТ-обработки без ухода размера, карбонизации и ретикуляции фоторезиста, что облегчает удаление малолетучих соединений меди при травлении сплавов Al—Cu. Кроме того, увеличение термической стойкости ФРМ позволяет проводить процесс травления при более высоких ВЧ мощностях, что делает возможной повышение ско-

рости травления, а значит, и производительности оборудования.

При травлении оксида фотостабилизация ФРМ позволяет использовать более высокие температуры и большие плотности плазмы, что делает возможным внедрение процессов с увеличенной селективностью травления без карбонизации и ретикуляции фоторезиста и с сохранением критических размеров во время процесса травления.

Таким образом, ГУФ стабилизация ФРМ является необходимой при применении в технологии уровня не более 0,5 мкм РИТ-оборудования с реакторами диодного

типа и недостаточно эффективной системой охлаждения пластин во время процесса травления.

Список литературы

1. Бокарев В. П., Гушин О. П., Просний А. Д., Лискин Л. А., Макаревич В. Н., Трусов А. А. Разработка процесса ГУФ стабилизации ФРМ для субмикронной технологии переноса изображения // Сб. докл. III научно-технической конференции АООТ "НИИМЭ и завод МИКРОН" (в печати).
2. Orvek K. J., Dennis M. L. // SPIE. 1987. Part IV. V. 771. P. 281—288.
3. Orvek K. J., Seha T., Hemming S., Clark D. // KTI Interface'88 Proceedings. 1988. P. 151—157.

ФЛОТТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.385.83

С. Ш. Рехвиашвили, канд. физ.-мат. наук,
Научно-исследовательский институт прикладной
математики и автоматизации КБНЦ РАН
(г. Нальчик)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОДУЛЯЦИОННОГО И ФРИКЦИОННОГО РЕЖИМОВ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

Анализируются некоторые важные вопросы теории атомно-силовой микроскопии. Приводятся расчеты сил взаимодействия для игл различной формы. Рассматриваются теоретические модели модуляционного и фрикционного силового микроскопа в приближении эффективной массы осциллятора. Рассчитывается траектория движения зонда с учетом эффекта прилипания — скольжения.

Введение

Одним из самых современных приборов, в котором широко используются различные микросистемы, является атомно-силовой микроскоп (АСМ) [1]. АСМ — прибор, позволяющий с помощью маленькой иглы получать изображения и исследовать

различные свойства поверхностей твердых тел с атомарным уровнем разрешения. В настоящее время АСМ стал незаменимым инструментом для исследований во многих областях науки и техники. Прежде всего, это физика и химия поверхности, биология и медицина, машиностроение и микроэлектроника.

АСМ зондирует поверхность образца с помощью острой иглы, которая располагается на свободном конце консоли кантилевера (рис. 1). Силы, возникающие между иглой и поверхностью образца, вызывают деформацию консоли, которая в процессе сканирования детектируется оптической системой. Сигнал с оптической системы используется для построения изображения исследуемой поверхности. В зависимости от расстояния сканирования h

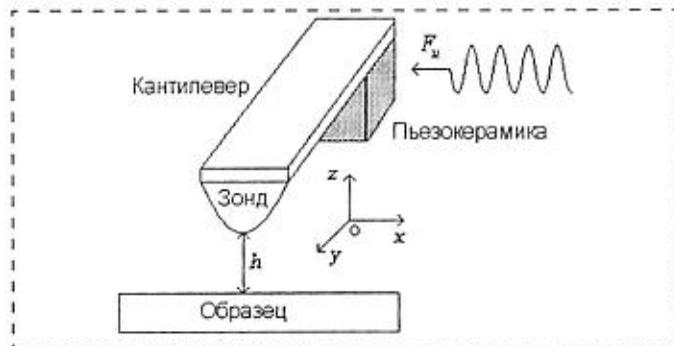


Рис. 1. Схема контакта в АСМ

различают три основных режима (моды) функционирования АСМ: контактный режим ($h < 0,2-0,3$ нм); бесконтактный режим ($h > 0,2-0,3$ нм); полуконтактный режим (вертикальное расстояние сканирования может меняться в широких пределах). Для всех режимов возможны два способа регистрации сигнала: непосредственные измерения отклонения консоли кантилевера (режим топографии и режим боковых сил) и модуляционные измерения (регистрация амплитуды, частоты или фазы колебаний консоли кантилевера, а также двухпроходной режим).

Представляет интерес расчет траекторий движения зондовых сенсоров АСМ. Этот интерес вызван в основном двумя причинами. Во-первых, расчеты обеспечивают более корректную интерпретацию экспериментальных данных, получаемых с помощью АСМ. Во-вторых, расчеты позволяют глубже понять особенности взаимодействия зонд — поверхность в современных микросистемах записи и считывания информации. В настоящей статье проводятся расчеты нормальной и латеральной траекторий движения консоли кантилевера АСМ в приближении эффективной массы осциллятора. Рассчитаны силы взаимодействия (притяжения и отталкивания) для зондов различной формы.

Расчет сил взаимодействия

Для расчета потенциала межатомного взаимодействия используется стандартная аппроксимация:

$$U(r) = U_0(X^2 - 2X),$$

где первое слагаемое в скобках учитывает отталкивание, а второе — притяжение атомов; r — расстояние между атомами; U_0 — глубина потенциальной ямы; X — некоторая функция, зависящая от расстояния r . Если предположить, что X имеет характерную для ван-дер-ваальсовых сил степенную зависимость вида $X = (r_0/r)^6$, где r_0 — равновесное расстояние в отсутствие химического взаимодействия, то получим потенциал Леннарда—Джонса

$$U(r) = U_0 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right]. \quad (1)$$

Далее будем предполагать, что атомы зонда и образца равномерно распределены по своим объемам. С учетом (1) для зондов различной формы задача расчета силы сводится к вычислению следующего интеграла:

$$\left. \begin{aligned} F &= -\frac{A}{2\pi} \int_0^\infty \left[(h + \xi)^{-4} - \frac{r_0^6}{5} (h + \xi)^{-10} \right] \Omega(\xi) d\xi; \\ A &= 2\pi^2 n_1 n_2 U_0 r_0^6 = \pi^2 n_1 n_2 C_6, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где A — константа Гамакера; n_1, n_2 — объемные плотности атомов иглы и образца; $C_6 = 2U_0 r_0^6$ — константа Ван-дер-Ваальса; Ω — площадь поперечного сечения иглы, зависящая от вертикальной координаты.

Величина взаимодействия макроскопических тел, получаемая в аддитивном приближении [формула (2)], может иметь погрешность 20–30 % при общей правильной асимптотике функции $F(h)$ на больших расстояниях [2]. Для устранения этого недостатка в работе [3] предложено правило "перенормировки" константы взаимодействия. Применение данного правила дает следующую формулу:

$$A = \frac{3h\bar{\omega}}{4\pi} = 6\pi C,$$

где C — константа Лифшица; $\bar{\omega}$ — характерная частота спектра поглощения [2]. Для типичных сочетаний материалов зонда и образца C находится в узком интервале от 0,01 до 0,1 эВ [4].

После вычисления интеграла (2) и последующей замены константы A на константу C получаем следующее выражение силы взаимодействия:

$$F = -a \left(\frac{1}{h^n} - \frac{b}{h^{n+6}} \right), \quad (3)$$

где a, b, n — параметры аппроксимации, зависящие от формы иглы и свойств материалов образца и зонда. Результаты расчетов приведены в табл. 1, в которой использованы следующие обозначения: R — радиус полусферы и радиус кривизны кончика иглы в случае парабооида; Ω — площадь основания цилиндра и прямоугольной пластины; θ — угол при вершине конуса и угол между противоположными гранями четырехугольной пирамиды.

На рис. 2 показана зависимость силы взаимодействия от расстояния для параболического кремниевого зонда и толстой графитовой пластины. В расче-

Таблица 1

Параметры силовых взаимодействий

Форма иглы	a	b	F_0	h_0	n
Параболоид, сфера	πRC	$r_0^6/60$	$-\frac{3}{8}a\left(\frac{2}{b}\right)^{1/3}$	$4^{1/6}b^{1/6}$	2
Конус	$\pi C \operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$r_0^6/56$	$-\frac{6}{49}a\left(\frac{7}{b}\right)^{1/6}$	$7^{1/6}b^{1/6}$	1
Пирамида	$C \operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$	Как конус	Как конус	Как конус	1
Цилиндр, пластина	ΩC	$r_0^6/15$	$-\frac{2}{9}a\left(\frac{3}{b}\right)^{1/2}$	$3^{1/6}b^{1/6}$	3

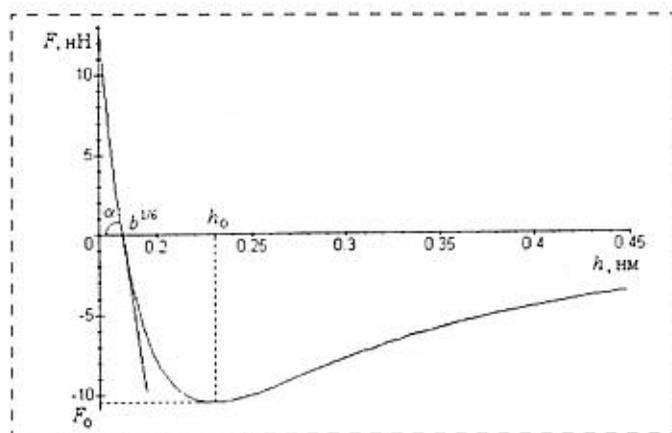


Рис. 2. Зависимость силы взаимодействия от расстояния сканирования:

$$F_0 = -10,46 \text{ нН}; h_0 = 0,23 \text{ нм}; b^{1/6} = 0,18 \text{ нм}$$

тах было принято: $C = 0,073 \text{ эВ}$ [4]; $r_0 = 0,36 \text{ нм}$ (это значение получено в модели электронного газа); $R = 20 \text{ нм}$. Кривая интерпретируется следующим образом. На больших расстояниях ($h > h_0$) между зондом и образцом действует ван-дер-ваальсова сила притяжения. С уменьшением расстояния h эта сила возрастает по модулю до тех пор, пока атомы не окажутся настолько близко друг от друга, что их электронные облака начнут отталкиваться под действием обменных сил. При дальнейшем уменьшении расстояния ($b^{1/6} < h < h_0$) обменное отталкивание постепенно ослабляет силу притяжения. Сила падает до нулевого значения в точке $h = b^{1/6}$, когда расстояние между атомами достигает $0,1-0,2 \text{ нм}$, т. е. характерной длины связи. Атомы входят в полный контакт, когда вся сила становится положительной, что соответствует расстояниям $h < b^{1/6}$. Наклон кривой в этой области определяет жесткость связи: $K = \text{tg} \alpha = 6a/b^{(1+n)/6}$.

Расчеты сил взаимодействия с использованием потенциала (1) носят чисто модельный характер, поэтому на практике параметры a , b , n целесообразно находить из привязки к экспериментальным данным. При выводе (3) предполагалось, что игла и образец не испытывают деформаций. Действительно, простые оценки показывают, что при типичных нагрузках (вся область сил отталкивания на рис. 2) деформация контактной зоны для большинства твердых материалов незначительна и составляет менее $0,1 \text{ нм}$. Однако для мягких образцов (например, для полимеров) и твердых зондов, а также при больших нагрузках она может оказаться существенной. В этом случае силу следует оценивать в рамках контактной механики.

Модуляционный режим

В общем случае колебания консоли кантилевера описываются дифференциальным уравнением

в частных производных 4-го порядка, аналитическое решение которого получить не удастся. Можно, однако, найти решение, соответствующее основному тону (гармонике) колебаний. Ему соответствует приближение эффективной массы осциллятора. Эффективная масса вводится с помощью соотношения $m = k_n / (2\pi f_0)^2$, где k_n и f_0 — жесткость и резонансная частота консоли в отсутствие взаимодействия. На рис. 3 показаны различные конструкции консолей кантилеверов; в табл. 2 приведены формулы для расчета собственной частоты и жесткости консолей, полученные приближенным методом Рэлея — Ритца [5]. В таблице используются следующие обозначения: L — длина прямоугольной и цилиндрической консолей; d — толщина и диаметр консолей; B — ширина консолей; H и α — расстояние и угол между консолями; E и ρ — модуль упругости и плотность материала.

Таким образом, колебания консоли кантилевера рассматриваются как колебания гипотетического точечного осциллятора с эффективной массой m . Движение такого осциллятора описывается классическим уравнением движения, которое в нашем случае принимает вид

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2\gamma \frac{dz}{dt} + \frac{1}{m} \left(k_n - \frac{dF}{dh} \right) z + \frac{F}{m} = \frac{F_0}{m} \exp(-i\omega_{\text{ген}} t), \quad (4)$$

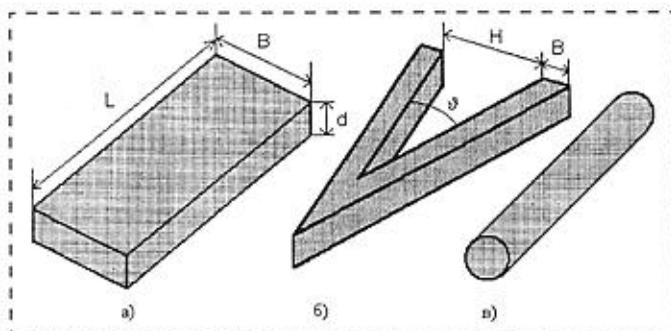


Рис. 3. Конструкции консолей кантилеверов:

a — прямоугольная; b — треугольная; v — цилиндрическая

Таблица 2
Резонансная частота и жесткость консолей различной формы

Форма консоли	Резонансная частота, Гц	Жесткость, Н/м
Прямоугольная	$f_0 = 0,162 \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	$k_n = \frac{EB(d)}{4(L)^3}$
Треугольная	$f_0 = 0,648 \frac{d \text{tg}^2(\alpha/2)}{H^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	$k_n = 4EB \left(\frac{d \text{tg}(\alpha/2)}{H} \right)^3$
Цилиндрическая	$f_0 = 0,14 \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	$k_n = \frac{3\pi d^4 E}{64 L^3}$

где F — определяется формулой (2); γ — коэффициент затухания осциллятора в вертикальном направлении; F_u — амплитуда внешней силы (ее величина зависит от модулирующего напряжения и свойств пьезокерамики); ω_{gen} — частота, на которой возбуждаются колебания кантилевера. Решение уравнения (4) имеет вид

$$z = A \exp[i(\omega_{gen}t + \varphi)] - \frac{F}{k_n}, \quad (5)$$

где A и φ — амплитуда и фаза колебаний, зависящие от расстояния сканирования. Второе слагаемое в правой части (5) описывает начальное смещение консоли кантилевера. Проанализируем основные виды модуляции.

Частотная модуляция. Из уравнения (4) следует, что резонансная частота консоли кантилевера будет изменяться по мере изменения результирующей жесткости, которая, в свою очередь, зависит от градиента силы и расстояния сканирования:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{1}{m} \frac{dF}{dh}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k_n}{m}} = \lim_{h \rightarrow \infty} \omega. \quad (6)$$

Изменения в резонансной частоте колебаний используются для построения топографии образца: система обратной связи АСМ следит за резонансной частотой, поддерживая ее постоянной. За счет сохранения постоянного значения резонансной частоты поддерживается постоянное и среднее значение расстояния от иглы до образца. На рис. 4 показана зависимость резонансной частоты от расстояния сканирования для распределения сил, приведенного на рис. 2. Предполагалось, что прямоугольная консоль кремниевое кантилевера имела следующие размеры: $L = 100$ мкм; $B = 30$ мкм; $d = 4$ мкм. Минимум этой кривой соответствует расстоянию

$$h'_0 = \left(\frac{(n+6)(n+7)}{n(n+1)} b \right)^{1/6}. \quad (7)$$

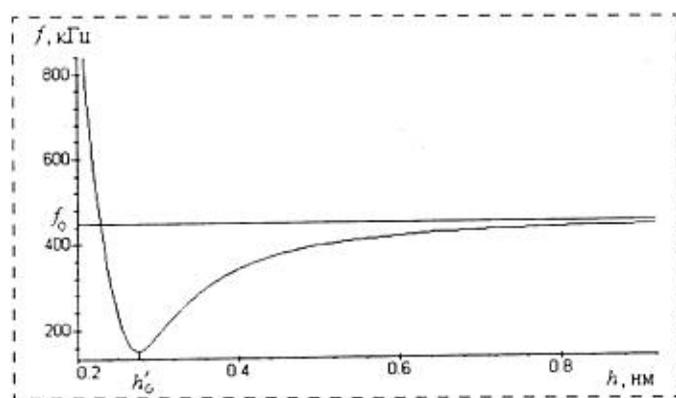


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты от расстояния сканирования: $k_n = 52,8$ Н/м; $f_0 = 447$ кГц; $h'_0 = 0,275$ нм

Расчеты показывают, что $h'_0 > h_0$ (см. табл. 1). Физически это обусловлено тем, что в модуляционном режиме регистрируется не сама сила, а ее градиент. Этот факт экспериментально установлен в работе [6]. Из формулы (6) следует, что для обеспечения устойчивого сканирования необходимо использовать жесткие кантилеверы ($k_n > dF/dh$). Это позволит избежать "прилипания" зонда к поверхности образца [7].

Несомненным преимуществом данного метода является то, что резонансная частота не зависит от добротности консоли кантилевера. Именно это свойство позволяет получать истинное атомное разрешение в сверхвысоком вакууме, когда добротность достигает $\sim 10^3 - 10^4$.

Фазовая и амплитудная модуляции. Фазовая регистрация связана со слежением за запаздыванием по фазе между сигналом, вызывающим колебания кантилевера, и выходным сигналом оптической системы. Амплитудное детектирование основано на измерении фактического отклонения консоли кантилевера. Из уравнения (4) и его решения (5) следуют хорошо известные из теории колебаний выражения

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \arctg \left(\frac{\omega \omega_{gen}}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \right); \\ A &= \frac{F_u}{k_n} \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega \omega_{gen}}{Q} \right)^2}}; \\ |\varphi_{max}| &= \frac{\pi}{2}; \quad A_{max} = Q \frac{F_u}{k_n}; \quad \gamma \ll \omega, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где Q — добротность консоли.

В формулах (8) присутствует резонансная частота ω . Это означает, что изменения в фазе и амплитуде колебаний будут отражать изменения в силовых свойствах поверхности образца, а положения экстремумов функций $\varphi(h)$ и $A(h)$ (по крайней мере отдельные из них) будут определяться формулой (7). В качестве примера на рис. 5 показаны зависимости фазы и амплитуды колебаний консоли кантилевера от расстояния сканирования.

Методы фазовой и амплитудной модуляций применяются, как правило, в воздушных вариантах АСМ (добротность здесь составляет $Q \sim 100 - 400$). Так, одним из распространенных методов амплитудной модуляции является режим измерения жесткости. В этом режиме зонд и образец приводятся в жесткий контакт. Модулирующее напряжение подается на z -пьезопривод образца. Оптическая система регистрирует амплитуду отклика консоли кантилевера, которая, в конечном счете, характеризует упругие свойства контакта.

Наконец отметим, что в современных конструкциях АСМ имеется возможность одновременного слежения за частотой, фазой и амплитудой колебаний.

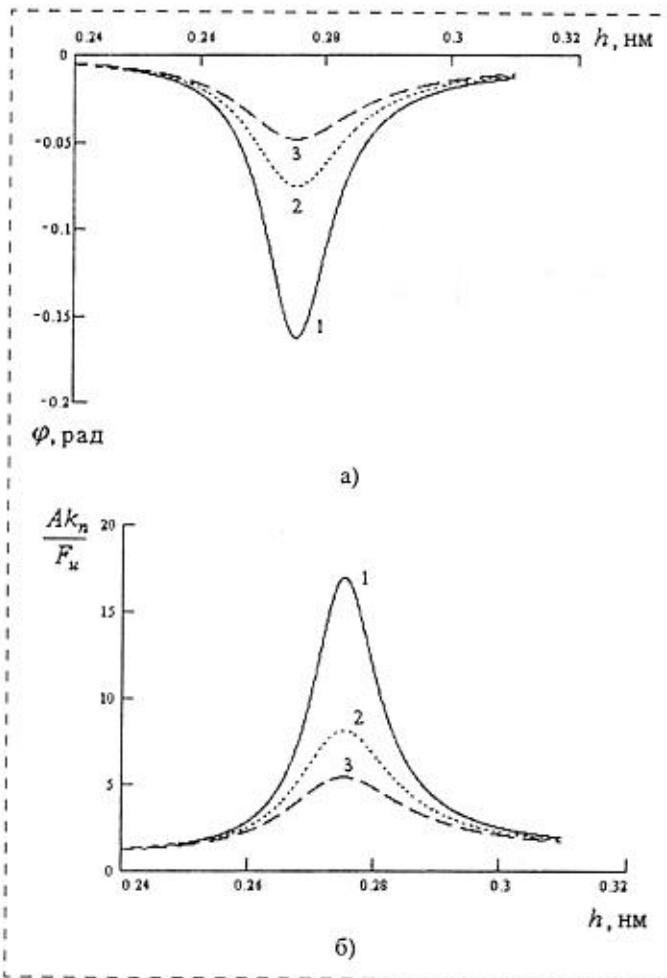


Рис. 5. Зависимость фазы (а) и амплитуды (б) колебаний консоли кантилевера от расстояния сканирования. Добротность консоли $Q = 100$. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют частотам колебаний 145, 140 и 135 кГц

Фрикционный режим

Измерение сил трения в нанометровом масштабе представляет собой актуальную задачу [8]. Для исследования трибологических свойств твердых тел с помощью АСМ используется режим регистрации боковых сил (фрикционный режим). В данном режиме система сканирования измеряет кручение консоли кантилевера, вызываемое тангенциальными силами. Такие силы могут возникать по двум причинам: изменение "поверхностного трения" и изменение наклона поверхности. Для того, чтобы разделить соответствующие вклады, необходимо получать и анализировать изображения сразу в двух режимах — режимах регистрации нормальных и боковых сил.

Считается, что высокий контраст АСМ-изображений, получаемых в фрикционном режиме, обусловлен так называемым эффектом прилипания — скольжения [8]. Для учета этого эффекта будем рассматривать следующую модель. Предположим, что движение кантилевера вдоль поверхности об-

разца осуществляется с постоянной скоростью v_0 . Если в моменты времени t_k консоль кантилевера совершает мгновенные скачки, приобретая при этом конечные приращения скорости v_k , то действующую силу можно представить в виде

$$F = m \sum_{k=1}^N v_k \delta(t - t_k),$$

где N — число скачков вдоль траектории; $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака.

При $t \neq t_k$ имеет место обычное затухающее движение. С учетом всего сказанного уравнение движения записывается в виде

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 v_0 t - \sum_{k=1}^N v_k \delta(t - t_k), \quad (9)$$

где γ , ω_0 — латеральные коэффициент затухания и резонансная частота консоли кантилевера. Первое слагаемое в правой части (9) задает координату держателя кантилевера. Решение уравнения (9), очевидно, должно удовлетворять следующим начальным условиям

$$x(0) = 0, \quad x'(0) = v_0. \quad (10)$$

Возникновению устойчивых колебаний соответствует условие $D < 0$, где D — дискриминант характеристического уравнения $p^2 + 2\gamma p + \omega_0^2 = 0$. Условие "критического демпфирования", при котором начинается регулярное скольжение зонда, имеет вид $D = 0$ (или $\gamma = \omega_0$).

Решить уравнение (9) с учетом начальных условий (10) можно, например, методом вариации постоянных. Решение записывается в виде

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \exp(-\gamma t) (C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t) + \bar{x}(t); \\ \bar{x}(t) &= \frac{\omega^2 v_0 t}{\gamma^2 + \omega^2} - \frac{2\gamma \omega^2 v_0}{(\gamma^2 + \omega^2)^2} + \frac{\omega v_0 \exp(-\gamma t)}{(\gamma^2 + \omega^2)^2} \times \\ &\quad \times [(\gamma^2 - \omega^2) \sin \omega t + 2\gamma \omega \cos \omega t] + \\ &\quad + \sum_{k=1}^N v_k \exp(-\gamma(t-t_k)) \frac{\sin \omega(t-t_k)}{\omega}; \\ C_1 &= -\bar{x}(0); \quad C_2 = \frac{v_0 - \bar{x}'(0) - \gamma \bar{x}(0)}{\omega}; \\ \omega &= \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}; \quad \bar{x}(0) = - \sum_{k=1}^N v_k \exp(\gamma t_k) \frac{\sin \omega t_k}{\omega}; \\ \bar{x}'(0) &= \frac{2\omega^4 v_0}{(\gamma^2 + \omega^2)^2} + \\ &\quad + \sum_{k=1}^N v_k \exp(\gamma t_k) \frac{\gamma \sin \omega t_k + \omega \cos \omega t_k}{\omega}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Полученное решение можно использовать как для моделирования траектории латерального движения консоли кантилевера АСМ, так и для моделирования траекторий латерального движения сенсоров в зондовых микросистемах записи и считывания информации. С помощью выражений (11) легко также найти амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики кантилевера. Основным преимуществом предлагаемой модели (по сравнению с другими известными моделями) является то, что в ее рамках удается получить точное аналитическое выражение для траектории. Уравнение (9) очень просто обобщается на двумерный случай путем введения двух эффективных масс, коэффициентов жесткости и постоянных затухания [8].

В заключение отметим, что при больших нагрузках кроме явления прилипания — скольжения в системе зонд — образец могут происходить деформация и изнашивание, химические реакции и

фазовые переходы. По этим причинам реальная картина взаимодействия зонда с поверхностью оказывается чрезвычайно сложной.

Список литературы

1. Быков В. А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 21.
2. Бараш Ю. С. Силы Ван-дер-Ваальса. М.: Наука. 1988.
3. Моисеев Ю. Н., Мостепаненко В. М., Панов В. И. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование сил и пространственного разрешения в атомно-силовом микроскопе // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 1. С. 141—148.
4. Buttner H., Gerlach E. Van Der Waals-Interaction of ionic and covalent crystals // Chem. Phys. Lett. 1970. V. 5. N 2. P. 91.
5. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. 1988.
6. Gotsmann B., Anczykowski B., Seidel C., Fuchs H. Determination of tip-sample interaction forces from measured dynamic force spectroscopy curves // Appl. Surf. Sci. 1999. V. 140. P. 314—319.
7. Рехвишвили С. Ш. Особенности силовых взаимодействий в бесконтактном режиме атомно-силового микроскопа // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 12. С. 46—50.
8. Дедков Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 585—618.

УДК 621.385

К. Сааль^{1, 2}, В. Саммелсельг¹, А. Лыхмус¹, Е. Кууск³, С. Копанчук²,
Г. Райдару², Т. Ринкен³ и А. Ринкен²,
Институты ¹физики, ²органической и биоорганической химии,
³физической химии, Тартуский Университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ИММОБИЛИЗАЦИИ ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СЛЮДЫ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИЕЙ И КИНЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ*

Методами ферментативной кинетики и визуализацией с помощью атомно-силового микроскопии (АСМ) была исследована энзиматическая активность глюкозооксидазы (Е. С 1.1.3.4), иммобилизированной на поверхности слюды. Активность иммобилизованного энзима уменьшалась с уменьшением концентрации γ -аминопропилтриметоксисилана, который применяли на первом этапе активации слюды, в то время как результаты исследований на АСМ показали достаточно однородное наполнение поверхности энзимом.

Введение

Широко используемые ферментативные биосенсоры обычно состоят из различных кислородных сенсоров в сочетаниях с различными оксидоредуктазами,

*Работа проведена при финансовой поддержке Эстонского Научного Фонда (гранты 4603 и 3871) и Эстонского фонда Инноваций (гранты 21 it и 18kt).

которые поглощают молекулярный кислород при реакциях окисления разных компонентов. Оксидоредуктазы — это большой класс энзимов, в котором более чем 800 различных представителей [1], и одним из первых направлений их использования как биокатализаторов было применение в разработке биосенсоров [2]. Среди оксидоредуктаз глюкозо-

оксидаза (Е. С 1.1.3.4), которая селективно катализирует реакцию окисления глюкозы кислородом, благодаря своей стабильности и высокой воспроизводимости результатов является хорошим примером для разработки ферментативных биосенсоров. Для эффективного использования биосенсоров необходимо активный энзим биосенсора зафиксировать на нерастворимом носителе, что делает возможным его многократное применение. Однако пока еще очень мало информации о том, где и как связывается энзим с твердой поверхностью носителя. В данном исследовании глюкозооксидаза иммобилизовалась на поверхности слюды при использовании различных условий активации слюды и связывания фермента. Поверхности полученных препаратов визуализировали с помощью атомно-силового микроскопии (АСМ), данные анализировались и сопоставлялись с данными по активностям энзима, которые определяли кинетическими методами.

Полученное решение можно использовать как для моделирования траектории латерального движения консоли кантилевера АСМ, так и для моделирования траекторий латерального движения сенсоров в зондовых микросистемах записи и считывания информации. С помощью выражений (11) легко также найти амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики кантилевера. Основным преимуществом предлагаемой модели (по сравнению с другими известными моделями) является то, что в ее рамках удастся получить точное аналитическое выражение для траектории. Уравнение (9) очень просто обобщается на двумерный случай путем введения двух эффективных масс, коэффициентов жесткости и постоянных затухания [8].

В заключение отметим, что при больших нагрузках кроме явления прилипания — скольжения в системе зонд — образец могут происходить деформация и изнашивание, химические реакции и

фазовые переходы. По этим причинам реальная картина взаимодействия зонда с поверхностью оказывается чрезвычайно сложной.

Список литературы

1. **Быков В. А.** Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 21.
2. **Бараш Ю. С.** Силы Ван-дер-Ваальса. М.: Наука. 1988.
3. **Моисеев Ю. Н., Мостепаненко В. М., Панов В. И.** и др. Экспериментальное и теоретическое исследование сил и пространственного разрешения в атомно-силовом микроскопе // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 1. С. 141—148.
4. **Buttner H., Gerlach E.** Van Der Waals-Interaction of ionic and covalent crystals // Chem. Phys. Lett. 1970. V. 5. N 2. P. 91.
5. **Работнов Ю. Н.** Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. 1988.
6. **Gotsmann B., Anczykowski B., Seidel C., Fuchs H.** Determination of tip-sample interaction forces from measured dynamic force spectroscopy curves // Appl. Surf. Sci. 1999. V. 140. P. 314—319.
7. **Рехвиашвили С. Ш.** Особенности силовых взаимодействий в бесконтактном режиме атомно-силового микроскопа // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 12. С. 46—50.
8. **Дедков Г. В.** Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 585—618.

УДК 621.385

К. Сааль^{1, 2}, В. Саммелсельг¹, А. Лыхмус¹, Е. Кууск³, С. Копанчук², Г. Райдару², Т. Ринкен³ и А. Ринкен²,
Институты ¹физики, ²органической и биоорганической химии, ³физической химии, Тартуский Университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ИММОБИЛИЗАЦИИ ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СЛЮДЫ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИЕЙ И КИНЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ*

Методами ферментативной кинетики и визуализацией с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) была исследована энзиматическая активность глюкозооксидазы (Е. С 1.1.3.4), иммобилизированной на поверхности слюды. Активность иммобилизованного энзима уменьшалась с уменьшением концентрации γ -аминопропилтриметоксисилана, который применяли на первом этапе активации слюды, в то время как результаты исследований на АСМ показали достаточно однородное наполнение поверхности энзимом.

Введение

Широко используемые ферментативные биосенсоры обычно состоят из различных кислородных сенсоров в сочетаниях с различными оксидоредуктазами,

которые поглощают молекулярный кислород при реакциях окисления разных компонентов. Оксидоредуктазы — это большой класс энзимов, в котором более чем 800 различных представителей [1], и одним из первых направлений их использования как биокатализаторов было применение в разработке биосенсоров [2]. Среди оксидоредуктаз глюкозо-

оксидаза (Е. С 1.1.3.4), которая селективно катализирует реакцию окисления глюкозы кислородом, благодаря своей стабильности и высокой воспроизводимости результатов является хорошим примером для разработки ферментативных биосенсоров. Для эффективного использования биосенсоров необходимо активный энзим биосенсора зафиксировать на нерастворимом носителе, что делает возможным его многократное применение. Однако пока еще очень мало информации о том, где и как связывается энзим с твердой поверхностью носителя. В данном исследовании глюкозооксидаза иммобилизовалась на поверхности слюды при использовании различных условий активации слюды и связывания фермента. Поверхности полученных препаратов визуализировали с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ), данные анализировались и сопоставлялись с данными по активностям энзима, которые определяли кинетическими методами.

*Работа проведена при финансовой поддержке Эстонского Научного Фонда (гранты 4603 и 3871) и Эстонского фонда Инноваций (гранты 21 it и 18kt).

Методы

Иммобилизация энзима. Свежесколотые листочки слюды (мусковит) (са 1×1 см) силанизировались с помощью γ -аминопропилтриэтоксисилана (от 0,0001 % до 1 %) в 95 %-ном ацетоне по методике, описанной в [3]. Для активации силанизированную слюду промывали ацетоном и инкубировали в течение двух часов с 0,2 % 1,4-фенилендиизоцианатом в 10 %-ном растворе пиридин/диметилформаида. Поверхность промывалась метанолом, ацетоном, водой и натрий-фосфатным буфером, рН = 7,6. Для иммобилизации глюкозооксидазы ее добавляли (в концентрации от 50 нг/мл до 50 мг/мл) и оставляли инкубироваться на ночь в буферном растворе при 4 °С. Перед измерением на АСМ поверхность промывалась водой для устранения несвязавшихся веществ и солей.

Измерение энзиматической активности. Активность глюкозооксидазы (из Asp. Niger, Sigma Chemical Co.) измерялась электрохимически с помощью кислородного датчика типа Кларка, в натрий-ацетатном буфере (0,1 моль/л, рН = 5,6) при 25 °С и при постоянном перемешивании [4]. Активность иммобилизованного энзима определяли по динамике изменения силы тока датчика. Все статические и кинетические параметры вычислялись исходя из ранее предложенной модели интеграционного биосенсора [5] методом нелинейных корреляций.

Измерения на АСМ. Визуализация свежепросушенной поверхности слюды проводилась на АСМ (AutoProbe CP, Park SI) методом прерывистого контакта (ПК) на воздухе. При этом использовались кремниевые кантилеверы с коническими острями от фирмы Ultralevers (Park SI). Скорость сканирования и расстояние между наконечником и поверхностью были оптимизированы так, чтобы поверхность образца не изменялась в процессе исследования и была хорошо отображена.

Результаты и обсуждение

Слюда была выбрана носителем энзимов по следующим причинам:

- она имеет идеальную поверхность для измерения на АСМ;
- есть возможность ковалентного связывания энзима;
- она очень перспективна при разработке биосенсоров.

Поверхность свежесколотой слюды была почти совершенно плоской и можно было провести четкую границу между обработанной и необработанной слюдой. После силанизации слюды 1 %-ным раствором γ -аминопропилтриметоксисилана поверхность приобретала волнистую однородность с максимальной шероховатостью 4–6 нм (рис. 1, а). Средняя квадратическая шероховатость обработанной поверхности составляла 0,6 нм, что относительно высоко, если сравнивать с шероховатостью необработанной слюды (0,02 нм). Активация силанизированной слюды 0,2 %-ным раствором 1,4-фенилендиизоцианата незначительно изменяла топографию поверхности (рис. 1, б), в то время как средняя квадратическая шероховатость увеличилась до 0,8 нм. После иммобилизации глюкозооксидазы на активированную слюду на ее поверхности появились большие неровности диаметром от 100 до 400 нм и высотой 50 нм (рис. 2, см. третью сторону обложки). Это может означать, что во время иммобилизации энзимы образуют конгломераты значительных размеров, так как в естественных условиях

димерные молекулы глюкозооксидазы имеют размеры 5×8 нм [6]. Уменьшение концентрации силанизирующего агента до 0,1 % без каких-либо изменений в остальных этапах связывания привело к исчезновению больших конгломератов и показало большую однородность в насыщенности поверхности энзимом (рис. 3, а, см. третью сторону обложки).

Аналогичная насыщенность поверхности также наблюдалась и после дополнительного уменьшения концентрации γ -аминопропилтриметоксисилана до 0,0001 % (рис. 3, а–г, см. третью сторону обложки). Однако уменьшение концентрации силанизирующего агента приводило и к уменьшению энзиматической активности иммобилизированной глюкозооксидазы (рис. 4). Это означает, что объем, заполняемый энзимом на обработанной поверхности слюды, непосредственно зависел от концентрации γ -аминопропилтриметоксисилана, используемого при первичной обработке поверхности, в то время как остальные параметры процесса связывания оставались неизменными. Если принять, что во время иммобилизации молекулы энзима в основном сохраняют свою естественную структуру (в двумерном пространстве), а 1 см^2 поверхности слюды, силанизированной γ -аминопропилтриметоксисиланом, содержит 29 ± 7 пмоль глюкозооксидазы, что соответствует приблизительно 40 % максимально возможного мономолекулярного насыщения

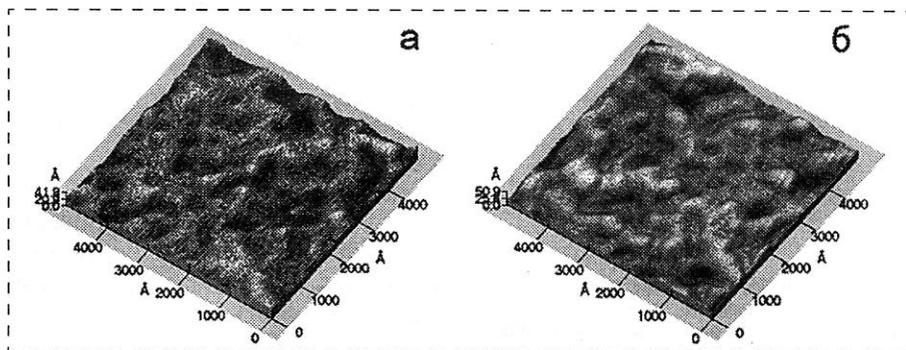


Рис. 1. Трехмерное изображение силанизированной (а) и активированной (б) поверхности слюды, ПК-АСМ, 500×500 нм

этой поверхности молекулами энзима, то согласно выявленной зависимости (рис. 4), насыщенность, видимо, не превышает 50 %-го уровня даже при очень высокой концентрации силанизирующего агента. Поэтому есть основания предполагать, что, по крайней мере, часть поверхности покрыта белком, не обладающим каталитической активностью.

Сравнение кинетических констант показало, что k_{cat} равна 4,0 мкмоль O_2 /мин (на 1 мкмоль растворенного фермента) и 0,36 мкмоль O_2 /мин (на 1 см² слюды) соответственно для растворенной и связанной с поверхностью слюды глюкозооксидазы. При кинетических анализах также обнаружилось, что насыщенный раствор глюкозооксидазы (Lot 76F-0188) содержал только 25 % активных молекул от всего количества энзима, т. е. специфическая активность фермента была 60 000 ед/г для данного образца.

Таким образом, беря в расчет реальную специфическую активность энзима, мы можем утверждать, что максимальная насыщенность поверхности, достигаемая при вариации концентрации γ -аминопропилтриметоксисилана, составляет 200 %. Это означает, что должны существовать дополнительные вертикальные структуры в энзимном слое, которые выстраиваются из всех этих молекул

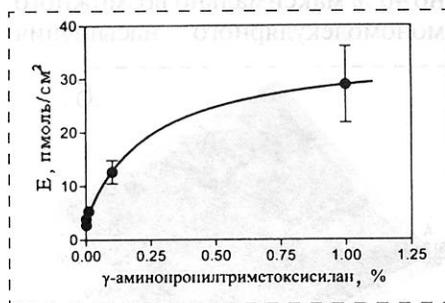


Рис. 4. Зависимость количества иммобилизованного активного энзима от концентрации γ -аминопропилтриметоксисилана. Активность иммобилизованной глюкозооксидазы определялась в 0,1-мольном ацетатном буфере (рН = 5,6) при 25 °С, концентрация глюкозы составляла 5 ммоль/л

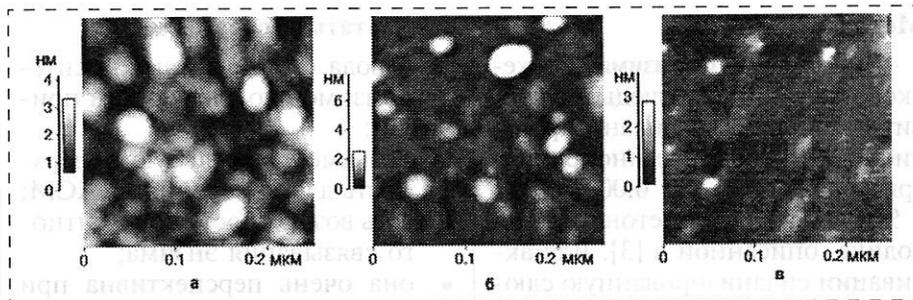


Рис. 5. Молекулы глюкозооксидазы на поверхности слюды, ПК-АСМ, 250 × 250 нм. Свежесколотая слюда обрабатывалась в течение 1 мин с 0,0001 %-ным γ -аминопропилтриметоксисилоном в 95 %-ном ацетоне, затем 2 ч с 0,2 %-ным 1,4-фенилендиизоционатом в 10 %-ном растворе пиридин/диметилформамида и потом инкубировалась 24 ч с глюкозооксидазой в концентрациях 0,5 мг/мл (а), 5 мкг/мл (б) и 50 нг/мл (в) в натрий-фосфатном буфере (рН = 7,6)

белка. Одним из объяснений может послужить то, что конгломераты белков, показанные на рис. 2 (см. третью сторону обложки), содержат дополнительное количество энзима, но поверхность этих структур не достаточно велика для получения всей необходимой дополнительной активности. Вместе с тем уменьшение концентрации силанизирующего агента уменьшает количество активного энзима и при концентрациях, меньших 0,1 %, тогда как при этих условиях не наблюдались видимые изменения в насыщенности поверхности энзимом. Таким образом, можно предположить, что существуют дополнительные вертикальные структуры, образуемые γ -аминопропилтриметоксисилоном и используемые для иммобилизации энзима, но которые невозможно выявить методами атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Уменьшение концентрации γ -аминопропилтриметоксисилана до 0,0001 % при первичной обработке поверхности слюды уменьшает энзиматическую активность на поверхности до уровня, который ниже измеряемого кинетическими методами предела, однако, как показано на рис. 3, г (см. третью сторону обложки), поверхность по-прежнему полностью заполнена белковой массой, которая не может быть индивидуально охарактеризована. При одновременном уменьшении количества γ -аминопропилтриметоксисила-

на и концентрации глюкозооксидазы в процессе ее иммобилизации уменьшилась также и насыщенность поверхности молекулами, что сделало возможным достижение молекулярного разрешения для энзима (рис. 5). Однако размерность обнаруженных субстанций, 10 × 10 нм и 3 нм в высоту (рис. 5, в), несколько отличается от той, которая ожидалась бы для чистой глюкозооксидазы [6]. Следует отметить, что измерения проводились на воздухе, а при этих условиях конформация энзима могла сильно измениться. Увеличение поперечных размеров молекул также могло быть вызвано достижением предела разрешения для АСМ, который зависит от реальных размеров острий. Предполагая, что иммобилизованные молекулы энзима представляют собой сферы диаметром $d_э = 5$ нм, и беря в расчет то, что предполагаемый диаметр кончика острия для АСМ $d_к = 8,7$ нм, диаметр молекул энзима можно выразить как $d_{э\text{набл}} = (d_э^2 + d_к^2)^{1/2} = 10$ нм [7]. Такая же переоценка размеров молекул энзима проводилась и в других более ранних исследованиях [8]. Улучшить положение можно, только уменьшив размеры острий для АСМ.

Несмотря на проблемы с определением поперечных (боковых) размеров молекулы энзима отчетливо наблюдались на поверхности. Это означает, что про-

стые методы, используемые для иммобилизации энзимов, позволяют (при подборе оптимальных концентраций и условий) визуализировать белки методом АСМ. Силанизационно-изотиоцианатная фиксация белка на поверхности слюды значительно быстрее и дешевле, чем применяемый метод абсорбции на поверхность золота [8] и, следовательно, может быть предложена для более широкого использования при визуализации

белков методом АСМ. Это открывает новые перспективы для изучения процессов на поверхности твердых материалов с участием биомакромолекул.

Список литературы

1. Enzyme nomenclature database. www.expasy.ch/enzyme/.
2. May S. W. Current Opinion in Biotechnology. 1999. N 10. P. 370.
3. Guo Z., Guilfoyle R. A., Thile A. J., Wang R., Smith L. M. Nucleic Acids Res. 1994. N 22. P. 5456.

4. Rincken T., Rincken A., Järv J., Tenno T. Biosensors & Bioelectronics. 1998. N 13. P. 801.
5. Rincken T., Tenno T. Biosensors & Bioelectronics. 2000. N 16. P. 153.
6. Rando D., Kohring G. W., Giffhorn F. Applied Microbiology and Biotechnology. 1997. N 48. P. 34.
7. Heinrich K. F. J. Electron beam X-ray microanalysis. Van Nostrand Reinhold Co., New York, London, Toronto, Melbourne. 1981. P. 427.
8. Losic D., Gooding J. J., Shapter J., Erokin P., Short K. 11th Australian Electrochemistry Conference. University of Western Sydney, Parramatta, Australia, Dec. 10–14th, 2000.

УДК 621.385.83

Г. В. Дедков, д-р физ.-мат. наук,
А. А. Кясов, канд. физ.-мат. наук,
Кабардино-Балкарский государственный
университет, г. Нальчик

ФЛУКТУАЦИОННО- ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЛАТЕРАЛЬНЫЕ СИЛЫ НА НАНОЗОНДАХ, ДВИЖУЩИХСЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ*

Вычисляются латеральные силы взаимодействия нанозонда сканирующего зондирующего микроскопа с поверхностью, обусловленные флуктуационно-электромагнитным механизмом. Впервые рассматриваются эффекты возбуждения плазмонов (с учетом пространственной дисперсии) и локальный диэлектрический отклик поверхности в приближении Друде. Численные расчеты выполнены для контактов кремниевого и алюминиевого зонда с поверхностью золота.

Введение

Исследование механизмов взаимодействия между поверхностью твердого тела и движущимися частицами (нанозондами) имеет большое значение для нанотрибологии и сканирующей зондирующей микроскопии (СЗМ) [1, 2]. В последнее время ведется большая работа по детализации процессов энергообмена между движущимися нанозондами и поверхностями, имеющих непосредственное отношение к физике трения.

Несмотря на то, что обсуждение микроскопических механизмов трения имеет достаточно длин-

ную историю [3], даже сейчас, более тридцати лет спустя, соответствующие вопросы являются предметом интенсивной теоретической дискуссии (см. [1, 2] и соответствующие ссылки).

Количественное измерение диссипативных (и консервативных) сил взаимодействия нанозондов с образцами стало принципиально возможным с развитием техники СЗМ, с одной стороны, и кварцевых кристаллических резонаторов — с другой [4].

Целью данной статьи является теоретический расчет латеральных флуктуационно-электромагнитных сил, которые действуют на нанозонд параболической формы, совершающий колебательное движение параллельно поверхности (в модуляционном режиме СЗМ). Мы получаем теоретические формулы для этих сил, соответствующие различным участкам электромагнитных спектров поглощения контактирующих тел. В частности, впервые рассматриваются процессы резонансного возбуждения поверхностных плазмонов.

Теория

Общая нерелятивистская теория флуктуационно-электромагнитных сил между движущимися нейтральными атомами (нанозондами) и плоскими атомарно-гладкими поверхностями была развита в наших работах [5, 6] в рамках локального приближения для диэлектрического отклика поверхности. В недавних работах [7, 8] было показано, что основные результаты этой теории легко обобщаются с учетом эффектов пространственной дисперсии. Для получения соответствующих формул необходимо заменить (локальную) функцию диэлектрического отклика поверхности на формулу

$$\Delta_s(\omega, \mathbf{q}) = \frac{\pi - qI_0}{\pi + qI_0}, \quad (1)$$

*Работа выполнена при частичной поддержке фонда ISSEP (2001).

стые методы, используемые для иммобилизации энзимов, позволяют (при подборе оптимальных концентраций и условий) визуализировать белки методом АСМ. Силанизационно-изотиоцианатная фиксация белка на поверхности слюды значительно быстрее и дешевле, чем применяемый метод абсорбции на поверхность золота [8] и, следовательно, может быть предложена для более широкого использования при визуализации

белков методом АСМ. Это открывает новые перспективы для изучения процессов на поверхности твердых материалов с участием биомакромолекул.

Список литературы

1. Enzyme nomenclature database. www.expasy.ch/enzyme/.
2. May S. W. Current Opinion in Biotechnology. 1999. N 10. P. 370.
3. Guo Z., Guilfoyle R. A., Thile A. J., Wang R., Smith L. M. Nucleic Acids Res. 1994. N 22. P. 5456.

4. Rincken T., Rincken A., Järv J., Tenno T. Biosensors & Bioelectronics. 1998. N 13. P. 801.
5. Rincken T., Tenno T. Biosensors & Bioelectronics. 2000. N 16. P. 153.
6. Rando D., Kohring G. W., Giffhorn F. Applied Microbiology and Biotechnology. 1997. N 48. P. 34.
7. Heinrich K. F. J. Electron beam X-ray microanalysis. Van Nostrand Reinhold Co., New York, London, Toronto, Melbourne. 1981. P. 427.
8. Losic D., Gooding J. J., Shapter J., Erokin P., Short K. 11th Australian Electrochemistry Conference. University of Western Sydney, Parramatta, Australia, Dec. 10–14th, 2000.

УДК 621.385.83

Г. В. Дедков, д-р физ.-мат. наук,
А. А. Кясов, канд. физ.-мат. наук,
Кабардино-Балкарский государственный
университет, г. Нальчик

ФЛУКТУАЦИОННО- ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЛАТЕРАЛЬНЫЕ СИЛЫ НА НАНОЗОНДАХ, ДВИЖУЩИХСЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ*

Вычисляются латеральные силы взаимодействия нанозонда сканирующего зондирующего микроскопа с поверхностью, обусловленные флуктуационно-электромагнитным механизмом. Впервые рассматриваются эффекты возбуждения плазмонов (с учетом пространственной дисперсии) и локальный диэлектрический отклик поверхности в приближении Друде. Численные расчеты выполнены для контактов кремниевого и алюминиевого зонда с поверхностью золота.

Введение

Исследование механизмов взаимодействия между поверхностью твердого тела и движущимися частицами (нанозондами) имеет большое значение для нанотрибологии и сканирующей зондирующей микроскопии (СЗМ) [1, 2]. В последнее время ведется большая работа по детализации процессов энергообмена между движущимися нанозондами и поверхностями, имеющих непосредственное отношение к физике трения.

Несмотря на то, что обсуждение микроскопических механизмов трения имеет достаточно длин-

ную историю [3], даже сейчас, более тридцати лет спустя, соответствующие вопросы являются предметом интенсивной теоретической дискуссии (см. [1, 2] и соответствующие ссылки).

Количественное измерение диссипативных (и консервативных) сил взаимодействия нанозондов с образцами стало принципиально возможным с развитием техники СЗМ, с одной стороны, и кварцевых кристаллических резонаторов — с другой [4].

Целью данной статьи является теоретический расчет латеральных флуктуационно-электромагнитных сил, которые действуют на нанозонд параболической формы, совершающий колебательное движение параллельно поверхности (в модуляционном режиме СЗМ). Мы получаем теоретические формулы для этих сил, соответствующие различным участкам электромагнитных спектров поглощения контактирующих тел. В частности, впервые рассматриваются процессы резонансного возбуждения поверхностных плазмонов.

Теория

Общая нерелятивистская теория флуктуационно-электромагнитных сил между движущимися нейтральными атомами (нанозондами) и плоскими атомарно-гладкими поверхностями была развита в наших работах [5, 6] в рамках локального приближения для диэлектрического отклика поверхности. В недавних работах [7, 8] было показано, что основные результаты этой теории легко обобщаются с учетом эффектов пространственной дисперсии. Для получения соответствующих формул необходимо заменить (локальную) функцию диэлектрического отклика поверхности на формулу

$$\Delta_s(\omega, \mathbf{q}) = \frac{\pi - qI_0}{\pi + qI_0}, \quad (1)$$

*Работа выполнена при частичной поддержке фонда ISSEP (2001).

где

$$I_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dk_z}{(k_z^2 + q^2)\varepsilon(\omega, \mathbf{k})}, \quad (2)$$

$\varepsilon(\omega, \mathbf{k})$ — диэлектрическая функция образца; ω — частота; $\mathbf{k} = (\mathbf{q}, k_z)$; k_z — нормальная компонента волнового вектора (в направлении, перпендикулярном поверхности); \mathbf{q} — двумерный волновой вектор в плоскости поверхности. В локальном приближении, очевидно, формула (2) сводится к виду [5, 6]

$$\Delta_s(\omega, \mathbf{q}) \rightarrow \Delta(\omega) = \frac{\varepsilon(\omega) - 1}{\varepsilon(\omega) + 1}.$$

С учетом этого общее выражение для латеральной силы, действующей на атом, движущийся с нерелятивистской скоростью V параллельно поверхности, имеет вид [7, 8]

$$F(z_0, V) = \frac{2\hbar}{\pi^2 V} \int d\omega \int [dq_x dq_y q \exp(-2q|z_0|) \times \\ \times \text{cth}\left(\frac{\omega\eta}{2k_B T}\right) \{(\omega + q_x V)[\Delta_s''(\omega, \mathbf{q})\alpha''(\omega + q_x V) - \\ - \Delta_s''(\omega + q_x V, \mathbf{q})\alpha''(\omega)] + (\omega - q_x V)[\Delta_s''(\omega, \mathbf{q}) \times \\ \times \alpha''(\omega - q_x V) - \Delta_s''(\omega - q_x V, \mathbf{q})\alpha''(\omega)]\}, \quad (3)$$

где z_0 — расстояние от поверхности; $\alpha''(\omega)$ и $\Delta_s''(\omega, \mathbf{q})$ — комплексные компоненты атомной поляризуемости и функции диэлектрического отклика поверхности; k_B и \hbar — постоянные Больцмана и Планка; T — температура поверхности.

Интегрирование в (3) ведется по положительным проекциям волновых векторов и по положительным частотам. Латеральная сила, действующая на зонд СЗМ, получается из (3) в аддитивном приближении [5, 6]. В этом случае предполагается, что температуры зонда и поверхности одинаковы.

Интересно рассмотреть резонансную связь зонда с поверхностью при возбуждении плазмонов. Будем в дальнейшем иметь в виду металлическую поверхность. Используя приближение Клаузиуса — Моссотти для связи атомной поляризуемости и диэлектрической функции материала зонда, вблизи резонансной ветви плазмонов, возбуждаемых в кремниевой игле СЗМ (кремний — стандартный материал, используемый при изготовлении кантилеверов), запишем

$$\alpha''(\omega) = \pi\omega_p(q)\delta(\omega - \omega_p(q)/\sqrt{3})/8\sqrt{3}n, \quad (4)$$

где n — объемная концентрация атомов; $\omega_p(q)$ — дисперсионное уравнение плазмонов зонда. Вместе с тем, функция диэлектрического отклика по-

верхности (в резонансном приближении) имеет вид [9]

$$\Delta_s''(\omega, \mathbf{q}) = \frac{\pi\omega_s^2}{2\omega_s(q)}\delta(\omega - \omega_s(q)). \quad (5)$$

Входящие в (4) и (5) дисперсионные уравнения плазмонов кремния и металла имеют вид [9, 10]

$$\tilde{\omega}_p^2(q) = \tilde{\omega}_p^2 + \tilde{\beta}q^2 + \tilde{\gamma}q^4; \quad (6)$$

$$\omega_s^2(q) = \omega_s^2 - \alpha q + \beta q^2 + 0,25q^4, \quad (7)$$

где $\tilde{\omega}_p(q) = \omega_p(q)/\sqrt{3}$; $\tilde{\omega}_p = \omega_p/\sqrt{3}$; ω_s — частота поверхностного плазмона.

Например, входящие в (6), (7) коэффициенты для кремния [10] и металла с параметром модели "желе" $r_s = 3$ [9] (это примерно соответствует Au или Cu) равны (здесь используем атомные единицы): $\tilde{\omega}_p = 0,376$, $\omega_s = 0,236$, $\alpha = 0,159$, $\beta = 0,86$, $\tilde{\beta} = 0,025$, $\tilde{\gamma} = 0,0026$.

В низкотемпературном пределе, с учетом (6) и (7), латеральная сила получается из (3) путем интегрирования по объему параболического зонда (ср. с [5, 6])

$$F = \frac{2\hbar\omega_s^2 R}{V} \int_z^\infty (y-z)dz \int_0^\infty q^2 dq \frac{\tilde{\omega}_p(q)}{\omega_s(q)} \exp(-2qy) \times \\ \times \frac{\tilde{\omega}_p(q) - \omega_s(q)}{\sqrt{q^2 V^2 - (\tilde{\omega}_p(q) - \omega_s(q))^2}} \theta\left(1 - \left|\frac{\tilde{\omega}_p(q) - \omega_s(q)}{qV}\right|\right), \quad (8)$$

где R — радиус кривизны зонда; z — расстояние аперкса зонда от поверхности; $\theta(x)$ — функция Хевисайда.

При $V \ll V_F$ (V_F — скорость Ферми), что заведомо выполняется для типичных условий сканирования СЗМ как в контактном, так и в модуляционном режиме, формула (8) далее упрощается с учетом того, что интегрирование по волновым векторам осуществляется по узкой области, в которой выражение под знаком квадратного корня в (8) положительно. Разлагая $\tilde{\omega}_p(q)$ в ряд Тейлора вблизи точки q_0 , являющейся корнем уравнения $\omega_s(q_0) = \tilde{\omega}_p(q_0)$ (с учетом линейного члена), и проводя интегрирование, получим

$$F_p \approx -\frac{\pi}{8} \hbar V R \left(\frac{\omega_s}{a}\right)^2 \frac{\tilde{\omega}_p(q)q_0}{\omega_s(q_0)} \exp(-2q_0 z) \times \\ \times \left[2 - 2q_0 z + q_0 \left(\frac{a_s}{\omega_p(q)} - \frac{a_s}{\omega_s(q_0)}\right)\right], \quad (9)$$

причем параметры a , a_s , \tilde{a}_s определяются формулами

$$a = \frac{\alpha + 2(\beta - \tilde{\beta})q_0 + q_0^3(1 - 4\tilde{\gamma})}{2\tilde{\omega}_p(q_0)}; \quad (10)$$

$$a_s = \frac{\alpha + 2\beta q_0 + q_0^3}{2\omega_s(q_0)}; \quad (11)$$

$$\tilde{a}_s = \frac{\alpha + 2\tilde{\beta}q_0 + 4\tilde{\gamma}q_0^3}{2\tilde{\omega}_p(q_0)}. \quad (12)$$

На рис. 1 показаны типичные зависимости силы F_p от расстояния h для контакта кремниевого зонда с поверхностью при различных значениях параметра "желе" r_s , скорости $V = 1$ см/с и радиусе кривизны зонда $R = 30$ нм. На рис. 1 видно, что сила F_p является отрицательной (тормозящей) при $z < 1,4$ ат. ед., тогда как при $h \geq 1,4$ сила $F_p > 0$, и

зонд получает энергию от поверхностных плазмоннов. Однако при рассматриваемых скоростях $V \ll V_F$ такая ситуация возможна лишь при $\tilde{\omega}_p > \omega_s$. Более того, плазмонный вклад в латеральную силу может отсутствовать при перемене местами материалов зонда и поверхности (это как раз имеет место для рассматриваемого типа контакта), поскольку уравнение $\omega_s(q_0) = \tilde{\omega}_p(q_0)$ может не иметь решений. Еще одна интересная особенность состоит в том, что зависимость F_p от r_s не является монотонной (ср. кривые при разных r_s).

Другие вклады в латеральную силу могут быть вычислены в локальном приближении для диэлектрического отклика поверхности. Так, в пределе $T \rightarrow 0$, $V \rightarrow 0$ из (3) получим

$$F = \frac{3\hbar V}{4\pi z^5} \int_0^\infty d\omega \alpha''(\omega) \frac{d\Delta''(\omega)}{d\omega}. \quad (13)$$

Один из этих вкладов связан с низкочастотной частью электромагнитного спектра (область сопротивления на постоянном токе). Используя (13), можно показать, что для контакта кремний — металл соответствующая сила имеет вид [11]

$$F_{dc} \approx -0,03 \frac{\hbar RV}{z^3} \frac{(1-x^2 + (1+x^2)\ln x)x}{(1-x^2)^2}, \quad (14)$$

где $x = 1,5\sigma_2/\sigma_1$; σ_1 и σ_2 — проводимости зонда (1) и образца (2) соответственно. Значения зависящей от x функции в (14) изменяются в интервале $\pm 0,15$, но для рассматриваемого контакта, а также в случае контакта металл — кремний сила оказывается пренебрежимо малой, поскольку входящая в (14) функция от x стремится к нулю при $x \rightarrow 0$ и при $x \rightarrow \infty$.

Следующий вклад в латеральную силу связан с областью частот электромагнитного спектра, расположенной левее области, соответствующей плазмонному краю металла, в которой имеется перекрытие спектра поглощения металла и оптического пика поглощения кремния (4,6 эВ). В приближении Друде для диэлектрической функции (металла), пренебрегая шириной оптической линии поглощения кремния и записывая соответствующую формулу для мнимой части поляризуемости в виде, аналогичном (4), с учетом (13) получим (ср. с (4.23) в [2])

$$F_{opt} \approx \frac{9\gamma}{32\pi\epsilon_2} \frac{\hbar RV y^2 (12x_0^4 - 4x_0^2 y^2 + 4x_0^2 - y^4)}{z^3 x_0 (4x_0^4 - 4x_0^2 y^2 + 4x_0^2 + y^4)^2}, \quad (15)$$

где ϵ_2 — мнимая часть диэлектрической проницаемости кремния в максимуме пика оптического поглощения; $y = \omega_M \tau$; $x_0 = \omega_0 \tau$; ω_M и ω_0 — частота

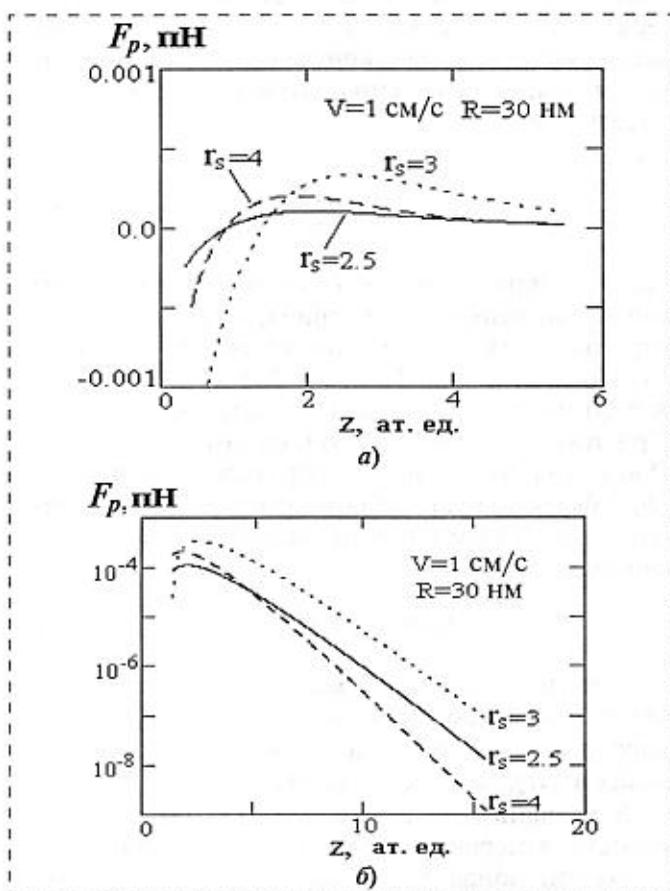


Рис. 1. Зависимость плазмонного вклада в латеральную силу на нанозонде от расстояния до поверхности при различных параметрах модели "желе", расчет по формуле (9). Область отрицательности силы соответствует "нормальному трению"

объемных плазмонов металла и частота линии поглощения кремния; $\gamma = \Gamma\tau$ — безразмерная ширина линии; τ — время релаксации электронов проводимости в модели Друде.

Наконец, мы должны учесть вклад от "крыла" линии слева от частоты поверхностного плазмона $\omega_M/\sqrt{2}$, поскольку зависящая от (x_0, y) функция в (15) имеет резонансный всплеск вблизи нее (рис. 2). Для рассматриваемого контакта при $r_s = 3$, $\tau = 3 \cdot 10^{14}$ с, $\epsilon_2 = 30$, $\gamma = 20$ в совокупности с (15) получим

$$F_{opt} \approx -120 \frac{\hbar R V}{z^3}. \quad (16)$$

Формула (16) отвечает "нормальному" трению, а соответствующий вклад в латеральную силу доминирует над теми, которые определяются формулами (9) и (14). Однако числовой коэффициент в (16) очень сильно зависит от взаимного расположения пиков поглощения контактирующих материалов (рис. 2). Как следует из этого рисунка, вполне возможна и ситуация, при которой перекрытие линии с пиком поглощения поверхности происходит в области положительных значений диэлектрического отклика поверхности, а в этом случае мы получим "аномальное" трение и положительное значение латеральной силы на зонде. Вместе с тем, если ширина линии превышает ширину резонансной области функции $f(x, y)$ в (15) (составляющую примерно $0,03\omega_M/\sqrt{2}$), то интеграл перекрытия оказывается малым, и тогда числовой коэффициент в (16) уменьшается до значений 0,01—0,001.

Флуктуационно-электромагнитные силы и добротность эквивалентного осциллятора в латеральном динамическом режиме СЗМ

Используя полученные результаты, нетрудно оценить ожидаемый вклад флуктуационных сил в

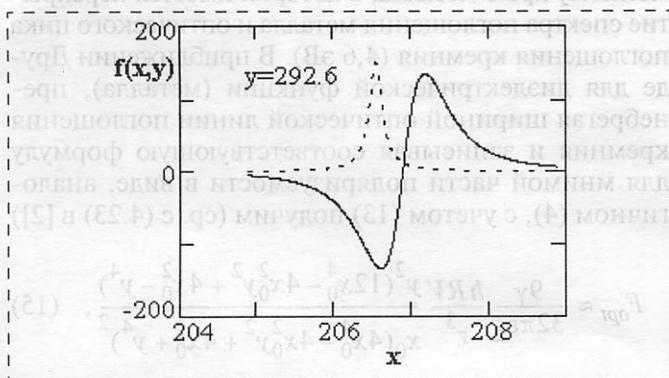


Рис. 2. Функция диэлектрического отклика поверхности $f(x, y)$ в формуле (15) (приближение Друде) и схематический вид линии оптического поглощения кремниевого нанозонда

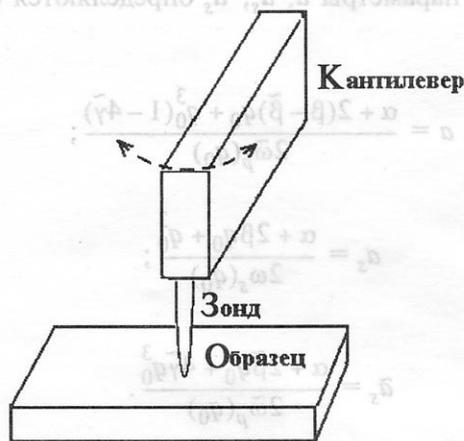


Рис. 3. Параллельная вибрационная мода СЗМ

добротность осциллятора СЗМ. Очевидно, для измерения диссипативных сил предпочтительна геометрия латеральной динамической моды, когда расстояние между зондом и поверхностью сохраняется постоянным (рис. 3). Тогда, записывая латеральную силу в виде $F = -C\hbar R V/z^3$ (C — соответствующая числовая константа), добротность осциллятора, обусловленная этой силой, можно записать в виде

$$Q_f = 2\pi \frac{E}{\Delta W} = \frac{1}{\pi} \frac{k}{f} \frac{z^3}{\hbar R C}, \quad (17)$$

где E — упругая энергия кантилевера; ΔW — энергия диссипации за один период; k и f — постоянная упругой жесткости и основная частота кантилевера. Полагая $k = 30$ Н/м, $f = 300$ кГц, $z = 0,5$ нм, $R = 30$ нм и $C = 120$, из (17) получим $Q_f \approx 3 \cdot 10^3$. При этих же условиях из (9) получим $Q_f = -1,2 \cdot 10^7$. Обозначая собственную добротность кантилевера Q_i , "эффективную" добротность с учетом электромагнитной связи с поверхностью можно найти по формуле

$$1/Q_{eff} = 1/Q_f + 1/Q_i. \quad (18)$$

Для типичных кантилеверов $Q_i = 10^3 \div 10^4$, поэтому мы можем заключить, что флуктуационно-диссипативные силы должны давать ощутимый вклад в затухание осциллятора СЗМ.

В недавних экспериментах [13, 14] соответствующие измерения проводились при нормальном движении зонда по отношению к поверхности (в динамическом режиме). Рассматривались контакты кремний (зонд) — слюда (поверхность) и алюминий (зонд) — золото (поверхность). Для этих случаев нет формулы, аналогичной (3), но для оце-

нок можно предположить, что она идентична (3) с вдвое большим числовым коэффициентом, как это имеет место для заряженных частиц и дипольных молекул [5, 6]. Тогда, при гармоническом законе движения нанозонда для средней мощности диссипации энергии за один период получим

$$\bar{P}(d) = \frac{2\pi^2 C f^2}{A(d/A - 1)^{3/2}}, \quad (19)$$

где $h = d - A$; A — амплитуда колебаний; h — минимальное расстояние апекса зонда от поверхности.

Расчет по формуле (19) показывает, что получаемые значения $\bar{P}(d)$ на несколько порядков меньше экспериментальных. В этом случае, однако, можно ожидать, что более существенным механизмом диссипации может быть разрыв и образование адгезионных связей [1], даже если в эксперименте нет сильно выраженного эффекта вхождения зонда в контакт (в английской терминологии — "snap in"), поскольку любая резкая перестройка электронных орбиталей на границе контакта будет сопровождаться диссипативными потерями.

Выводы

Получены формулы для флуктуационно-электромагнитных диссипативных сил взаимодействия нанозонда с поверхностью и оценен их вклад в добротность осциллятора СЗМ (при параллельном и перпендикулярном к поверхности движении). Впервые получена формула для латеральной силы, обусловленной резонансной связью с поверхностными плазмонами. Эта сила экспоненциально зависит от расстояния до поверхности и может быть положительной ("аномальное трение") при достаточно больших расстояниях апекса зонда от поверхности и отрицательной ("нормальное трение") при малых расстояниях. Другие вклады в латеральную силу могут быть рассчитаны в локальном приближении для диэлектрической функции поверхности и, в принципе, также могут иметь разный знак в зависимости от характера расположения резонансных пиков зонда и поверхности. Физически возможность передачи энергии зонду связана с тем, что зонд и поверхность представляют систему связанных осцилляторов, в которой, как известно, энергия может передаваться в обе стороны. Такой эффект невозможен для более простых систем, таких как "заряженная частица — поверхность" и "постоянный диполь — поверхность", поскольку в этом случае "зонды" не имеют внутренних степеней свободы.

Проведенные численные оценки латеральных сил показывают, что в нормальном режиме колебаний зонда флуктуационный механизм, по всей видимости, не является основным фактором затухания осциллятора СЗМ (в рамках теории [5, 6]), но в латеральной динамической моде может проявляться более заметным образом. Выполнение соответствующих измерений представляется критически важным для изучения диссипативных сил и проверки теоретических моделей динамического трения в наномасштабах. В будущем, при конкретизации физических механизмов взаимодействия, динамические измерения диссипативных сил могут стать важным инструментом зондирования диэлектрических и оптических свойств наноструктур.

Авторы благодарны Б. Готсманну за возможность ознакомления с работой [14] до ее публикации.

Список литературы

1. Persson B. N. J. Sliding Friction: Physical Principles and Applications, Heidelberg, Springer, 1998.
2. Дедков Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // УФН. 2000. Т. 170. № 6. С. 585—618.
3. Bowden F. P. and Tabor D. Friction and Lubrication. London: Methuen, 1967.
4. Krim J., Daly C. Electronic contributions to sliding friction // Physics of sliding friction / B. N. J. Persson, E. Tosatti (eds.). Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 191—201.
5. Kyasov A. A., Dedkov G. V. Electromagnetic fluctuation forces on a particle moving near a surface // Surf. Sci. 2000. V. 463. P. 11—21.
6. Дедков Г. В., Кясов А. А. Флуктуационно-электромагнитное взаимодействие движущихся частиц с плоской поверхностью // ФТТ. 2001. Т. 43. № 1. С. 169—176.
7. Дедков Г. В., Кясов А. А. Флуктуационно-диссипативное взаимодействие движущихся нейтральных атомов с плоской поверхностью: учет эффектов пространственной дисперсии // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. № 8. С. 68—74.
8. Dedkov G. V., Kyasov A. A. Nonrelativistic theory of electromagnetic forces on particles and nanoprobe moving near a surface // Phys. Reports. 2001 (refereed).
9. Annett J. A., Echenique P. M. Van der Waals interaction between an atom and a surface at finite separations // Phys. Rev. 1986. V. B34. N 10. P. 6583—6859.
10. Walter J. P., Cohen M. L. Plasmon dispersion in silicon // Phys. Rev. 1972. V. 5B. P. 3101—3107.
11. Дедков Г. В., Кясов А. А. Электромагнитные флуктуационно-диссипативные силы между нанозондом и поверхностью // ФТТ. 2001. Т. 43. № 3. С. 536—542.
12. Giessibl F. J., Bielefeldt H., Hembacher S. et al. Calculation of the optimal imaging parameters for modulation atomic force microscopy // Appl. Surf. Sci. 1999. V. 140. P. 352—357.
13. Gotsmann B., Seidel C., Anczykowski B. et al. Conservative and dissipative tip-sample interaction forces probed with dynamic AFM // Phys. Rev. 1999. V. B60. N 15. P. 11051—11061.
14. Gotsmann B., Fuchs H. Dynamic spectroscopy of conservative and dissipative forces in an Al—Au(111) tip-sample system // Phys. Rev. Lett. (in press).

УДК 621.382.049.077.001.576(06)

А. Г. Алексенко, д-р техн. наук, проф.,
ООО "АНГСТРЕМ — ЦЕНТР НАНОТЕХ"

НАНОИНДУСТРИЯ И МИКРОСИСТЕМЫ

Наноиндустрия и микросистемы являются ключевыми сферами высокотехнологического развития и могут изменить облик мира уже в ближайшее десятилетие. Приведенное общее описание одной из многочисленных разновидностей наномикросистем иллюстрирует универсальные возможности средств, использующих растущий арсенал нанотехники. Назрела необходимость оформить представления о наноиндустрии и микросистемах в виде Национальной целевой нанопрограммы, в комплексе с реализацией сформулированной в статье образовательной концепции.

Наноиндустрия и нанотехника

Ключевым фактором высокотехнологического развития страны в ближайшие годы явится создание наноиндустрии, базирующейся на технологическом, машиностроительном, производственном и научном обеспечении процессов, связанных с манипуляциями атомами и молекулами [1, 2]. Квантовый характер нанотехнологических процессов делает их в высшей степени наукоемкими и стимулирует развитие таких направлений, как атомно-молекулярный дизайн, вычислительные разделы химии, физики, биологии, многоуровневое математическое моделирование [3].

Разнообразие и универсальность нанотехнологических средств (для русского языка более органичен термин *нанотехника*) дает основание рассматривать их совокупность как "сложную" (или "большую") систему — в "классическом" истолковании [4] этого понятия. Такая система имеет общую "глобальную" цель [5] и включает в себя новые инструменты производства и науки, новые продукты интеллектуальной деятельности, новое понимание социальной роли человека [6].

Современный образ "большой" системы — это ее целевая многофункциональность, наукоемкость, гетерогенность привлекаемых средств и производств, способность к саморазвитию, модифицируемость, выживаемость в течение длительного срока (годы, десятки лет), перепрограммируемость, адаптивность к техническому и социальному прогрессу, делимость, способность к реконфигурации и живучесть в нештатных режимах и в условиях деградации подсистем.

Нанотехника, удовлетворяющая всем перечисленным выше качествам, способна коренным образом изменить производство, социальную сферу, повседневную жизнь людей уже к концу первого

десятилетия XXI века [1, 2, 6]. Поэтому развитие наноиндустрии обозначает путь к очередной, невиданной по своему размаху научно-технической революции.

Микросистемы

Микросистемная техника представлена в настоящее время интегрируемыми устройствами *микромеханики* [7] и ассимилируют технологические достижения микроэлектроники. Изделия микросистемной техники (*микросистемы*) применяются не только как компоненты электронной аппаратуры, но и как подсистемы (биочипы) для биологии [8]. *Микросистемы* — это *трансфер* новейших (не только микроэлектронных) технологий, позволяющий производить огромное разнообразие видов и форм продукции, в том числе изделий "двойного" (т. е. *народнохозяйственного и специального*) применения.

Несомненно, микросистемная техника, развиваемая в дальнейшем на основе наноиндустрии, приобретет все перечисленные качества "большой" системы и позволит этой системе производить изделия с уменьшенным количеством разнородных деталей и технологических операций.

Уменьшение числа деталей и технологических операций в микросистемной технике — это *проекция основной тенденции* микроэлектроники — интеграции компонентов в аппаратуре и "вертикальной" интеграции процессов ее создания (с помощью развитых средств информатики).

Особенность микросистемной техники заключается в структурном и технологическом объединении электронной составляющей микросистемы с ее микромеханическими, оптическими, акустическими и другими составляющими.

Иными словами, микросистемы "интегрируют" гетерогенность, присущую любой "большой" системе. Поэтому микросистемная техника естественным образом примыкает к нанотехнике, как к перспективной технологической, структурной и научной основе [9].

"Критические" технологии

Нанотехнологии, наноиндустрия, микромеханика, микросистемная техника — это примеры "критических", прорывных сфер приложения усилий передовых стран.

Такие области деятельности характеризуются *ежегодным удвоением объема капиталовложений в этих странах и, в ряде случаев, наличием приоритетных целевых национальных программ.*

В 2000 г. Конгресс США принял 10-летнюю программу, названную "*Национальной нанотехнологической инициативой*" [1, 2] и возведенную в этой стране в ранг наивысшего национального приоритета. Действующая с 1999 г. японская Национальная программа "*Астробой*" предусматривает создание

электронных компонентов для предельных условий эксплуатации, например, в открытом космосе, при ядерных взрывах, при температурах до 3000 °С. Национальные программы по нанотехнике существуют не только в США и Японии. Они действуют в Корее и ряде стран Европы (Германии, Великобритании, Франции, Италии, Финляндии и др.).

Прогнозы

По надежным множественным прогнозам специалистов [1, 2, 6, 10], уже в 2010 г. в практику войдет молекулярная нанохирurgia, наноремонт биологических клеток, появятся лекарства от старения. Возникнет наноразмерная элементная база электроники для работы в условиях космоса, появятся средства для создания нанокomпьютеров. К этому же времени биологи считают вероятным появление таких математических моделей сложных белковых образований, которые позволят синтезировать гены для воспроизводящих себя молекулярных биороботов. Препятствия для создания этих моделей лежат, как это ни странно, не в биологии, а в информатике. Это — недостаточная вычислительная мощность существующих сейчас супер-ЭВМ. Алгоритмы такого моделирования биологам известны.

Отечественные работы [3] по суперкомпьютерному моделированию белковых структур подтверждают реальность разгадок многих тайн живой природы уже в ближайшем десятилетии.

В ближайшие 15—20 лет предполагается расцвет техники нанокomпьютеров. На их основе, а также на базе нанобиотехнологий появятся молекулярные самовоспроизводящиеся роботы-репликаторы, способные выполнять сборку и разборку (декомпозицию) молекул, запись программ репликации и осуществлять воспроизводство и размножение наноассемблеров. Такие процессы не потребуют какого-либо расхищения природных ресурсов. Они будут экологически чистыми и практически безотходными.

Микросистемы на основе наноСБИС интеллектуальных акустических датчиков

Принципиальная возможность создания микросистем этого класса базируется на своеобразном "инверсном" преобразовании туннельного микроскопа. При таком преобразовании отпадает необходимость в сканировании зонда, а подложка выполняется в виде упругой проводящей микропембраны. Реализация этих микросистем возможна на базе единого цикла создания микромеханического наносенсора, интегрированного с электронной подсистемой измерения туннельного тока и автоматического поддержания заданного туннельного зазора.

Составной частью упомянутой выше подсистемы являются блоки пикоамперметра и аналого-

цифрового преобразователя. С их помощью колебания туннельного тока преобразуются в стандартный цифровой сигнал.

Пороговые уровни электронной подсистемы позволяют опознать акустический сигнал на фоне собственных шумов сенсора и предохранить микросистему от возможных акустических перегрузок.

Разновидности микросистем этого класса могут перекрыть диапазон частот от долей герца до 200 кГц и допускают дальнейшее наращивание или интеграцию с любыми (в том числе портативными) персональными компьютерами, работающими на платформе Windows, системами сбора информации, с мобильными Интернет-системами связи и т. д. Есть основания полагать, что такие микросистемы обеспечат развитие нанотехнологического машиностроения, так как с их помощью возможно индивидуальное регулирование туннельных зазоров многозондового технологического оборудования. Отметим следующие другие возможные применения подобного рода микросистем, обусловленные их уникальной акустической чувствительностью:

- прогнозирование землетрясений, мониторинг чрезвычайных ситуаций, контроль экологических показателей среды;
- предупреждение акустической эмиссии в механических конструкциях;
- создание высокочувствительных микрофонов для спасения людей из-под завалов зданий, а также для специальных целей;
- гидроакустика;
- паспортизация прочностных характеристик реакторов, летательных аппаратов и строительных конструкций;
- создание туннельных гравиметров с точностью $10^{-9}g$;
- разработка устройств активного вибродемпфирования для стабилизации стрелкового оружия, размещаемого на возимых, летательных и т. п. аппаратах;
- мониторинг конструкций (трубопроводов, оболочек реакторов, зданий), условий хранения боезарядов, геомагнитных явлений (землетрясений, извержений вулканов, ядерных испытаний);
- комплексный индивидуальный медицинский контроль и локация внутренних органов человека.

Двойное применение микросистем

Приведенный выше пример иллюстрирует возможность двойного применения микросистем лишь одного класса. В лабораториях промышленно развитых стран (США, Японии, Германии и др.) проводятся крупномасштабные разработки многих других типов наномикросистем.

Возможности военных применений таких микросистем нельзя не учитывать, так как они имеют

прямое отношение к проблемам национальной безопасности не только каждой страны, но и всего человечества.

Образовательная концепция. Первые шаги

Развитие микросистемной техники, базирующейся на наноиндустрии, немыслимо без консолидации усилий многих предприятий, НИИ и вузов и не может обойтись без опережающей подготовки специалистов в рамках образовательной концепции, включающей в себя ориентацию на непрерывность и системные аспекты обучения (комплексность научных дисциплин, их инновационную и гуманистическую направленность).

Ориентация на непрерывность подразумевает концептуальную преемственность начального, среднего и высшего образования (совместимость учебной литературы, программ, средств информатики и коммуникаций). С ее помощью можно повысить эффективность профилизации учащихся и, что особенно важно, раннее выявление лиц с системным мышлением — постановщиков задач, "концептуалистов", лидеров, способных понимать нанотехнику как "большую" систему — сплав индустрии, науки, экономики, духовной организации социума.

Ориентация на комплексность подразумевает гуманизацию для технического образования, с одной стороны, и социальную инженерию для гуманитарного образования — с другой.

Инновационная направленность — это активная заинтересованность в трансфере достижений смежных областей знания и практики, умение понимать системный смысл деятельности профессионалов различных направлений и брать на себя ответственность за практическую и эффективную реализацию коллективно выполняемых комплексных работ.

Гуманистическая направленность — это представление о человеке как о творце, цели, а не средстве прогресса; это тщательный учет последствий хозяйственных и научных стратегий и реальной, повседневной деятельности, их влияния на общество и его экологию, понимаемую в широком смысле как сбережение, возобновление и развитие интеллектуальных и природных ресурсов. Подготовка в рамках указанной выше концепции немыслима без технической оснащенности, обеспечивающей быстрый и глобальный доступ к базам знаний, к предметам культуры, к необходимой в данный момент любой, в том числе новейшей, информации.

Уже сейчас ощущается острая нехватка специалистов, способных по-новому развивать сложившиеся сферы профессиональной деятельности в таких, ныне смежных областях, как человек и медицинская техника, геновая инженерия, искусство и техническая среда обитания человека и т. д.

Новое поколение специалистов-системщиков призвано обеспечивать концептуальное взаимодействие таких форм человеческого разума, как гуманитарная и техническая формы, таких сфер культуры, как духовная и материальная сферы, таких форм природы, как живая и неживая формы.

Бывшие уделом писателей-фантастов проблемы взаимоотношений человека, человекомашинных систем и интеллектуальных роботов становятся актуальными и нуждаются в гуманитарно-научном осмыслении.

В качестве примеров инициатив вузов по организации обучения с использованием (хотя бы частичном) сформулированных выше подходов можно назвать:

- подготовку по новым специализациям на биологическом, химическом, физическом и механико-математическом факультетах МГУ им. М. В. Ломоносова;
- открытие в МГИРЭА и МГИЭТ специализации "Нанoeлектроника" (в качестве составной части, но не замены или синонима нанотехники);
- открытие в МИФИ специализаций "Физика наноструктур", "Наноструктуры и их применение";
- оформление специализации "Медицинские биороботы и нанометрология", в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Шагом в том же направлении явилось учреждение Минобразованием России в 2000 г. (по инициативе Санкт-Петербургского электротехнического университета) новой специальности 201900 "Микросистемная техника". Эта специальность введена в целом ряде вузов (ТГРТУ, МГИРЭА, МГИЭТ, С-ПбГЭТУ, МИСиС, Новосибирский и Красноярский государственные технические университеты).

Поскольку, как уже упоминалось, техника микросистем является трансфером высоких технологий, ее полноценное развитие возможно только на базе наноиндустрии. Следовательно, предстоит ввести в учебные планы этой специальности блок дисциплин, связанных с нанотехникой, включая ее гуманитарные аспекты.

Заключение

В заключение отметим следующее.

- ♦ Появление микросистем на базе наносредств позволит совершить новую научно-техническую революцию, создать качественно более высокий индустриальный и социальный базис и обеспечить необходимый уровень военной готовности.
- ♦ Внедрение нанотехнологий окажет решающее влияние на научно-техническое, экономическое и социальное развитие стран, а также на межгосударственные отношения.

- ♦ Этому будет способствовать давно назревшие разработка и утверждение Федеральной целевой программы "Наноиндустрия и микросистемы" (такие программы есть во всех промышленно-развитых странах).
- ♦ В этой программе должен быть раздел "Нанообразование", стимулирующий государственную поддержку подготовки специалистов в рамках образовательной концепции, учитывающей современные представления о наноиндустрии и микросистемах.
- ♦ Чтобы ограничить развитие военной нанотехники, потребуются беспрецедентные усилия общественности и руководителей государств по установлению международного контроля, от которого будет прямо зависеть выживаемость человечества в XXI веке.

Список литературы

1. National Nanotechnology Initiative. The Initiative and its Implementation Plan. Washington, D. C.: National Science and Tech-

nology Council, Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology. July 2000. 141 p.

2. Nanotechnology Research Directions: Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN) Workshop Report. National Science and Technology Council (NSTC), Committee on Technology (CT). Kluwer Academic Publishers. 2000. 316 p.

3. Математическое моделирование нанотехнологических процессов и наноструктур // Труды научного семинара. Вып. 1. М.: МИФИ. 2001. 116 с.

4. Дружинин В. В., Конторов Д. С. Проблемы системологии. Проблемы теории сложных систем. С предисловием В. М. Глушкова. М.: Сов. радио. 1976. 297 с.

5. Drexler K. E. Engines of creation. New York: Anchor Books Doubleday. 1986. 299 p.

6. Societal Implementation of Nanoscience and Nanotechnology / Ed. by Michael C. Roco and William Sims Bainbridge. NSET Workshop Report, Arlington, Virginia, March 2001. 272 p.

7. Handbook of Microlithography Micromachining, and Microfabrication. / Ed. by P. Rai-Choudhury. Vol. 2: Micromachining, and Microfabrication. SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1997. 691 p.

8. Вернер В. Д., Чаплыгин Ю. А. и др. Микросистемы и биочипы — трансфер технологии микроэлектроники // Электронные компоненты, 2000. № 1. С. 3—5.

9. Алексенко А. Г. Наноиндустрия как научно-производственная основа микросистем. Инженерно-физические проблемы новой техники // Сб. трудов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2001.

10. Drexler K. E. Building molecular machine systems // Trends in Biotechnology. 1999. Vol. 17, N 5.



СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—11, 2001 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Теоретическое и экспериментальное исследование нового прецизионного метода измерения основных параметров поверхностных акустических волн в анизотропных средах

Номер проекта: 97-02-18458-а

Год предоставления отчета: 1997

Разработана оригинальная интерферометрическая методика измерения скорости поверхностной акустической волны (ПАВ), распространяющейся в анизотропном твердом теле. Методика основана на оптическом зондировании ПАВ одновременно

в двух точках и новых возможностях, возникающих вследствие использования при измерениях двухлучевого оптического интерферометра. В данной схеме эксперимента два пространственно разнесенных оптических пучка дифрагируют на ПАВ, затем смешиваются и создают интерференционную картину, которая осциллирует при изменении частоты ПАВ.

Выполнен теоретический анализ (в паракиальном приближении) дифракции двух пучков света на ПАВ. Проведенный анализ позволяет по данным измерениям динамической картины дифракции двух пучков света на ПАВ определить ее фазовую и групповую скорости и их дисперсию в анизотропном полупространстве. Разработано программное обеспечение эксперимента и проведе-

- ♦ Этому будет способствовать давно назревшие разработка и утверждение Федеральной целевой программы "Наноиндустрия и микросистемы" (такие программы есть во всех промышленно-развитых странах).
- ♦ В этой программе должен быть раздел "Нанообразование", стимулирующий государственную поддержку подготовки специалистов в рамках образовательной концепции, учитывающей современные представления о наноиндустрии и микросистемах.
- ♦ Чтобы ограничить развитие военной нанотехники, потребуются беспрецедентные усилия общественности и руководителей государств по установлению международного контроля, от которого будет прямо зависеть выживаемость человечества в XXI веке.

Список литературы

1. National Nanotechnology Initiative. The Initiative and its Implementation Plan. Washington, D. C.: National Science and Tech-

nology Council, Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology. July 2000. 141 p.

2. Nanotechnology Research Directions: Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN) Workshop Report. National Science and Technology Council (NSTC), Committee on Technology (CT). Kluwer Academic Publishers. 2000. 316 p.

3. Математическое моделирование нанотехнологических процессов и наноструктур // Труды научного семинара. Вып. 1. М.: МИФИ. 2001. 116 с.

4. Дружинин В. В., Конторов Д. С. Проблемы системологии. Проблемы теории сложных систем. С предисловием В. М. Глушкова. М.: Сов. радио. 1976. 297 с.

5. Drexler K. E. Engines of creation. New York: Anchor Books Doubleday. 1986. 299 p.

6. Societal Implementation of Nanoscience and Nanotechnology / Ed. by Michael C. Roco and William Sims Bainbridge. NSET Workshop Report, Arlington, Virginia, March 2001. 272 p.

7. Handbook of Microlithography Micromachining, and Microfabrication. / Ed. by P. Rai-Choudhury. Vol. 2: Micromachining, and Microfabrication. SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1997. 691 p.

8. Вернер В. Д., Чаплыгин Ю. А. и др. Микросистемы и биочипы — трансфер технологии микроэлектроники // Электронные компоненты, 2000. № 1. С. 3—5.

9. Алексенко А. Г. Наноиндустрия как научно-производственная основа микросистем. Инженерно-физические проблемы новой техники // Сб. трудов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2001.

10. Drexler K. E. Building molecular machine systems // Trends in Biotechnology. 1999. Vol. 17, N 5.



СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—11, 2001 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Теоретическое и экспериментальное исследование нового прецизионного метода измерения основных параметров поверхностных акустических волн в анизотропных средах

Номер проекта: 97-02-18458-а

Год предоставления отчета: 1997

Разработана оригинальная интерферометрическая методика измерения скорости поверхностной акустической волны (ПАВ), распространяющейся в анизотропном твердом теле. Методика основана на оптическом зондировании ПАВ одновременно

в двух точках и новых возможностях, возникающих вследствие использования при измерениях двухлучевого оптического интерферометра. В данной схеме эксперимента два пространственно разнесенных оптических пучка дифрагируют на ПАВ, затем смешиваются и создают интерференционную картину, которая осциллирует при изменении частоты ПАВ.

Выполнен теоретический анализ (в паракиальном приближении) дифракции двух пучков света на ПАВ. Проведенный анализ позволяет по данным измерениям динамической картины дифракции двух пучков света на ПАВ определить ее фазовую и групповую скорости и их дисперсию в анизотропном полупространстве. Разработано программное обеспечение эксперимента и проведе-

на оценка точности определения скорости. Она зависит от условий эксперимента и составляет 0,5 м/с для фазовой и 3 м/с для групповой скорости. Апробация методики выполнена для ST-кварца, покрытого тонкой пленкой алюминия.

Предложен эффективный алгоритм вычисления функций Грина в модели точечных источников для задач акустооптики и акустоэлектроники по возбуждению и рассеянию поверхностных волн. В основу предлагаемого подхода заложена не асимптотическая, а специальным образом построенная квадратурная реализация известного метода перевала. Существенно ослабляется ограничение на параметр дальней зоны, получен ранее труднодостижимый результат для переходной зоны формирования поля. Данный алгоритм по сравнению с прямым численным счетом дает выигрыш в производительности на один-два порядка. Описана рекуррентная методика аналитического представления коэффициентов ортогональных многочленов, единая для ряда функций Грина с различным ядром. Предложенные методика и алгоритм могут быть также использованы в физико-математических приложениях, требующих быстрого и точного вычисления однотипных интегралов.

Создание на основе арсенида галлия радиационностойких, координатно-чувствительных детекторов заряженных частиц для физики высоких энергий

Номер проекта: 97-02-16241-а

Год предоставления отчета: 1997

Представлены результаты теоретических, экспериментальных и технологических работ по созданию детекторного материала из арсенида галлия, компенсируемого Сг в процессе диффузии. Высокие пределы радиационной стойкости, отношения сигнал/шум и быстродействия разрабатываемых координатно-чувствительных детекторов для физики высоких энергий определяются результатами этой стадии исследования.

Установлена связь размеров чувствительной области детектора с условиями его формирования. Обнаружен новый механизм увеличения размеров чувствительной области: электронно-дырочный переход, образованный диффузионным распределением глубоких центров, является динамическим, его геометрическое положение при увеличении обратного напряжения смещается в сторону металлургической границы, оставляя за собой область сильного поля. Это явление происходит из-за градиента в распределении глубоких примесных центров по толщине детектора. Из всех элементов группы железа эффект является максимальным

при использовании Сг для компенсации электронного арсенида галлия в процессе диффузии.

Явление примесного экранирования глубокими центрами используется для устранения нежелательного влияния радиационных повреждений в арсениде галлия на транспорт неравновесных носителей, возникающих при ионизационных потерях детектируемых частиц. Теоретическая картина радиационных повреждений от заряженных адронов высоких энергий используется при уточнении уровня легирования Сг для достижения необходимой радиационной стойкости. Результаты радиационных испытаний показывают на амплитудных спектрах сохранение 50 % эффективности сбора заряда при облучении адронами высоких энергий с интегральным потоком $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Наряду с ориентацией на традиционный механизм сбора заряда, основанный на дрейфе неравновесных носителей, проводится поиск нового механизма транспорта. Благодаря сильному отклонению электронно-дырочной системы в треке детектируемой частицы от идеального газа обнаружен транспорт посредством нелинейных волн возмущений плотности — солитонов. Определены их параметры и условия реализации нового механизма транспорта. Реализация нового транспорта в механизме сбора заряда снимет проблему, связанную с малым временем жизни неравновесных носителей в арсениде галлия, возникающих благодаря захвату на компенсирующие центры и радиационные дефекты.

Поиск путей создания полевых эмиссионных источников высокого качества для систем вакуумной микроэлектроники СВЧ

Номер проекта: 97-02-16080-а

Год предоставления отчета: 1997

Разработан и создан разборный высоковакуумный автоэмиссионный проектор с энергоанализатором для оперативного изучения характеристик полевых эмиттеров. В проекторе предусмотрена возможность измерения полного тока с катода на специальный люминесцентный экран, а также тока и энергетического спектра электронов с участков его поверхности, проникающих через малое (диаметром ~1 мм) отверстие экрана в расположенный за ним анализатор. Пространственные характеристики потока электронов с катода определяются при наблюдении светящегося изображения экрана, а также на основе измерения распределения плотности тока по его поверхности, регистрируемого по изменениям тока через отверстие в экране при смещении катода.

Проведенные численные расчеты траекторий электронов и выполненные эксперименты с одно- и многоострийными катодами из вольфрама и уг-

леродных волокон позволили определить основные характеристики проектора. Он обеспечивает пространственное разрешение менее 50 Å при исследовании одноострийных и порядка единиц микрометров для многоострийных эмиттеров с диаметром сборки ~1 мм. Созданные исполнителями проекта энергоанализаторы обеспечивают разрешение для одноострийных эмиттеров около 30 мВ и менее 0,01 полной энергии электронов для катодов с эмиттирующей поверхностью порядка или более 1 мм². Давление в анализаторе при непрерывной безмасляной откачке может регулироваться в широких пределах от минимальной величины порядка 1 нТорр. Созданная система питания позволяет создавать в зазоре между катодом и анодом статическое и импульсное напряжение приблизительно до 20 кВ. Проектор оснащен системой прогрева полевых эмиттеров. Напылительная система позволяет наносить на поверхность эмиттеров жидкометаллические покрытия на основе сплавов индия, а также покрытия, содержащие фуллерены. Проведены контрольные измерения, свидетельствующие о возможности изучения эмиттеров с разными покрытиями, а также термополевой их обработки.

Кроме работы с автоэмиссионным проектором на данном этапе выполнен комплекс исследований, нацеленных на выяснение возможности реализации перспективной технологии создания управляющих электродов для неупорядоченных полевых структур. Показана возможность формирования "согласованных" с эмиттером отверстий в электродах из углерода потоком электронов с эмиттера, определены закономерности уноса материала электрода (выработки электрода) под действием электронной бомбардировки и выявлены оптимальные условия формирования отверстий.

Исследование динамических характеристик точечных дефектов в низкоразмерных гетероструктурах с помощью радиационных методов

Номер проекта: 97-02-18090-а

Год предоставления отчета: 1997

За истекший период проведена работа по исследованию фундаментальных динамических характеристик точечных дефектов (в частности, пороговых энергий смещения), образующихся в низкоразмерных полупроводниковых гетероструктурах. В рамках работы разработаны методики ВИМС- и ОЭС-профилирования гетероструктур в диапазоне энергий 1–10 кэВ для ионов цезия, кислорода, аргона. Эпитаксиальными методами был изготовлен ряд гетероструктур на основе GaAs с тонкими (1–10 монослоев) маркерными слоями AlAs или InAs.

Выполнены эксперименты по ВИМС-профилированию этих структур.

Разработана оригинальная экспериментально-теоретическая методика определения пороговых энергий смещения примесных атомов в материале на основе сравнения экспериментальных профилей травления структур, содержащих тонкие маркерные слои, и расчетных профилей, полученных при варьировании энергетических параметров точечных дефектов.

Проведены серии модельных расчетов по травлению GaAs мишени с тонкими маркерными слоями AlAs или InAs, что позволило определить пороговые энергии смещения изоэлектронных примесных атомов Al и In в GaAs. Показано, что пороговая энергия смещения примесных атомов в материале может существенно отличаться как от пороговых энергий смещения основных атомных компонент материала (т. е. атомов Ga и As в GaAs), так и от пороговой энергии смещения данного атомного компонента как основного (т. е. In и InAs).

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, опубликованных в журнале "Микросистемная техника" в 2001 г.

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

Арапов Ю. Г., Опрокидиев А. Ю., Неверов В. Н., Харус Г. И., Шелушинина Н. Г., Кузнецов О. А. Флуктуации случайного потенциала в магнитопроедности многослойных гетероструктур р-Ge/Ge_{1-x}Si_x в режиме квантового эффекта Холла, № 4

Ачильдиев В. М., Дрофа В. Н., Рублев В. М. Микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр, № 5

Беликов Л. В. Проектирование топологии тензорезисторного моста Уитстона, расположенного на монокристаллической кремниевой мембране, ориентированной по (111), № 8

Биленко Д. И., Белобровая О. Я., Жаркова Э. А., Мельникова Т. Е., Мысенко И. Б., Полянская В. П., Хасина Е. И., Ципоруха В. Д. Сенсоры газовых сред на основе пористого кремния, № 11

Волков В. Л., Захарова Г. С., Дай Г., Тонг М. Сенсоры паров воды и этанола на основе пленок ксерогелей поливанадатамолибдатов, № 7

Воронцов С. И., Бакланов С. Б., Гурии Н. Т., Новиков С. Г. Экспериментальное исследование магниточувствительных свойств радиационно-модифицированных планарных симисторов, № 10