

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 9 (86) ✧ 2007

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве
Отделения информационных технологий и вычислительных систем
Российской Академии наук

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Сигов А. С.
Чаплыгин Ю. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
Андреевский Р. А.
Антонов Б. И.
Арсентьева И. С.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Волчихин В. И.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Журавлев П. В.
Захаревич В. Г.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Квардаков В. В.
Колобов Ю. Р.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Нарайкин О. С.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сауров А. Н.
Серебряников С. В.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тодуа П. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство
"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Тарнавский Г. А., Алиев А. В., Тарнавский А. Г. Создание специальных наноструктур донорных и акцепторных примесей в базовой подложке кремния для конструирования новых полупроводниковых материалов 2
- Миронов В. Л., Удалов О. Г., Грибков Б. А., Фраерман А. А. Рентгеновская рефлектометрия и атомно-силовая микроскопия поверхностей с негауссовыми шероховатостями 8
- Лейченко А. С., Лупарев Н. В., Стариков П. А., Чадаев Н. Н., Шешин Е. П. Применение наноструктурированных углеродных материалов в перспективных источниках света 15

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Жуков А. А., Бабаевский П. Г. Закономерности плазмохимического травления полиимидных "жертвенных" слоев в нано- и микроразмерных зазорах 20
- Мясникова Т. П., Алешин В. А., Гах С. Г., Захарченко И. Н., Толстоусов С. В., Мясников Э. Н. Оптические спектры пленок $(\text{Ba}, \text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$ на MgO и Si при фазовых переходах 25
- Леонов Е. С., Пахомов Л. Г., Лучников А. П., Пахомов Г. Л. Наноразмерные композиционные пленки на основе допированного безметалльного фталоцианина. 28

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Тимошенков С. П., Зотов С. А., Морозова Е. С., Балычев В. Н., Прокопьев Е. П. Передаточные функции чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа LL-типа 32
- Капитанкин И. А., Гурий Н. Т. Фоточувствительные полупроводниковые N-приборы с симметричной вольт-амперной характеристикой 35
- Воробьева А. И., Шулицкий Б. Г., Прудникова Е. Л. Формирование матрицы из анодного оксида алюминия для осаждения углеродных нанотрубок 39

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

- Галушков А. И., Годовицын И. В., Краснобородько С. Ю., Тихомиров А. А. Исследование конструктивно-технологических параметров интегрального емкостного преобразователя давления 44
- Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Туннельные МДМ-наносенсоры: стратегии и технологии моделирования 46
- Локтев Д. В., Андреев В. М., Зиновьев Д. В., Тузовский К. А. Эффект термофореза в тепловых МЭМС 52

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОТЕХНОЛОГИИ

- Мальшев В. А. Квантово-синтезные процессы как возможная основа биотехнологий. 53

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Романов С. И., Пышный Д. В., Вандышева Н. В., Ломзов А. А., Бубликов А. В. Кремниевая микроканальная матрица для биочиповых технологий 55
- Алалуев Р. В., Иванов Ю. В., Матвеев В. В., Орлов В. А., Распопов В. Я. Измерительный модуль микросистемной бесплатформенной инерциальной навигационной системы 61

СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

- Яшин К. Д., Лацапнёв Е. В. Англо-русский терминологический справочник по микро- и наносистемной технике 64

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

- ИНФОРМАЦИЯ 70

- Contents. 79

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России

Аннотации статей журнала и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала:
<http://www.microsystems.ru>. E-mail: nmst@zknet.ru

ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
- по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
- в редакции журнала (тел./факс: 269-55-10)

УДК 519.2:541.1

Г. А. Тарнавский, д-р. физ.-мат. наук, **А. В. Алиев**,
Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск,
А. Г. Тарнавский,
Новосибирский государственный университет

СОЗДАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР ДОНОРНЫХ И АКЦЕПТОРНЫХ ПРИМЕСЕЙ В БАЗОВОЙ ПОДЛОЖКЕ КРЕМНИЯ ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ НОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведено компьютерное моделирование физико-химических процессов, лежащих в основе одного из сегментов технологического цикла создания новых полупроводниковых материалов для нанoeлектроники. Этот этап производства — отжиг подложки базового материала в кислороде — предназначен для формирования особых наноструктур донорных и акцепторных примесей, равномерно распределенных в базовом материале до начала отжига. Для одного из вариантов применяющихся конфигураций поверхности подложки ("траншея"), частично закрытой защитными масками, предохраняющими участки поверхности от воздействия окислителя, исследованы и проанализированы динамика роста пленки окисла и перераспределение примесей вследствие процесса сегрегации на фронте волны "окисел/материал", с образованием различных доменов, в том числе, специфических наноструктур — узкоколлазированных зон (размерами 40...60 нм) повышенной концентрации донорных и акцепторных примесей.

Введение

Производство современных материалов, в частности для микропроцессоров, базируется на МОП-технологиях ("металл—окисел—полупроводник") и представляет собой многоступенчатый производственный цикл, состоящий из трехсот с лишним стадий — сегментов (см., например, [1]). Каждый из этих сегментов использует разнообразные сложные физико-химические и механические процессы. Одним из главных сегментов этой технологии конструирования полупроводниковых материалов с заданными электрофизическими свойствами является масочная технология проведения процесса окисления подложки базового материала — химического элемента IV группы Периодической системы — крем-

ния Si (титана Ti или германия Ge), в который имплантированы акцепторные и донорные легирующие примеси — химические элементы III и V групп — бор B (галлий Ga или алюминий Al) и фосфор P (сурьма Sb или мышьяк As). Цель данной стадии МОП-технологии заключается в создании специальных, особых распределений концентраций примесей в кремниевой подложке, т. е. формирование селективно высоколегированных областей (будущих стоков и истоков транзисторов). Легирование участков монокристаллической кремниевой пластины атомами различных химических элементов для организации в кремнии полупроводниковых доменов с проводимостью *n*- и/или *p*-типа проводится в слое специально создаваемого диэлектрика (диоксида кремния). Особые защитные маски, закрывая часть поверхности кремния, препятствуют процессу его окисления, а на открытых участках процесс окисления может быть весьма интенсивным. На фронте волны окисления SiO_2/Si происходит сегрегация примесей, бора и фосфора, — основной элемент этого технологического этапа.

Сегрегация — сложный физико-химический процесс, в котором проявляются особые свойства воздействия фронта волны окисления материала IV группы элементов таблицы Менделеева на имплантированные в этот материал акцепторные и донорные легирующие примеси элементов III группы и V(a) подгруппы (типа B и P соответственно). Примеси типа P выталкиваются из окисла в материал, а примеси B, наоборот, втягиваются из материала в окисел, с последующей диффузией в Si и SiO_2 и конвективным переносом в SiO_2 .

Последний процесс связан с "наработкой" объема SiO_2 из Si, поскольку из единицы объема Si возникает примерно 2,27 объема SiO_2 с соответствующим этому ростом пленки окисла в область окислителя O_2 (в свободное пространство).

Перераспределение примесей и их результирующая конфигурация соответственно создает необходимые электрические полупроводниковые свойства материала. Компьютерное моделирование такого сложного комплексного процесса (окисление, сегрегация, диффузия, конвекция) наталкивается на значительные трудности и, в основном, в настоящее время сводится к решению одномерных задач или 2D-моделированию в квазиодномерной постановке, когда по одному из координатных направлений проводится прямое численное моделирование, а влияние второго координатного направления учитывается некоторыми эмпирически сконструированными аналитическими зависимостями. Наибольшее пространство из этого эмпирического подхода получила модель "птичьего клюва" [2] и ее многочисленные вариации.

Технический прогресс в области производства полупроводниковых приборов широкого назначения привел к существенной востребованности научных исследований в данной области, в связи с чем дать даже краткий обзор существующих работ по всем указанным выше тематикам не представляется возможным. Ключевой, вызывающей наибольшие затруднения проблемой в настоящее время является проблема моделирования динамики движения границ волны окисления в базовом материале и сегрегация легирующих примесей на ее фронте. Квантово-механический подход к решению этой проблемы наталкивается на значительные трудности построения операторов Гамильтона для уравнения Шредингера и практически нереализуем даже на современной вычислительной технике. Это приводит к необходимости применения более упрощенных подходов и создания приближенных моделей для разработки реально функционирующих алгоритмов не только для 1D-, но и 2D- (и даже 3D-) задач.

Для моделирования процесса роста пленки окисла достаточно широкое распространение получили "сжимаемая" модель или модель "давления", "вязкая" модель, "вязко-эластичная" модель (см., напр., [3, 4]). Сущность всех перечисленных моделей заключается в представлении физического процесса образования окисла некоторым аналогом из области гидродинамики, при этом окисел рассматривается как жидкость: в простых моделях как несжимаемая и идеальная (без вязкости и теплопроводности), в других — как сжимаемая и идеальная, в третьих — как сжимаемая и вязкая, в четвертых, наиболее продвинутых, для описания процесса как гидродинамического добавляются еще некоторые понятия из теории упругости (эластичность) и пластичности. Однако вопрос о точности этого пути моделирования по-прежнему остается весьма и весьма дискуссионным. В данных моделях имеют место существенно искусственные элементы, такие, например, как способы построения "вязкого тензора напряжений", определение коэффициентов переноса, а также замыкание гидродинамической части системы уравнений некоторым аналогом уравнения состояния, устанавливающим связи между "давлением", "плотностью" и "температурой". Эти модели ориентированы на решение вариантов конкретных задач и фактически не могут быть расширены за их рамки. Об этом свидетельствует сам факт появления усложняющихся в гидродинамическом описании моделей: несжимаемая — сжимаемая невязкая — сжимаемая вязкая — сжимаемая вязко-эластичная. Следует отметить, что для моделирования одного из процессов переноса зарядов в полупроводниках достаточно успешно применяется модель баллистического диода [6, 7].

В представляемой работе используется математическое моделирование двумерной задачи в полной 2D-постановке. Теоретические аспекты моделирования процессов диффузии, окисления и сегрегации, а также реализующие их компьютерные алгоритмы подробно описаны в работах [8, 9], а вычислительные эксперименты по сегрегационным процессам — в работах [10, 11].

Формулировка задачи

Компьютерное моделирование применяется к исследованию физико-химических процессов одной из технологических стадий, часто применяющихся в производственном цикле. В базовую подложку кристаллического кремния имплантированы легирующие примеси акцепторного и донорного типа (В и Р). На поверхности кремния отфрезерована прямоугольная выемка типа "траншея". На рис. 1 представлена конфигурация и размеры области в начальный момент времени.

Расчетная область разделена на два участка — под-область материала Si и подобласть окислителя — кислорода O_2 . Граница между подобластями представлена сплошной линией и состоит из пяти участков: левая и правая горизонтальные поверхности, левая и правая вертикальные разновысокие стенки "траншеи" и ее дно. Часть поверхности материала закрыта нитридными масками, непроницаемыми для O_2 и защищающими соответствующие поверхности Si от непосредственного прямого окисления (имеет место лишь окисление вследствие проникновения O_2 через материал под маски). Маски отмечены на рис. 1 толстыми линиями. Конкретные координаты участка поверхности и защитных масок также указаны на рис. 1.

Рассматриваются три варианта задачи. Первый вариант: стенки "траншеи" — одной высоты (правая горизонтальная поверхность для этого варианта отмечена на рис. 1 тонкой линией); маски (все три) отсутствуют. Второй вариант: стенки "траншеи" — разной высоты; маска на дне "траншеи" отсутствует. Третий вариант: полная конфигурация — стенки "траншеи" разновысокие; используются три защитных маски.

Рассматриваются процессы окисления Si с определением конфигурации и динамики границ SiO_2/Si и SiO_2/O_2 и сегрегация примесей В и Р на фронте SiO_2 . Размеры области исследования: $X_{\max} = 4$ мкм и $Y_{\max} = 2$ мкм. Число узлов расчетной сетки — 1000 по каждому координатному направлению. Начальная толщина пленки окисла SiO_2 , всегда существующая в реальных условиях и необходимая для старта вычислительного алгоритма [8], принималась равной 4 нм (2 интервала расчетной сетки). Начальные распределения легирующих примесей В и Р в Si являлись равномерными, концентрация примесей составляла 10^{14} и 10^{15} см $^{-3}$ соответственно. Циклы компьютерного моделирования проводились при вариации

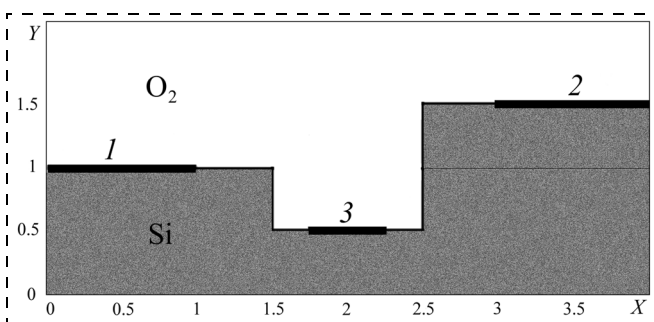


Рис. 1. Топология области исследования: начальная конфигурация границы материала Si и окислителя O_2 и расположение защитных масок (1, 2, 3)

температуры процесса T от 900 до 1250 °C и давления p кислорода O_2 от 0,9 до 1,2 атм. Значение шага по времени τ выбиралось из соображений компромисса между точностью моделирования (волна окисления за один интервал времени должна проходить не более двух координатных интервалов) и приемлемым временем счета одного варианта (не более 10 мин для P-4, процессор 2,8 ГГц, шина 800 МГц). Конкретное значение τ существенно зависит от параметров p и T , определяющих быстрое или медленное окисление [8, 9]. Процесс решения заканчивался или при истечении заданного времени (вариант 3), или при достижении заданной максимальной глубины проникновения окисла в базовый материал по вертикальной координате Y при заданном значении $\Delta Y = 0,3$ мкм (варианты 1 и 2).

Ниже представляются результаты моделирования при $T = 1100$ °C и $p = 1$ атм.

Динамика границ пленки окисла

На рис. 2 представлена эволюция конфигураций фронтов SiO_2/Si и SiO_2/O_2 во времени, отражая динамику продвижения волны окисления в материал

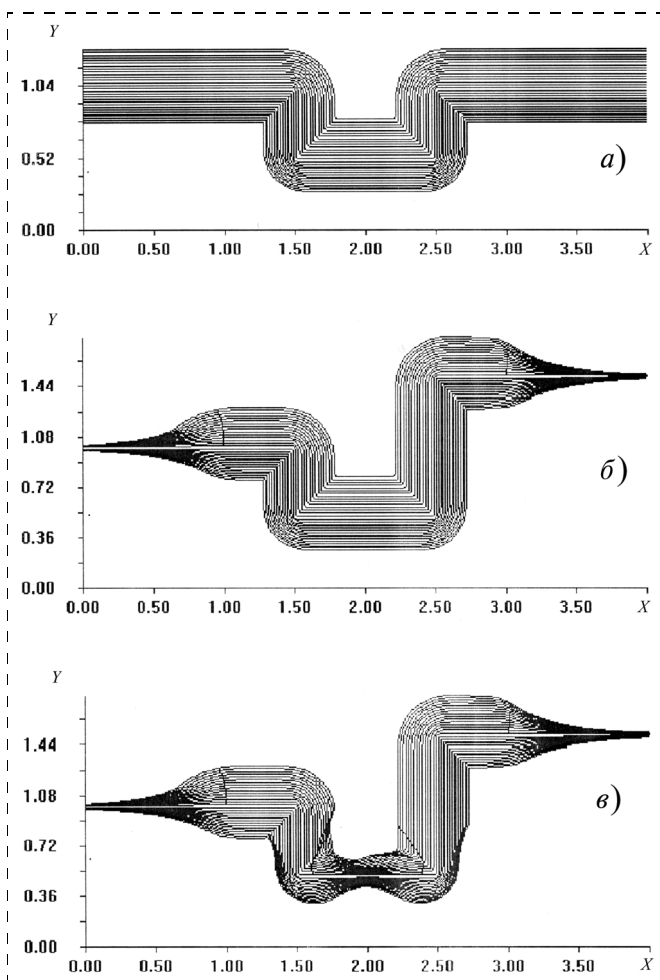


Рис. 2. Динамика роста пленки окисла (диоксида кремния SiO_2) во времени в процессе отжига пластин кремния Si в кислороде O_2 для трех исходных конфигураций поверхности материала: без защитных масок (а); с двумя (б) и тремя (в) защитными масками

(в область уменьшения Y) и расширения окисла в сторону окислителя (в область увеличения Y). Каждая линия из этих в некотором смысле "конгруэнтных" непересекающихся криволинейных кривых представляет положение соответствующей границы в определенный момент времени t , от $t = 0$ (центральная линия) до $t = t_{\max}$, при котором достигнута заданная глубина окисления. Кривые являются эквивалентными, т. е. представляют положение границ через равные интервалы времени и попарно согласованными — каждой кривой нижнего семейства (граница SiO_2/Si) соответствует кривая верхнего семейства (SiO_2/O_2), приведенная для этого же момента времени. Крайние верхняя и нижняя кривые есть результирующие границы пленки окисла в завершающий момент времени.

Анализируя на рис. 2, а–в динамику кривых, можно не только качественно, но и количественно определить влияние масок на скорость окисления и проследить развитие исходно плоской пленки окисла в конфигурацию типа "птичьего клюва" [2] с сильным сжатием семейств кривых под масками. В отличие от работы [2] представляемый результат получен непосредственно в результате прямого численного моделирования без использования характерных для модели "птичьего клюва" "подгоночных параметров": "толщины и крутизны клюва", "сдвига" края маски и т. п. В представляемой модели [8] в таких параметрах нет необходимости, а сдвиги краев масок и их изгибы определяются в расчете точно из принципа "сохранения длины маски при ее изгибе" интегрированием расстояния вдоль поверхностей масок. Более того, разработанная модель позволяет проводить изучение ситуаций, когда области влияния масок смыкаются и на границах SiO_2/Si и SiO_2/O_2 вообще нет плоских участков; эти ситуации недоступны для моделирования с использованием аналитики [2]. Отметим также, что интегральный контроль за процедурой расчета динамики границ с существенным подъемом системы масок растущей пленкой окисла, определяемый законом "наработки объемов" (объем окисла равен 2,27 объема материала), показывает хорошую точность моделирования процесса.

Теоретическая модель, метод решения, вычислительный алгоритм, особенности компьютерных программ и многосторонние численные эксперименты подробно описаны в работах [8–11].

Перейдем к рассмотрению результатов математического моделирования данной задачи. Укажем на важную особенность (см. рис. 2) формы нарабатываемого диоксида кремния, которую невозможно получить при использовании моделей [2–4]. Обратим внимание на прямые углы границы Si/O_2 , вершины которых в начальный момент времени имели координаты (1,5; 1) и (2,5; 1) для варианта на рис. 2, а, а для варианта на рис. 2, б, в (1,5; 1) и (2,5; 2).

Эволюция этих углов во времени при "расщеплении" границы Si/O_2 происходит по-разному для границы "окисел/окислитель" SiO_2/O_2 (верхняя граница окисла) и границы "окисел/материал" SiO_2/Si (нижняя граница). Для границы SiO_2/O_2 эти углы существенно деформируются, а для границы SiO_2/Si углы сохраняют практически прямоугольную форму,

за исключением трехмасочного варианта (рис. 2, в), где донная маска перераспределяет потоки O_2 в SiO_2 к Si, что существенно влияет на форму границы SiO_2/Si , в том числе на прямоугольность формы участка. Заметим, что различная эволюция прямых углов границ "окисел/окислитель" и "окисел/материал" определяется существенно различными механическими свойствами Si (кристаллическая решетка, твердость материала) и SiO_2 (аморфность, вязкопластичные свойства).

Другая по характеру эволюция имеет место для остальных углов "траншеи" с координатами (1,5; 0,5) и (2,5; 0,5) в начальный момент времени. Эти углы являются внешними ("тупыми") для материала (прямые углы равны 270°), в отличие от рассмотренных выше, где прямые углы для материала являлись внутренними ("острыми"), с прямыми углами 90° . При "расщеплении" границы Si/O_2 прямоугольность сохраняется для границы SiO_2/O_2 , а на границе SiO_2/Si углы существенно трансформируются. Маска, закрывающая часть дна траншеи, влияет на прямолинейность левой стенки больше, чем правой, вследствие их разной высоты. Заметим также, что к концу процесса левая стенка потеряла плоскую форму, а правая — сохраняет плоскую поверхность на большом участке.

Форма границы SiO_2/Si (в меньшей степени SiO_2/O_2) кардинально влияет на итоговое распределение концентраций примесей и формирование их особых наноструктур [10, 11]. Отметим, что некоторые особенности динамики сверхтонкой пленки на начальных стадиях процесса, при малых t , когда толщина диоксида кремния менее 50 нм, вычислительным алгоритмом [9] моделируются с достаточной точностью (см. также [4]).

Формирование наноструктур легирующих примесей

По завершении этого технологического этапа, когда при отжиге подложки фронт волны окисления продвинулся на дне "траншеи" вглубь материала на 200 нм, равномерные в начальный момент распределения концентрации примесей фосфора $C_P(X, Y)$ и бора $C_B(X, Y)$, вследствие процесса сегрегации становятся существенно неравномерными. В кремневой подложке образовались особые наноструктуры — узколокализованные области с весьма высокими значениями C_P и C_B , т. е. области с высокими соответственно электронной (n -типа) и дырочной (p -типа) проводимостями. Это обеспечивает на дальнейших технологических стадиях организацию истоков и стоков транзисторов, их каналов и затворов.

Ниже будут анализироваться результаты компьютерного моделирования трехмасочного варианта отжига (см. рис. 2, в).

На рис. 3 и 4 представлены распределения концентраций соответственно фосфора $C_P(X, Y)$ и бора $C_B(X, Y)$ в кремнии и диоксиде кремния вдоль X при различных значениях Y равных 0,20 (кривая 1); 0,61 (кривая 2); 1,0 (кривая 3) и 1,47 (кривая 4). Эти координаты являются весьма характерными горизонтальными уровнями задачи. Уровень $Y = 0,20$ — это горизонт, почти достигнутый волной окисла в централь-

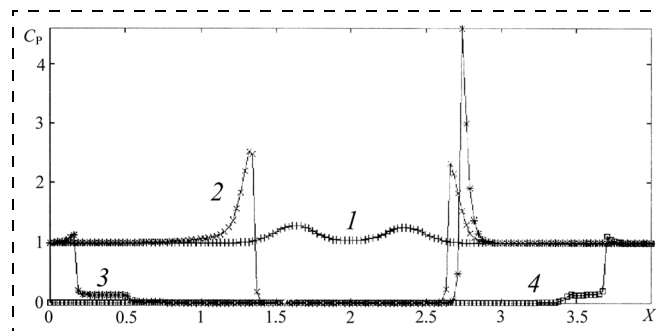


Рис. 3. Распределение концентраций фосфора $C_P(X, Y)$ в кремнии и диоксиде кремния вдоль X при различных значениях Y равных 0,20 (кривая 1); $Y = 0,61$ (кривая 2); $Y = 1,0$ (кривая 3); $Y = 1,47$ (кривая 4), для трехмасочной технологии отжига

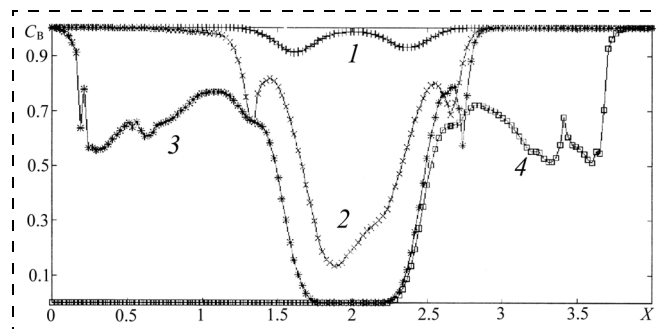


Рис. 4. Распределение концентраций бора $C_B(X, Y)$ в кремнии и диоксиде кремния вдоль X при различных значениях Y , равных 0,20 (кривая 1); 0,61 (кривая 2); 1,0 (кривая 3); 1,47 (кривая 4), для трехмасочной технологии отжига

ной части, двигавшейся вниз от дна "траншеи" (см. рис. 2). Справа и слева — подложка неокисленного материала. Соответственно здесь $C_P(X, 0,20) = 1$ и $C_B(X, 0,20) = 1$. Напомним, что значения концентраций отнормированы к их начальным значениям. Но на этом горизонте под дном "траншеи" в подобласти ($1,5 < X < 2,5$) кривые концентраций C_P и C_B носят волнообразный характер, косинусоподобный (с максимумом в центре подобласти $X = 2$) для C_B и синусоподобный (с минимумом в центре) для C_P . Такое совместное сочетание конфигураций C_P и C_B усиливает проводниковые свойства (n - и p -типа) с возможностью организации здесь переключателя направления тока в канале.

Уровень $Y = 0,61$ является горизонтом внутри области Si слева и справа от "траншеи" и пересекающим область максимального образования окисла в "траншее". Этот горизонт является внутренней линией в материале Si, вдоль которой продвигается волна окисления SiO_2/Si от правой стенки "траншеи" к правой границе расчетной области. На этом уровне эволюция движения SiO_2/Si приводит к существенному перераспределению концентраций вдоль направления X . Для фосфора (кривая 2 на рис. 3) имеем следующее (слева направо): начальные распределения $C_P = 1$ сохраняются до $X \approx 1,2$, затем перед фронтом SiO_2/Si ($X \approx 1,35$) происходит исключительно резкий рост C_P до значений 2,2 и еще более резкое падение за фронтом, практически до нуля в области окисла SiO_2 (эффект "бульдозера" с вытал-

киванием примесей фосфора почти полностью, см. также [11]). Далее, после довольно протяженной области SiO_2 с почти нулевой концентрацией фосфора имеет место еще более резкий всплеск C_P от 0 до значения 4,5 на фронте SiO_2/Si справа от "траншеи", при $X \approx 2,7$ с последующим падением в подобласти $X > 2,8$ (в Si) до начальных значений $C_P = 1$. Подчеркнем, что эти всплески весьма узко локализованы, с шириной зоны около 60...80 нм.

Распределение концентраций бора C_B ($X, 0,61$) имеет существенное отличие (кривая 2 на рис. 4). Слева, в подобласти $X < 1,2$ (в Si), значения $C_B = 1$. Далее перед фронтом SiO_2/Si ($X \approx 1,35$) происходит достаточно резкое уменьшение C_B и увеличение концентрации за фронтом (эффект "пылесоса" [10]). Однако далее в области окисла SiO_2 вновь происходит падение C_B с глубоким минимумом $C_B \approx 0,15$ в точке $X \approx 1,9$. Это связано с сильной диффузией примеси бора B в SiO_2 , а также с собственным движением окисла и, соответственно, с конвективным переносом и перераспределением примеси B. На правой границе "траншеи" распределение C_B аналогично, с небольшим максимумом 0,8 за фронтом ($X \approx 2,7$), минимумом 0,7 перед фронтом ($X \approx 2,8$) SiO_2/Si и выходом к начальному значению 1 в подобласти Si ($X > 2,9$).

Уровень $Y = 1$ является горизонтом левой поверхности пластины кремния в начальный момент времени, где доминирующим направлением процесса окисления является вертикальное и, дополнительно от левой стенки "траншеи", горизонтальное. Этот уровень пересекает правую границу "траншеи", где доминирующим направлением процесса окисления является только горизонтальное направление. Результаты перераспределения примесей P и B представляют на этом уровне кривые 3 и 4 (см. рис. 3) соответственно. Зависимость $C_P(X, 1)$ имеет простой, а $C_B(X, 1)$ более сложный вид, который определяется интерференцией процессов, подробно проанализированных выше, для уровней 0,20 и 0,61. Отметим, что фосфор почти весь вытолкнут из области окисла. Напомним во избежание неверного анализа, что на этом уровне существуют пять подобластей: Si (частично под маской), SiO_2 ; O_2 ; SiO_2 ; Si (перечисление слева направо вдоль X). Естественно, в области O_2 концентрации примесей — нулевые.

Четвертый уровень, $Y = 1,47$, приведен на рис. 3 и 4 для анализа двух почти независимых процессов: процесса движения вертикального фронта SiO_2/Si в горизонтальном направлении от правой стенки "траншеи" и процесса движения горизонтального фронта SiO_2/Si в вертикальном направлении (с проникновением под горизонтально расположенную маску). Движение фронтов SiO_2/O_2 происходит, соответственно, в обратных направлениях.

Проведенный выше анализ должен быть дополнен анализом распределения концентраций примесей фосфора и бора, полученных к концу процесса отжига, в направлении Y , поперечном к поверхности пластины Si.

На рис. 5 и 6 соответственно приведены распределения концентраций фосфора $C_P(X, Y)$ и бора $C_B(X, Y)$ в кремнии и диоксиде кремния вдоль Y при различных значениях $X = 0,75$ (кривая 1); 2,00 (кри-

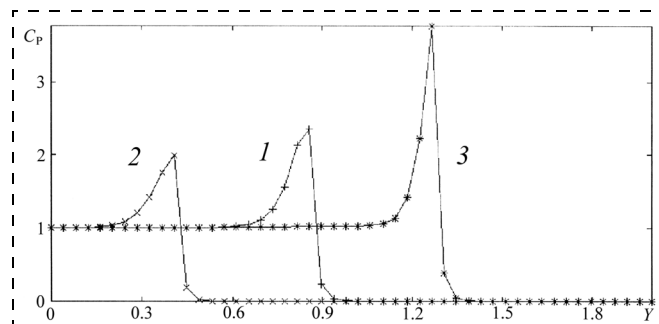


Рис. 5. Распределение концентраций фосфора $C_P(X, Y)$ в кремнии и диоксиде кремния вдоль Y при различных значениях X , равных 0,75 (кривая 1); 2,00 (кривая 2) и 2,90 (кривая 3), для трехмасочной технологии отжига

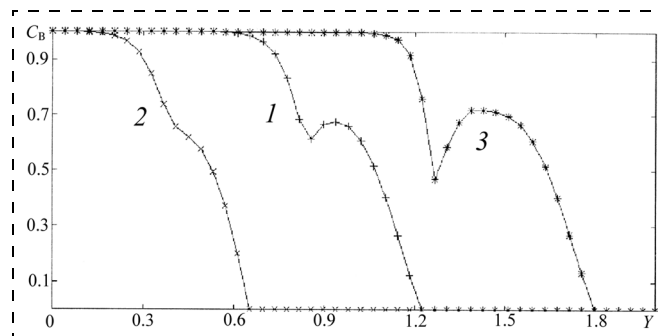


Рис. 6. Распределение концентраций бора $C_B(X, Y)$ в кремнии и диоксиде кремния вдоль Y при различных значениях X : 0,75 (кривая 1); 2,00 (кривая 2) и 2,90 (кривая 3), для трехмасочной технологии отжига

вая 2) и 2,90 (кривая 3). Эти вертикальные линии проходят в наиболее характерных зонах. Первая линия проходит области материала Si, пересекает фронты SiO_2/Si и SiO_2/O_2 (между которыми располагается подобласть SiO_2) и выходит в область O_2 . Вторая линия — центральная линия задачи: начинается в области Si, пересекает маску, лежащую на дне "траншеи", вокруг которой сформировался достаточно толстый слой SiO_2 , и выходит в область O_2 . Третья линия адекватна первой, с тем лишь отличием, что она проходит в более высоком слое Si (справа от "траншеи").

Проанализируем результирующее распределение примеси фосфора на центральной линии задачи (кривая 2 на рис. 5). Если бы маска занимала все дно "траншеи", то распределение $C_P(2, Y)$ сохранялось бы до конца процесса равным 1 под маской (в Si) и 0 в O_2 . В данном производственном цикле, когда маска вдвое короче ширины "траншеи", процесс окисления (фронт SiO_2/Si) продвигается и под маску. При этом фронт "толкает" перед собой фосфор и "втягивает" в себя бор. Поскольку фронты волн окисления, идущие под центр маски с левого и правого ее краев, сомкнулись на уровне $Y \approx 0,4$ (см. рис. 2, в), то следует ожидать здесь максимума, что и имеет место: $C_P(2; 0,4) \approx 2$. Далее при увеличении $Y > 0,5$ располагается область над маской (при $t = 0$ здесь $C_P = 0$). В момент завершения процесса над маской образуется область окисла SiO_2 , до $Y \approx 0,6$. Теперь здесь концентрация C_P очень незначительна, но все-таки не

нулевая (остаточное "недовыталкивание" Р в SiO₂). Дислокация окисла над маской определяется законом "наработки" объема SiO₂ из Si и продвижением SiO₂ вверх маски из-под нее и от стенок "траншей".

Аналогично, в принципе, распределение фосфора и на других линиях (кривые 1 и 3, рис. 5). Формируется максимум C_p вблизи фронта SiO₂/Si с плавным изменением в область Si и крутым падением в область SiO₂ и далее — до нулевых значений в области O₂.

Сформированные распределения концентраций примеси бора C_B на этих вертикалях носят более сложный характер (см. рис. 6) ввиду того, что В не выталкивается в окисел, как Р, а втягивается в него из ближайших к фронту SiO₂/Si областей кремния, с последующим перераспределением внутри SiO₂, вследствие диффузии и конвективного перемешивания в окисле. Тем не менее, на графиках рис. 6 можно точно определить положение фронта волны окисления по характерному признаку — близкорасположенным локальным минимумом и максимумом C_B. Это хорошо просматривается на кривых 1 и особенно 3, где влияние защитных масок не является доминирующим в процессе перераспределения легирующих примесей.

Таким образом, в процессе распространения волн окисления в базовом материале равномерные в начальный момент распределения примесей фосфора и бора, вследствие процесса их сегрегации на фронте SiO₂/Si стали существенно неравномерными вдоль каждого из координатных направлений.

Заключение

Проведено математическое моделирование физико-химических процессов, лежащих в основе одного из сегментов технологического цикла создания новых полупроводниковых материалов для нанoeлектроники. Этот этап производства — отжиг подложки базового материала (Si, Ti или Ge) в кислороде, предназначен для формирования особых наноструктур донорных (Р, As или Sb) и акцепторных (В, Ga или Al) легирующих примесей, равномерно распределенных в базовом материале до начала отжига. В работе для одного из вариантов применяющихся конфигураций поверхности подложки ("траншея"), частично закрытой защитными масками, которые предохраняют участки поверхности от воздействия окислителя, проведено исследование динамики роста пленки окисла и изучение перераспределения примесей вследствие физико-химического процесса сегрегации на фронте волны "окисел/материал". Получены и проанализированы распределения концентраций примесей с образованием различных доменов, в том числе специфических наноструктур — узколокализованных зон (размерами 40–60 нм) повышенной концентрации донорных и акцепторных примесей. В этих зонах вследствие высокой электронной (*n*-типа) и дырочной (*p*-типа) проводимо-

сти после проведения других технологических стадий производства возможна организация диодных и транзисторных каналов, а также других элементов интегральных микросхем. Ширина этих наноструктур определяет плотность упаковки транзисторов на кристалле. Повышение точности моделирования с двумя магистральными путями — использованием физико-математических моделей, более адекватных реальным физическим процессам, и применением параллельных технологий высокопроизводительных вычислений на суперкомпьютерах, — позволят существенно улучшить характеристики разрабатываемых микросхем.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность проф. С. Н. Коробейникову за полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 05-01-00009 и 06-08-00384).

Список литературы

1. Пахомов С. А. Новый прорыв в 65-нанометровом технологическом процессе // Компьютер Пресс. 2004. № 11. С. 149–155.
2. Deal B. E., Grove A. S. General relationship for the thermal oxidation of silicon // Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 37–70.
3. Ho C. P., Plumber J. D. Si/SiO₂ interface oxidation kinetics: a physical model of high substrate doping levels // J. Electrochem. Soc. 1979. V. 126, N 9. P. 1516–1522.
4. Вуль А. Я., Макарова Т. Л., Осипов В. Ю., Зинчик Ю. С., Бойцов С. К. Кинетика окисления кремния и структура окисных слоев толщиной менее 50 ангстрем // Физика и техника полупроводников. 1992. Т. 26, № 1. С. 111–121.
5. Senez V., Fereiza P., Baccus A. Two-dimensional simulation of local oxidation of silicon: calibrated viscoelastic flow analysis // IEEE Trans. Elec. Dev. 1996. V. 43, N 5. P. 720–731.
6. Romano V. 2D simulation of a silicon MESFET with a nonparabolic hydrodynamical model based on the maximum entropy principle // J. Comput. Phys. 2002. V. 176, N 1. P. 70–92.
7. Blokhin A. M., Bushmanov R. S., Romano V. Asymptotic stability of the equilibrium state for the hydrodynamical model of charge transport in semiconductors based on the maximum entropy principle // Int. J. Engineering Science. 2004. V. 42. N 8–9. P. 915–934.
8. Александров А. Л., Тарнавский Г. А., Шпак С. И., Гулидов А. С., Обрект М. С. Численное моделирование задачи динамики роста пленки окисла в полупроводниковых подложках на основе геометрического подхода и метода Дила—Гроува // Вычислительные методы и программирование. 2001. Т. 2. № 1. С. 92–111.
9. Тарнавский Г. А., Шпак С. И., Обрект М. С. Численное моделирование и компьютерный алгоритм процесса сегрегации легирующих примесей на границе волны окисления в полупроводниковых подложках // Вычислительные методы и программирование. 2001. Т. 2. № 1. С. 12–26.
10. Тарнавский Г. А., Шпак С. И., Обрект М. С. Сегрегация бора, имплантированного в кремний, на угловых конфигурациях волны окисления кремний/диоксид кремния // Письма в Журн. экспериментальной и теоретической физики. 2001. Т. 73. № 9–10. С. 536–541.
11. Тарнавский Г. А., Шпак С. И., Обрект М. С. Особенности сегрегации легирующих примесей элементов V (а)-подгруппы на угловых конфигурациях границы окисления "кремний/диоксид кремния" // Инженерно-физический журн. 2002. Т. 75. № 1. С. 142–147.

В. Л. Миронов, канд. физ.-мат. наук,
О. Г. Удалов, Б. А. Грибков, канд. физ.-мат. наук,
А. А. Фраерман, д-р физ.-мат. наук,
Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

Рентгеновская рефлектометрия и атомно-силовая микроскопия поверхностей с негауссовыми шероховатостями

Проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на сравнение возможностей методов атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеновской рефлектометрии (РРМ) по исследованию микрорельефа поверхности образцов. Показано, что метод АСМ дает более адекватную, по сравнению с методом РРМ, информацию о шероховатости поверхности. Разработаны методики оценки параметров, характеризующих рассеяние рентгеновского излучения на шероховатостях, по профилям рельефа поверхности, получаемым с помощью АСМ.

Введение

Методы рентгеновской рефлектометрии (РРМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) широко применяются для изучения наномасштабных шероховатостей поверхности. В основе исследований поверхности методами РРМ лежит тот факт, что коротковолновое рентгеновское излучение эффективно рассеивается в основном мелкомасштабными неровностями рельефа. При этом угловые зависимости зеркальной и диффузной компонент рассеянного излучения содержат информацию о средних геометрических характеристиках ансамбля рассеивающих шероховатостей [1–11]. Недостатком методов РРМ является то, что для интерпретации результатов измерений необходимо привлекать априорные модельные представления о характере микрорельефа поверхности, при этом оценки статистических параметров шероховатостей существенно зависят от выбранной модели поверхности.

В АСМ непосредственно регистрируется рельеф поверхности с нанометровым разрешением, что позволяет рассчитывать все статистические параметры шероховатостей [12–14]. Однако метод АСМ обладает рядом недостатков. В частности, одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих разрешение зондовых микроскопов, является конечный размер рабочей части зонда. Это необходимо учитывать для правильной количественной оценки параметров шероховатостей [15–18]. Другим недостатком АСМ является относительно небольшое поле обзора, что ограничивает диапазон изучаемых пространственных частот рельефа поверхности.

В силу различной природы взаимодействия рентгеновского излучения и АСМ-зонда с поверхностью методы РРМ и АСМ дают различную информацию об ансамбле шероховатостей. При этом результаты

РРМ- и АСМ-измерений существенно зависят от степени развитости рельефа поверхности и типа шероховатостей. В настоящее время установлено, что для сверхгладких поверхностей (с неровностями на уровне единиц ангстрем) методы РРМ и АСМ дают хорошо совпадающие результаты измерений параметров шероховатостей [19, 20]. В случае же поверхностей с сильно развитым рельефом наблюдается резкое несоответствие между оценками параметров шероховатостей по данным АСМ- и РРМ-измерений [21–25].

Целью данной работы является сравнение возможностей методов РРМ и АСМ для исследования характеристик шероховатости поверхностей с сильно развитым рельефом негауссового типа. В первой части работы кратко изложены теоретические основы рассеяния рентгеновского излучения на шероховатостях поверхности. Рассмотрены методики оценки параметров шероховатостей (таких как дисперсия, радиус корреляции, фрактальная размерность) по данным атомно-силовой микроскопии, а также по угловым зависимостям интенсивности зеркальной и диффузной компонент рассеянного излучения. Во второй части работы приводятся результаты систематических сравнительных исследований шероховатости поверхности серии пластин из стекла методами АСМ и РРМ. Также приводятся результаты расчетов угловых зависимостей зеркальной и диффузной компонент рассеянного излучения по данным АСМ, позволяющие оценивать параметры рельефа поверхности, влияющие на процессы рассеяния рентгеновского излучения.

Определение параметров шероховатости рельефа поверхности на основе данных рентгеновской рефлектометрии

Теоретические основы рассеяния рентгеновского излучения на шероховатых поверхностях рассмотрены в работах [1–8]. Коэффициент зеркального отражения рентгеновского излучения от шероховатой поверхности определяется выражением

$$R(q_z) = R_0 \exp(-\sigma^2 q_z^2). \quad (1)$$

Здесь R_0 — френелевский коэффициент отражения; σ — средняя квадратическая шероховатость (корень квадратный из дисперсии) рельефа; $q_z = 4\pi\lambda^{-1}\sin(\alpha)$, где α — угол скольжения; λ — длина волны излучения.

При выводе формулы (1) предполагается, что функция $Z(x, y)$, описывающая рельеф поверхности, является гауссовой случайной величиной.

Интенсивность рассеянного шероховатостями излучения в борновском приближении может быть рассчитана следующим образом [3]:

$$I_{scat}(\mathbf{q}) \propto \left| \int_{S_0} e^{-q_z^2 g(x, y)/2} e^{-iq_x x - iq_y y} dx dy \right|^2, \quad (2)$$

где $\mathbf{q} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$, где $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ — волновые векторы падающей и рассеянной волн соответственно; $g(x, y)$ — структурная функция поверхности; S_0 — площадь, освещаемая пучком рентгеновского излучения. Выражение (2) также получено в предположении, что

рельеф поверхности является гауссовой случайной величиной.

Существуют две методики, позволяющие на основе формул (1) и (2) делать оценки параметров шероховатости поверхности. В первой экспериментально регистрируется угловая зависимость интенсивности зеркальной компоненты отраженного рентгеновского излучения. Экспериментальную кривую аппроксимируют с помощью формулы (1). Параметр σ , при котором достигается наилучшее совпадение экспериментальной и теоретической кривой, принимают за дисперсию шероховатостей поверхности. Во второй методике измеряют угловую зависимость интенсивности рассеянного шероховатостями излучения, которую аппроксимируют с помощью формулы (2). При этом в качестве структурной функции используют функцию вида

$$g(x, y) = g(\sqrt{x^2 + y^2}) = g(r) = 2\sigma^2 \left(1 - e^{-(r/\rho)^{2h}} \right). \quad (3)$$

Эта функция имеет три параметра: σ — среднюю квадратическую шероховатость; ρ — радиус корреляции шероховатостей; h — так называемый параметр Херста, определяющий фрактальную размерность рельефа поверхности. Набор параметров, при котором достигается наилучшее совпадение теоретической и экспериментальной кривых, принимают за характеристики микрорельефа исследуемого образца.

Центральным предположением в двух описанных методиках является предположение о гауссовом характере рельефа поверхности. Однако реальные поверхности могут существенно отличаться от гауссовых, что приводит к неправильной оценке параметров шероховатости поверхности по угловым зависимостям зеркальной и диффузной компонент рассеянного излучения.

Например, распространенным типом негауссовых поверхностей являются поверхности со случайными вкраплениями в виде бугорков, имеющих достаточно большие размеры и значительную поверхностную плотность [21–23]. Вклад ансамбля таких бугорков в среднее квадратическое отклонение высот рельефа поверхности и в рассеяние рентгеновского излучения можно оценить, используя следующую простую модель [22]. Представим рельеф поверхности в виде суммы двух некоррелированных функций:

$$Z(x, y) = f_G(x, y) = f_G(x, y) + f_P(x, y), \quad (4)$$

где $f_G(x, y)$ — поверхность, имеющая гауссово распределение по высотам, а $f_P(x, y)$ — функция, описывающая ансамбль бугорков, которую для определенности выберем в виде случайной пуассоновской функции:

$$f_P(x, y) = \sum_m \varphi_m(x - x_m, y - y_m), \quad (5)$$

где $\varphi_m(x, y)$ — функция, описывающая форму бугорков; x_m, y_m — координаты центра бугорков.

Возьмем, для простоты, функцию $\varphi_m(x, y)$ одинаковой для всех бугорков в виде цилиндра высотой A и с площадью основания S_0 . Тогда выражения для

дисперсии шероховатости такой поверхности при условии $\langle f_G f_P \rangle = 0$ запишется в следующем простом виде:

$$\sigma_{GP}^2 = \langle f_{GP}^2 \rangle - \langle f_{GP} \rangle^2 = \sigma_G^2 + A^2(p - p^2), \quad (6)$$

где σ_G^2 — дисперсия шероховатостей гауссовой поверхности; p — коэффициент заполнения поверхности случайными бугорками, равный отношению суммарной площади бугорков к общей площади поверхности образца. Скобками $\langle \rangle$ обозначена операция усреднения.

Как известно, сечение рассеяния излучения в борновском приближении определяется следующим образом [3]:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = 4\pi^2 S_0 \times \left(\frac{1-n}{\lambda^2} \right)^2 \int \int_{S_0} \langle e^{-iq_z(Z(0,0) - Z(x,y))} \rangle e^{-iq_x x - iq_y y} dx dy, \quad (7)$$

где n — показатель преломления вещества, из которого состоит образец. В случае гауссовых поверхностей выражение (7) дает для коэффициента зеркального отражения и интенсивности рассеянного излучения выражения, совпадающие с (1) и (2). В случае же поверхности со случайными бугорками (4) формула (7) дает следующие выражения для коэффициента отражения и интенсивности рассеянного шероховатостями излучения:

$$R(q_z) = R_0 \exp \left\{ -q_z^2 \sigma_G^2 - 4p \sin^2 \left(\frac{q_z A}{2} \right) \right\}; \quad (8)$$

$$I_{scat}(\mathbf{q}) \propto \left| \int \int_{S_0} e^{-iq_z g_G(x,y)/2} \times \right. \\ \left. \times (1 - 4p \sin^2(q_z A/2)) e^{-iq_x x - iq_y y} dx dy \right|. \quad (9)$$

Таким образом, из сравнения выражений (1), (2) и (8), (9) видно, что рассеяние на пробной поверхности (3) не может быть описано в рамках гауссовой модели. Действительно, выражения (8), (9) переходят в выражения (1), (2) лишь в предельном случае малых высот бугорков A и малых чисел заполнения поверхности p . С ростом же высоты бугорков A эти величины ведут себя по-разному, так что для сильно развитого рельефа, с распределением по высотам, существенно отличающимся от гауссового, оценки характеристик шероховатости, сделанные на основе формул (1) и (2), могут существенно отличаться от действительных параметров шероховатости.

Определение параметров микрорельефа поверхности методом АСМ

Изображение поверхности в атомно-силовом микроскопе регистрируется в виде дискретной двумерной функции $Z(x, y)$. Как правило, АСМ-кадры представляют собой квадратные матрицы размерностью $N \times N$ (в основном 256×256 и 512×512) элементов. Средняя квадратическая шероховатость

рельефа по данным АСМ рассчитывается следующим образом:

$$\sigma_{АСМ} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{ij} (Z_{ij} - \bar{Z})^2}, \quad (10)$$

где Z_{ij} — значение высоты рельефа в точке с координатами i и j ; $\bar{Z}$ — средняя по АСМ-кадру высота рельефа. Спектральная плотность мощности определяется в виде

$$S_{\alpha\beta} = |F_{\alpha\beta}|^2, \quad (11)$$

где $F_{\alpha\beta}$ — Фурье-образ функции Z_{ij} . Корреляционная функция поверхности может быть вычислена посредством обратного преобразования Фурье:

$$C_{ij} = \sum_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta} \exp \left[2 \left(\frac{\alpha i}{N} + \frac{\beta j}{N} \right) \pi \right]. \quad (12)$$

Радиус корреляции шероховатостей $\rho_{АСМ}$ может быть определен как расстояние, на котором функция корреляции снижается в e раз.

Для вычисления фрактальной размерности поверхности $h_{АСМ}$ применялся метод вариаций, описанный в работе [26]. Согласно этому методу, для последовательности расширяющихся ячеек площадью $2n \times 2n$ с центром в точке (i, j) вычислялась средняя по M^2 точкам вариация максимальных и минимальных высот шероховатостей:

$$V_n = \frac{1}{M^2} \sum_{i,j} [Z_{i,j}^{\max} - Z_{i,j}^{\min}], \quad (13)$$

где $M = N - 2n$; N — число точек в строке сканирования. После этого строился график зависимости $\ln \left[\left(\frac{N}{n} \right)^3 V_n \right]$ от $\ln \left[\frac{N}{n} \right]$ для $n = 1, 2, \dots, n_{\max}$. Тангенс угла наклона данного графика к оси абсцисс дает значение фрактальной размерности $D_{АСМ}$. По известной фрактальной размерности вычислялся коэффициент Херста $h_{АСМ}$:

$$h_{АСМ} = 3 - D_{АСМ}. \quad (14)$$

На основе рельефа поверхности, полученного с помощью атомно-силового микроскопа, можно также рассчитать интенсивность зеркально отраженного от поверхности и рассеянного шероховатостями излучения. При этом нет необходимости использовать какие-либо модельные представления о рельефе поверхности и можно пользоваться непосредственно формулой (7). При этом усреднение по ансамблю в (7) заменяется усреднением по набору кадров, полученных в различных точках поверхности. Рассчитанные по АСМ-данным угловые зависимости коэффициента отражения и интенсивности рассеянного излучения могут быть использованы для получения оценок эффективных параметров шероховатости поверхности $\sigma_{эфф}$, $h_{эфф}$ и $\rho_{эфф}$ (вообще говоря, не совпадающих с АСМ-оценками этих параметров), которые характеризуют рассеяние на микрорельефе поверхности.

Сопоставление диапазонов пространственных частот, регистрируемых АСМ и РРМ

Для корректного сравнения методов АСМ и РРМ необходимо, чтобы эти методы работали в одинаковых диапазонах пространственных частот рельефа поверхности. Максимальный диапазон пространственных частот, регистрируемых АСМ, ограничивается частотами k_L и k_d :

$$k_L = \frac{2\pi}{L}; k_d = \frac{2\pi}{d}, \quad (15)$$

где L — максимальный размер области сканирования; d — диаметр кончика зонда. При исследовании рельефа на участках более 10×10 мкм шаг сканирования l оказывается больше, чем размер кончика зонда d , и максимальная пространственная частота в АСМ-изображении определяется шагом сканирования:

$$k_d = \frac{2\pi}{l}. \quad (16)$$

Это связано с ограничением числа точек в регистрируемом АСМ-изображении. Например, если размер кадра составляет 50 мкм и при этом строки сканирования содержат 256 точек, то $k_L = 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-1}$, а $k_d = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-1}$.

Для того чтобы оценить диапазон пространственных частот, который может быть изучен с помощью РРМ-методов, рассмотрим выражение для интенсивности рассеянного рентгеновского излучения [3], полученное в приближении малых высот шероховатостей из формулы (7):

$$I_{scat}(\mathbf{q}) \propto \iint_{S_0} C(x, y) e^{iq_x x + iq_y y} dx dy. \quad (17)$$

Здесь I_{scat} — интенсивность рассеянного излучения; $C(x, y)$ — корреляционная функция поверхности. Из выражения (17) видно, что угловая зависимость интенсивности рассеянного излучения представляет собой спектральную плотность мощности поверхности [20]. В эксперименте, как правило, размер щели приемника в направлении, перпендикулярном плоскости падения, велик, и измеряемая в эксперименте интенсивность излучения на приемнике I_{det} является интегралом от $I_{scat}(\mathbf{q})$ по q_y :

$$I_{det} = \int I_{scat}(\mathbf{q}) dq_y \propto \int_L C(x, y) e^{iq_x x} dx; \quad (18)$$

$$q_x = k_{2x} - k_{1x} = k(\cos\theta_2 - \cos\theta_1), \quad (19)$$

где k_1 и k_2 — волновые векторы падающей и рассеянной волн; $k = 2\pi/\lambda$; θ_2 и θ_1 — углы между плоскостью поверхности образца и волновыми векторами рассеянной и падающей волн. Из формул (18), (19) видно, что значение максимальной пространственной частоты, регистрируемой РРМ, определяется максимальной разностью углов θ_2 и θ_1 , а значение минимальной пространственной частоты определяется шагом сканирования по углам. Отметим, что шаг сканирования по углам не может быть меньше угловой расходимости падающего пучка, что и определяет предельное значение минимальной пространственной частоты в РРМ-экспериментах. Вместе с тем, пре-

дельное значение максимальной пространственной частоты в спектре поверхности фактически определяется уровнем шумов в приборе, так как интенсивность рассеянного излучения быстро падает с увеличением разницы между θ_2 и θ_1 . Для пучка с расходимостью $0,005^\circ$ нижний предел пространственных частот в РРМ-измерениях составляет $k_{\min} = 0,18 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-1}$. При этом для условий эксперимента, использованных в данной работе ($\theta_1 + \theta_2 = 0,6^\circ$), $k_{\max} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-1}$.

Таким образом, диапазоны пространственных частот, которые могут быть исследованы методами АСМ и РРМ, перекрываются, что оправдывает возможность сравнения параметров поверхностного рельефа, получаемых данными методами.

Методика эксперимента

Для сопоставления АСМ- и РРМ-методов была проведена серия экспериментов, в которых исследовалась поверхность полированных пластин из стекла, имеющих различные типы шероховатостей. РРМ-исследования образцов проводились на рентгеновских дифрактометрах "Дрон-3М" и "Philips — X'Pert Pro" в диапазоне жесткого рентгеновского излучения Cu-K_α (длина волны $\lambda = 0,154 \text{ нм}$). На рис. 1 представлена схема рентгеновских измерений. В эксперименте регистрировались угловые зависимости зеркальной и диффузной компонент отраженного рентгеновского излучения. Угловые зависимости интенсивности зеркальной компоненты отраженного излучения регистрировались в процессе $\theta - 2\theta$ сканирования, когда при повороте образца на угол θ_1 приемник поворачивался на угол $\theta_2 = 2\theta_1$. На основе этих данных оценивалась дисперсия шероховатостей поверхности $\sigma_{\text{РРМ}}$. Угловые зависимости интенсивности диффузно-рассеянного излучения регистрировались посредством вращения образца при фиксированных положениях источника и приемника (так называемые кривые качания). В этом случае выполняется соотношение $\theta_1 + \theta_2 = \text{const}$. Используя данные угловых зависимостей интенсивности диффузно-рассеянного излучения, оценивали радиус корреляции $\rho_{\text{РРМ}}$ и фрактальную размерность шероховатостей $h_{\text{РРМ}}$.

АСМ-исследования поверхности образцов проводились с помощью атомно-силового микроскопа "Solver P7LS". Максимальное поле обзора составляло $60 \times 60 \text{ мкм}$. Определение параметра средней квадратической шероховатости $\sigma_{\text{АСМ}}$, радиуса корреляции $\rho_{\text{АСМ}}$ шероховатостей и параметра Херста $h_{\text{АСМ}}$ осуществлялось по АСМ-кадрам с помощью описанных выше стандартных методик. Также на

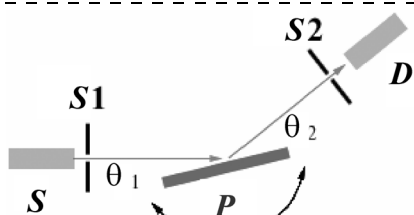


Рис. 1. Схема рентгеновских измерений: P — образец; S — источник; D — детектор, $S1, S2$ — щели

основе АСМ-рельефа поверхности с использованием формулы (7) были проведены расчеты угловых зависимостей коэффициента зеркального отражения и интенсивности рассеянного излучения и по ним сделаны оценки параметров $\sigma_{\text{эфф}}$, $h_{\text{эфф}}$ и $\rho_{\text{эфф}}$.

Сравнение оценок средней квадратической шероховатости, сделанных на основе АСМ-данных и по угловым зависимостям зеркальной компоненты отраженного излучения

Характерная угловая зависимость коэффициента отражения зеркальной компоненты рассеянного излучения для поверхности стеклянной подложки с негауссовым распределением по высотам и результаты аппроксимации с помощью фактора Дебая—Валлера представлены на рис. 2.

Характерное АСМ-изображение участка поверхности той же стеклянной подложки с негауссовым распределением по высотам приведено на рис. 3, а.

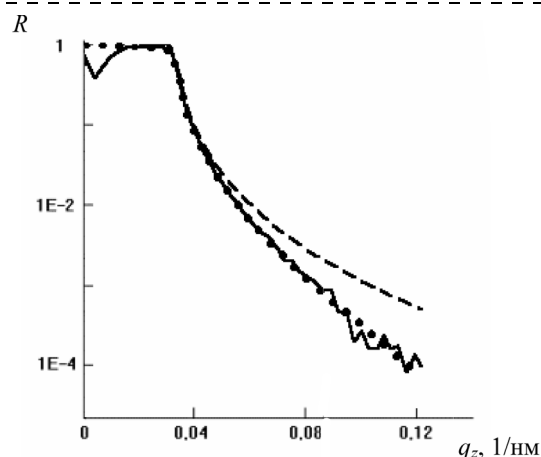


Рис. 2. Угловая зависимость коэффициента отражения рентгеновского излучения для одной из стеклянных подложек. Экспериментальная кривая показана сплошной линией. Штриховой линией показана зависимость $R_0(q_z)$, рассчитанная по формулам Френеля. Кружками показана зависимость $R(q_z)$, полученная с учетом фактора Дебая—Валлера. (Провал на экспериментальной зависимости в области малых q_z обусловлен конечными размерами образца)

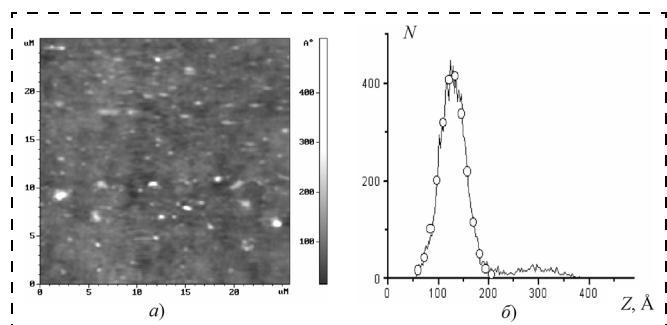


Рис. 3. Характерное АСМ-изображение рельефа поверхности стеклянной пластины с негауссовым распределением по высотам (а); гистограмма распределения (б) по высотам, соответствующая представленному АСМ-изображению (сплошная линия). Кружками показаны значения функции Гаусса, аппроксимирующей распределение по высотам в области основного максимума, связанного с мелкомасштабными шероховатостями; Z — высота рельефа поверхности; N — число точек АСМ-изображения поверхности с высотой Z

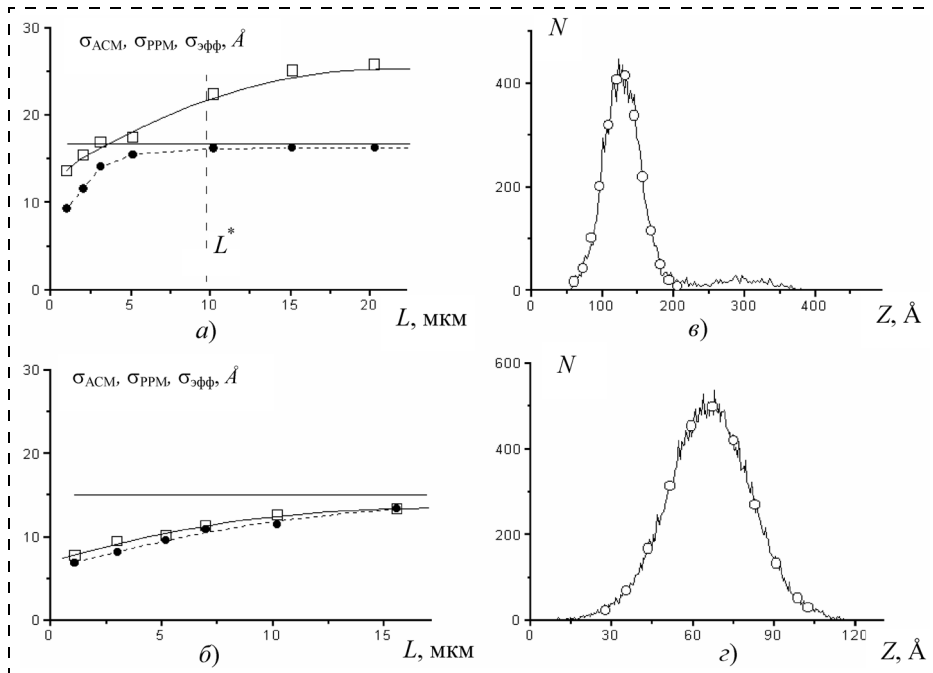


Рис. 4. Зависимости параметров $\sigma_{\text{АСМ}}$, $\sigma_{\text{РРМ}}$, $\sigma_{\text{эфф}}$ от размера кадра для поверхностей с негауссовым (а) и гауссовым (б) распределением по высотам. Значение $\sigma_{\text{РРМ}}$ показано линией, параллельной оси абсцисс. Зависимости $\sigma_{\text{АСМ}}$ и $\sigma_{\text{эфф}}$ от размера кадра показаны соответственно сплошной и штриховой линиями. Гистограммы распределения по высотам для негауссовой (в) и гауссовой (г) поверхностей. Кругами показаны значения функций Гаусса, аппроксимирующих распределение по высотам

На рисунке отчетливо видны крупномасштабные неровности в виде случайных бугорков. Функция распределения по высотам у такой поверхности (рис. 3, б) отличается от гауссовой наличием негауссового "хвоста" в диапазоне высот 20–40 нм.

Проведенные исследования показали, что значение параметра $\sigma_{\text{АСМ}}$, получаемое с помощью АСМ-измерений, существенным образом зависит от размеров АСМ-кадра. Данная зависимость обусловлена увеличением полосы пространственных частот рельефа поверхности, регистрируемых атомно-силовым микроскопом, с увеличением размера области сканирования [13]. На рис. 4 приведены типичные зависимости параметра $\sigma_{\text{АСМ}}$ от размера кадра и типичные гистограммы распределения по высотам для стеклянных пластин с поверхностью гауссова (а, в) и негауссова (б, г) типов.

Особо отметим, что для гауссовых поверхностей с увеличением размера кадра параметр $\sigma_{\text{АСМ}}$ стремится к $\sigma_{\text{РРМ}}$, тогда как для негауссовых поверхностей наблюдается существенное расхождение между параметрами $\sigma_{\text{АСМ}}$ и $\sigma_{\text{РРМ}}$.

Для всех подложек по АСМ-данным были проведены расчеты угловых зависимостей коэффициента отражения рентгеновского излучения на основе формулы (7). На рис. 5 приведены результаты расчета угловой зависимости коэффициента отражения для негауссовой поверхности по ее АСМ-изображению.

Как видно из рисунка, угловая зависимость, рассчитанная непосредственно по АСМ-рельефу поверхности, хорошо согласуется с экспериментальной кривой, полученной в рентгеновских измерениях. На основании данных расчетов с использованием методики определения шероховатости поверхности по

угловой зависимости зеркальной компоненты рассеянного излучения были получены оценки параметра эффективной средней квадратической шероховатости

$$\sigma_{\text{эфф}} = \sqrt{-\frac{1}{2} \ln \left(\frac{R(q_z)}{R_0(q_z)} \right)}. \quad (20)$$

Следует отметить, что для поверхностей, сильно отличающихся от гауссовых, определение $\sigma_{\text{эфф}}$ до некоторой степени условно. В этом случае величина $\sigma_{\text{эфф}}$ является функцией угла падения и можно говорить лишь о некотором среднем ее значении на некотором интервале углов. Характерная угловая зависимость величины $\sigma_{\text{эфф}}$ от параметра q_z , рассчитанная по АСМ-рельефу поверхности одной из подложек, приведена на рис. 6. На рисунке видно, что зависимость $\sigma_{\text{эфф}}(q_z)$ имеет две характерные области изменения: резко спадает в области углов, меньших критического, и слабо меняется в области углов, больших критического.

Для оценки шероховатостей нами использовались величины $\sigma_{\text{эфф}}$, усредненные по области углов, больших критического, где зависимость $\sigma_{\text{эфф}}$ от угла слабая. Как показали расчеты, для усредненных величин $\sigma_{\text{эфф}}$ также наблюдается масштабная зависимость от размера АСМ-кадра (см. рис. 4, б). Однако, как видно из приведенных зависимостей, для негауссо-

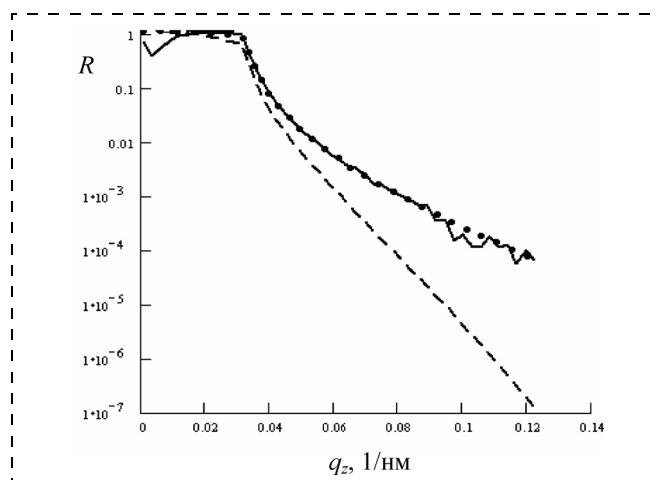


Рис. 5. Угловая зависимость коэффициента отражения рентгеновского излучения от поверхности стеклянной подложки с негауссовым распределением по высотам от параметра q_z . Экспериментальная зависимость показана сплошной линией. Зависимость $R(q_z)$, рассчитанная на основании формулы (7) непосредственно по АСМ-изображению участка поверхности, показана кружками. Расчеты проводились по АСМ-кадру размерами 40×40 мкм. Для сравнения штриховой линией показана зависимость $R(q_z)$, рассчитанная по зависимости Дебая—Валлера с параметром $\sigma_{\text{АСМ}}$, рассчитанным по АСМ-рельефу того же участка поверхности

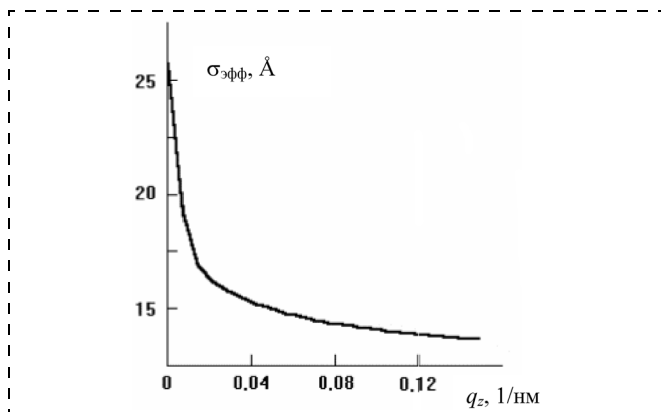


Рис. 6. Угловая зависимость параметра эффективной шероховатости от параметра q_z , рассчитанная непосредственно по АСМ-рельефу поверхности одной из подложек. Значение $\sigma_{\text{эфф}}$ при $q_z = 0$ совпадает со средним квадратическим отклонением высот рельефа, рассчитываемым по АСМ-профилю поверхности

вых поверхностей значения $\sigma_{\text{эфф}}$ значительно меньше параметра $\sigma_{\text{АСМ}}$, и с ростом размера кадра $\sigma_{\text{эфф}}$ стремится к $\sigma_{\text{РРМ}}$, получаемой в РРМ-измерениях.

Таким образом, для получения оценки величины $\sigma_{\text{РРМ}}$ по данным АСМ необходимо использовать для расчета параметра $\sigma_{\text{эфф}}$ АСМ-изображения с размером кадра $L > L^*$ (см. рис. 4, а), превышающим период основных пространственных гармоник рельефа поверхности.

Сравнение оценок радиуса корреляции и фрактальной размерности шероховатости, сделанных на основе АСМ-данных и по угловым зависимостям диффузной компоненты рассеянного излучения

Диффузное рассеяние исследовалось от двух подложек из стекла, различающихся шероховатостью и характером функции распределения по высотам. Характерные АСМ-изображения поверхности этих подложек приведены на рис. 7.

Из рис. 7, 8 видно, что образец 2 имеет более развитый рельеф поверхности и распределение по высотам, существенно отличающееся от распределения гауссового типа. Параметры шероховатости — дисперсия ($\sigma_{\text{АСМ}}$), радиус корреляции ($\rho_{\text{АСМ}}$) и параметр Херста ($h_{\text{АСМ}}$), рассчитанные на основе АСМ-изображений поверхности, приведены в таблице.

По данным АСМ для каждой из подложек в борновском приближении искаженных волн (DWBA) [3] были рассчитаны угловые зависимости зеркальной и диффузной компонент отраженного рентгеновского излучения. В этом приближении, в отличие от борновского, в качестве невозмущенной системы выступает не вакуум, а полубесконечная среда с идеально плоской поверхностью. Шероховатость рас-

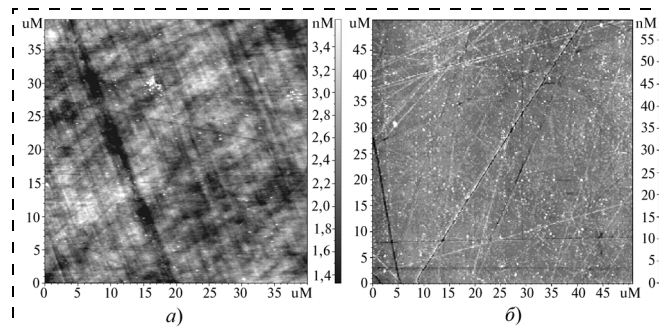


Рис. 7. АСМ-изображения поверхности образцов 1 (а) и 2 (б)

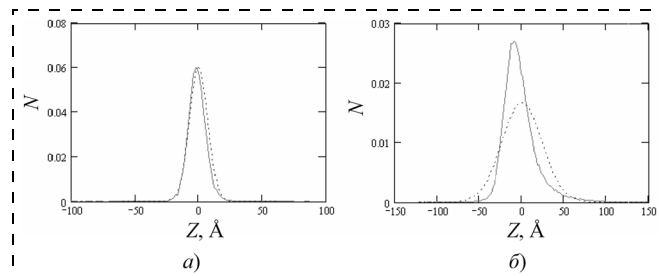


Рис. 8. Функции распределения по высотам для образцов 1 и 2 (сплошная линия). Для сравнения пунктирной линией показана гауссова функция распределения с дисперсией, рассчитанной непосредственно по АСМ-изображениям поверхности:

а — образец 1; б — образец 2

сматривается как возмущение. На рис. 9 приведены графики экспериментальных угловых зависимостей интенсивности рассеянного рентгеновского излучения, а также результаты расчета кривых качения по АСМ изображениям поверхности для образцов 1 и 2. Как видно на рисунке, РРМ- и АСМ-кривые достаточно хорошо согласуются для обоих образцов.

По экспериментальным РРМ-кривым качения с использованием методики, описанной выше, были оценены параметры $\sigma_{\text{РРМ}}$, $\rho_{\text{РРМ}}$, $h_{\text{РРМ}}$, а по расчетным АСМ-кривым — эффективные параметры шероховатости $\sigma_{\text{эфф}}$, $\rho_{\text{эфф}}$, $h_{\text{эфф}}$ (см. таблицу).

Из таблицы видно, что оценки параметров шероховатости поверхности, сделанные с помощью разных методов, отличаются друг от друга. Однако для образца 1, имеющего небольшую шероховатость и практически гауссово распределение по высотам, отличие невелико.

Для образца 2 все параметры шероховатостей, рассчитанные непосредственно по данным АСМ, существенно отличаются от значений, получаемых по данным РРМ-экспериментов. Данное обстоятельство связано с наличием царапин на поверхности второго образца, которые, так же как и в случае бугорков, рассмотренных выше, вносят различный вклад в параметры, определенные непосредственно

Параметры рельефа поверхности образцов

Образец	$\sigma_{\text{АСМ}}$, нм	$\sigma_{\text{РРМ}}$, нм	$\sigma_{\text{эфф}}$, нм	$\rho_{\text{АСМ}}$, нм	$\rho_{\text{РРМ}}$, нм	$\rho_{\text{эфф}}$, нм	$h_{\text{АСМ}}$	$h_{\text{РРМ}}$	$h_{\text{эфф}}$
1	$0,9 \pm 0,1$	$0,84 \pm 0,07$	$0,82 \pm 0,07$	1000 ± 100	1100 ± 100	1100 ± 100	$0,37 \pm 0,02$	$0,27 \pm 0,05$	$0,3 \pm 0,05$
2	$2,7 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	200 ± 40	500 ± 50	440 ± 50	$0,7 \pm 0,05$	$0,6 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$

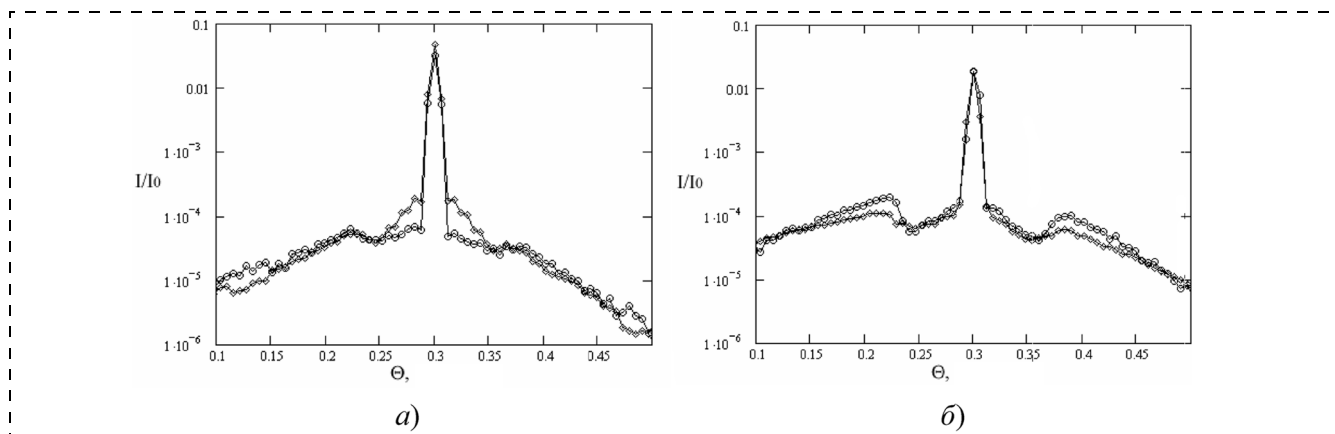


Рис. 9. Угловые зависимости интенсивности отраженного излучения. Кружки — данные РРМ-экспериментов, ромбики — расчеты по АСМ кадрам:

а — образец 1; б — образец 2

по АСМ-изображениям, и в параметры, определяющие рассеяние рентгеновского излучения.

Таким образом, как показывают проведенные расчеты, параметры шероховатостей, получаемые по данным РРМ, могут существенно отличаться от реальных параметров шероховатостей поверхности. АСМ в этом смысле дает более адекватную информацию о параметрах рельефа поверхности. Однако для негауссовых поверхностей с сильно развитым рельефом параметры $\sigma_{АСМ}$, $\rho_{АСМ}$, $h_{АСМ}$ не могут быть использованы для характеристики рассеяния рентгеновского излучения поверхностью. Вместе с тем, видно из таблицы, эффективные параметры $\sigma_{эфф}$, $\rho_{эфф}$, $h_{эфф}$, полученные по угловым зависимостям, рассчитанным на основе АСМ-данных, хорошо согласуются с экспериментальными параметрами $\sigma_{РРМ}$, $\rho_{РРМ}$, $h_{РРМ}$.

Заключение

Таким образом, в работе проведено сравнение возможностей методов атомно-силовой микроскопии и рентгеновской рефлектометрии по исследованию микрорельефа поверхности образцов. Представлены результаты сравнительных АСМ- и РРМ-исследований шероховатости серии стеклянных пластин с различными типами рельефа поверхности. Показано, что в случае поверхностей, имеющих существенно негауссово распределение по высотам, наблюдается расхождение в оценках параметров средней квадратической шероховатости, радиуса корреляции и фрактальной размерности поверхности, полученных из угловых РРМ-зависимостей интенсивности зеркальной и диффузной компонент рассеянного рентгеновского излучения и из расчетов по АСМ-профилям поверхности. Показано, что метод АСМ дает более адекватную, по сравнению с методом РРМ, информацию об ансамбле шероховатостей поверхности.

По данным АСМ-измерений были проведены расчеты угловых зависимостей интенсивности зеркальной и диффузной компонент рассеянного шероховатостями излучения. По полученным зависимостям были сделаны оценки эффективных параметров шероховатости, определяющих рассеяние рентгеновского излучения. Показано, что величины $\sigma_{эфф}$, $\rho_{эфф}$, $h_{эфф}$ хорошо совпадают с аналогичными вели-

чинами $\sigma_{РРМ}$, $\rho_{РРМ}$, $h_{РРМ}$, полученными непосредственно в РРМ-экспериментах, и могут служить для оценок параметров рельефа поверхности, характеризующих рассеяние рентгеновского излучения. В заключение отметим, что для сложных образцов с неоднородной структурой приповерхностного слоя применение комбинированных АСМ/РРМ методик позволяет разделять вклад в рассеяние от поверхностных шероховатостей и от объемных неоднородностей [27].

Авторы выражают благодарность Н. И. Чхало, Ю. А. Вайнеру, С. В. Гапонову, Н. Н. Салащенко за помощь в работе и полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-02-16556).

Список литературы

1. Parratt L. G. Surface studies of solids by total reflection of x-rays // Phys. Rev. 1954. V. 35. N 2. P. 359—369.
2. Nevot L., Croce P. Characterisation des surfaces par reflection rasante de rayon X. Application a etude du polissage de quelques verres silicates // Rev. Phys. Appl. 1980. V. 15. P. 761—779.
3. Sinha S. K., Sirota E. B., Garoff S. et al. X-ray and neutrons scattering from rough surfaces // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. N 4. P. 2297—2311.
4. D. K. G. de Boer. Influence of the roughness profile on the specular reflectivity of x-rays and neutrons // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. N 9. P. 5817—5820.
5. D. K. G. de Boer. X-ray reflection and transmission by rough surface // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. N 8. P. 5297—5305.
6. Rausher M., Salditt T., Spohn H. Small angle x-ray scattering under grazing incidence: the cross section in the distorted-wave Born approximation // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. N 23. P. 16855—16863.
7. D. K. G. de Boer. Probing interface roughness by x-ray scattering // Physica B. 1996. V. 221. P. 18—26.
8. Tolan M., Sinha S. K. X-ray scattering with partial coherent radiation: The exact relationship between "resolution" and "coherence" // Physica B. 1998. V. 248. P. 399—404.
9. Chkalo N. I., Fedorchenko M. V., Kovalenko N. V. et al. Status of X-ray mirror optics at the Siberian SR Centre // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1995. V. 359. N 1—2. P. 121—126.
10. Chkalo N. I., Fedorchenko M. V., Zarodyshev A. V. et al. Al/Al₂O₃: new type of mirrors for intense synchrotron radiation beam // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 1995. V. 359. N 1—2. P. 127—130.
11. Протопопов В. В., Валиев К. А., Имамов Р. М. Измерение пространственного распределения шероховатости сверхгладких поверхностей и дефектов многослойных рентгеновских зеркал // Поверхность. 1999. № 1. С. 111—119.
12. Бухараев А. А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии // Заводская лаборатория. 1994. № 10. С. 15—26.

13. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л. Сканирующая зондовая микроскопия (туннельная и силовая) в задачах метрологии нанoeлектроники // Микроэлектроника. 1996. Т. 26. № 6. С. 426–431.

14. Арутюнов П. А., Толстихина А. Л., Демидов В. Н. Параметры шероховатости по данным измерений атомно-силового микроскопа // Микроэлектроника. 1997. Т. 27. № 6. С. 431–435.

15. Dongmo S., Troyon M., Vautrot P. et. al. Blind restoration method of scanning tunneling and atomic force microscopy images // J. Vac. Sci. Techn. B. 1996. V. 14. P. 1552–1556.

16. Williams P. M., Shakesheff K. M., Davies M. C. et. al. Blind reconstruction of scanning probe image data // J. Vac. Sci. Techn. B. 1996. V. 14. P. 1557–1562.

17. Villarubia J. S. Scanned probe microscope tip characterization without calibrated tip characterizers // J. Vac. Sci. Techn. B. 1996. V. 14. P. 1518–1521.

18. Бухараев А. А., Куковицкий Е. Ф., Овчинников Д. В. и др. Сканирующая силовая микроскопия каталитических частиц никеля, полученных из углеродных нанотрубок // ФТТ. 1997. Т. 39. № 11. С. 2065–2071.

19. Teichert C., MacKay J. F., Savage D. E. et. al. Comparison of surface roughness of polished silicon wafers measured by light scattering topography, soft x-ray scattering, and atomic force microscopy // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. N 18. P. 2346–2348.

20. Asadchikov V. E., Duparre A., Jakobs S. et. al. Comparative study of the roughness of optical surfaces and thin films by use of x-ray scattering and atomic force microscopy // Applied Optics. (1999). V. 38. N 4. P. 684–689.

21. Протопопов В. В., Валиев К. А., Имамов Р. М. Сравнительные измерения шероховатости подложек рентгеновских зеркал методами рентгеновской рефлектометрии и сканирующей зондовой микроскопии // Кристаллография. 1997. № 4. С. 747–754.

22. Востоков Н. В., Гапонов С. В., Миронов В. Л. и др. Определение эффективной шероховатости поверхности и угловой зависимости коэффициента отражения в рентгеновском диапазоне длин волн по данным атомно-силовой микроскопии // Поверхность. 2001. № 1. С. 38–42.

23. Грибков Б. А., Миронов В. Л. Сравнительные исследования шероховатости поверхностей с негауссовым распределением по высотам методами атомно-силовой микроскопии и рентгеновской рефлектометрии // Заводская лаборатория. 2003. Т. 69. № 5. С. 29.

24. Stone V. W. Interfaces in multiphasic polymer-based materials: a study on model systems of interdiffusion and segregation effects // Ph. D. thesis, Universite catholique de Louvain, 1999.

25. Stone V. W., Jonas A. M., Nysten B. et. al. Roughness of free surface of bulk amorphous polymers as studied by x-ray surface scattering // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. № 8. P. 5883.

26. Spanos L., Irene E. A. Investigation of roughened silicon surface using fractal analysis. 1. Two dimensional variation method // J. Vac. Sci. Technol. 1994. A 12 (5). P. 2646.

27. Миронов В. Л., Удалов О. Г. Определение эффективных параметров рельефа поверхности, характеризующих рассеяние рентгеновского излучения, по данным атомно-силовой микроскопии // Известия РАН. Серия физическая. 2005. Т. 69. № 2. С. 269–273.

УДК 621.3.049.77:621.3.085.34

А. С. Лейченко, Н. В. Лупарев, П. А. Стариков,
Н. Н. Чадаев, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Московский физико-технический институт,
Московская обл., г. Долгопрудный,
E-mail: lasl984@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКАХ СВЕТА

Разработана конструкция катодолуминесцентного источника света с автокатодом на основе пучка полиакрилонитрильных углеродных волокон. Проведено моделирование электронно-оптической системы и выявлены оптимальные параметры конструкции лампы. Исследованы световые и эмиссионные характеристики опытной партии катодолуминесцентных источников света. Рассмотрены области применения катодолуминесцентных источников света.

Введение

Человек пользуется источниками света во всех областях своей деятельности. Они могут быть не только средством восприятия (осветительные лампы), но и источником видеoinформации (телевизоры, мониторы). Но любой источник света обладает каким-либо характерным недостатком: неидеальным спектром, большим временем готовности к работе, недостаточным КПД и т. д. Поэтому непрерывно идет поиск новых источников света и совершенствование имеющихся технологий.

Катодолуминесцентные источники света широко применяются в виде электронно-лучевых трубок в мониторах и телевизорах. С развитием электровакуумных технологий, а именно направления автоэмиссионных технологий, открываются новые области применения, где катодолуминесцентные источники света могут реализовать свои преимущества. В настоящее время идут интенсивные исследования в области создания плоских катодолуминесцентных дисплеев [1] и пальчиковых ламп [2] на основе автокатодов. Но серийных приборов в настоящее время не выпускается.

Катодолуминесцентный источник света обладает рядом неоспоримых преимуществ:

- современные технологии катодолуминофоров позволяют создавать любой необходимый спектр видимого излучения с высокой эффективностью;
- время срабатывания менее 1 мс;
- излучение можно сфокусировать практически в любой требуемый угол;
- нечувствителен к радиационному излучению.

Благодаря применению автокатада источник света не имеет греющихся частей, нечувствителен к температуре окружающей среды и обладает мгновенной готовностью к работе, что показали прямые эксперименты в температурном диапазоне от -196 до $+150$ °С.

В данной статье описываются эффективные катодолуминесцентные источники света с автокатодом на основе наноструктурированного углеродного материала — полиакрилонитрильных волокон.

Эффективность источника света непосредственно зависит от эффективностей основных его составляющих — электронной пушки и люминесцентного покрытия. Поэтому был проведен комплекс исследований, включающий изучение эмиссионных свойств катода, оптимизацию электронно-оптической системы, изучение статистики фотоэлектрических параметров

пробной партии приборов и работоспособности источников света в различных областях применения.

Конструкция источника света с автокатодом и методика изготовления

Источник света представляет собой триодную вакуумную лампу с электронной пушкой и экраном, на который нанесен люминофор (рис. 1). Электроны вытягиваются модулятором и ускоряются анодным напряжением. Люминофор светится под действием электронов высоких энергий. Конструкция лампы разрабатывалась таким образом, чтобы наибольшая часть потребляемой энергии выделялась на аноде. Другими словами, эффективность электронного прожектора с автокатодом может достигать 100 %. Для этого необходимо устранить перехват тока на вытягивающем электроде.

Требования к автоэмиссионному катоду для производства электровакуумных приборов были сформулированы в [3]. Материал катода должен обладать следующими свойствами:

- иметь низкую поверхностную подвижность при высоких электрических полях и больших плотностях тока;
- легко вытравливаться в реакторе и быть химически неактивным к атомам и молекулам остаточных газов в вакуумном приборе;
- иметь низкую работу выхода;
- обладать хорошей электро- и теплопроводностью, высокой температурой плавления, низким давлением паров, высокой прочностью на растяжение;
- иметь низкий коэффициент распыления под действием ионной бомбардировки.

Катод должен не только удовлетворять указанным требованиям, но и в течение нескольких тысяч

часов давать стабильный эмиссионный ток в вакууме порядка $0,133 \cdot 10^{-3}$ Па (10^{-6} Торр). В противном случае область применения катода сильно сужается и производство приборов в коммерческих целях становится невыгодным.

В [4] показано, что одиночное углеродное волокно в вакууме $0,133 \cdot 10^{-4}$ Па (10^{-7} Торр) при токе 10 мкА способно работать длительное время — 2400 ч. Эти результаты были подтверждены авторами многих работ [5–7]. В зависимости от способа получения волокна и режима термообработки время жизни катода может варьироваться. До настоящего времени полиакрилонитрильное углеродное волокно является наиболее стабильным автоэмиссионным катодом для работы в техническом вакууме [8]: наработка катода на основе пучка таких углеродных волокон (рис. 2) составила $7,5 \cdot 10^3$ ч при токе 50 мкА.

Изготовление катода из углеродных волокон представляет значительные трудности вследствие малых поперечных размеров волокна ($\varnothing \sim 7$ мкм). Сразу после открытия автоэмиссионных свойств углеродных волокон были предложены различные варианты изготовления катода из углеродных волокон. Одиночное волокно покрывали вольфрамом (10–100 мкм) методом VCD [5] и точечной сваркой прикрепляли на вольфрамовую дужку, что позволяло прогревать катод до высокой температуры. В [3, 4] отдельное волокно фиксировалось в никелевой трубке "аквадагом". Этот метод, по мнению авторов, не давал достаточной механической прочности. На углеродное волокно наносили пленку олова в вакууме $0,133$ Па (10^{-3} Торр) [4], пленку меди электролитическим методом [9] и затем фиксировали медь на держателе катода. Но ни один из методов не был достаточно технологичным

для производства. В ряде случаев торец волокна заостряли до 100 нм различными способами: травлением в NaOH [5–7, 9], коронным разрядом [3, 4, 10, 11]. Однако существенного улучшения эмиссионных свойств и надежности катода при этом не наблюдалось [6], что было также подтверждено в работах, описанных в [12].

Одним из перспективных методов крепления пучка углеродных волокон является его остекловка [13]. Для стеклования нити из углеродных волокон используется вертикальный станок для протяжки стеклованных углеродных волокон. Процесс стеклования заключается в протягивании вдоль оси станка пучка углеродных волокон с параллельным об-

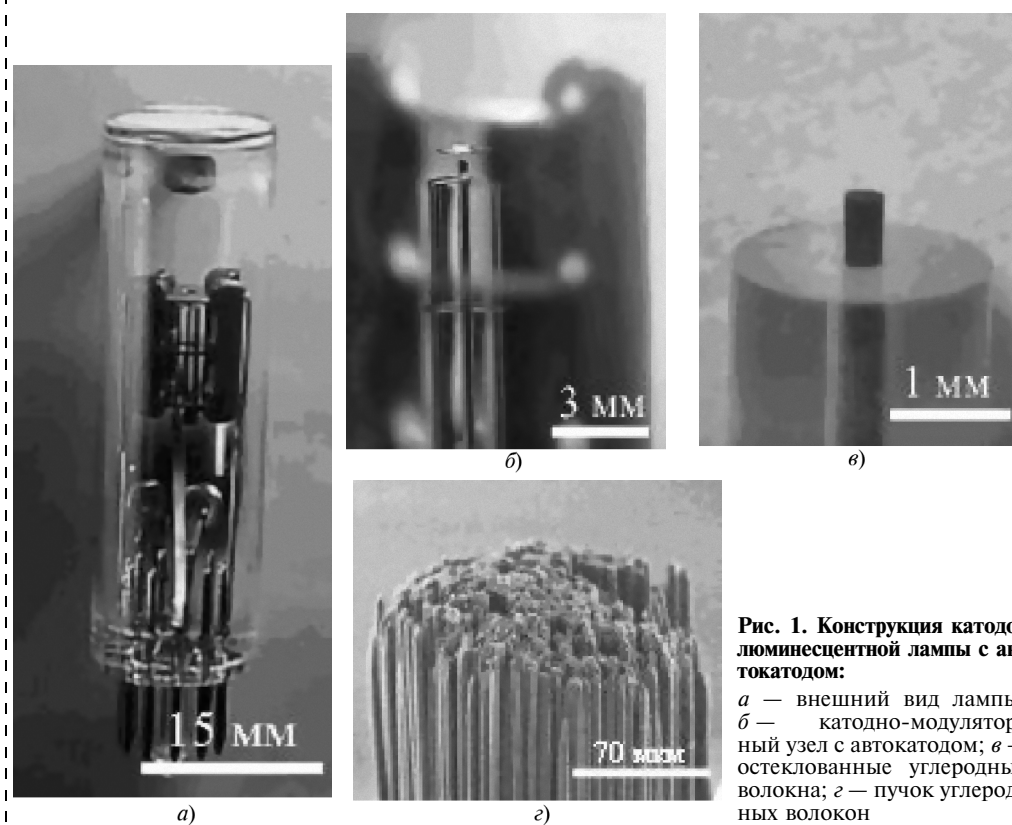


Рис. 1. Конструкция катодо-люминесцентной лампы с автокатодом:
а — внешний вид лампы;
б — катодно-модуляторный узел с автокатодом; *в* — остеклованные углеродные волокна; *г* — пучок углеродных волокон

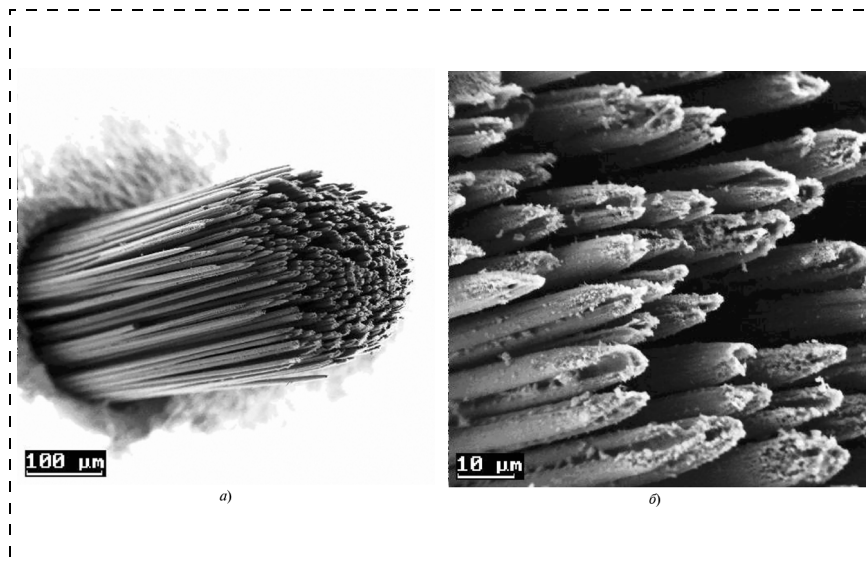


Рис. 2. Изображения остеклованных пучков углеродных волокон

капилляра вокруг него. Операция остекловки позволяет изготавливать катоды с пучком волокон, центрированным и ориентированным вдоль оси электронного прожектора при отсутствии механических нагрузок на волокна. Кроме того, стеклование пучка углеродных волокон позволило повысить вибрационную стойкость автоэлектронного катода.

Для изготовления катодолюминесцентных ламп использовалось "низкотемпературное" (~1450 °C) полиакрилонитрильное (ПАН) углеродное волокно диаметром ~7 мкм марки ЛУ-П, прошедшее дополнительную температурную обработку при 1800—1950 °C. После операции остекловки пучки волокон нарезаются на требуемую длину, от остекловки освобождается эмитирующая часть волокна и часть для создания контакта на катодный вывод прибора. Контакт между волокнами и катодным выводом выполняется "аквадагом". Для изготовления катодов были определены следующие параметры катода: число волокон в пучке и расстояние выступания волокон из остекловки.

Катодолюминесцентная лампа представляет собой триод: катод, модулятор (управляющий электрод), катодолюминесцентный анод. Модулятор используется для управления током автоэлектронной эмиссии с катода. Так как расстояние между катодом и анодом, ток катода управляется меньшими модуляторными напряжениями (< 1,5 кВ). Однако введение в систему модуляторного электрода влечет за собой появление токоперехвата на нем, что понижает эффективность электронно-оптической системы. Для выявления оптимальной конструкции лампы было проведено моделирование электронно-оптической системы лампы (рис. 3, 4). Целью проводимого моделирования является подбор геометрических параметров (D — диаметр диафрагмы управляющего электрода, L — расстояние от модулятора до люминесцентного экрана анода, H — глубина располо-

жения автоэмиссионного катода) электронного прожектора, удовлетворяющего следующим положениям:

- необходимо обеспечить практически полное прохождение тока, эмитируемого с катода, до анода (коэффициент токопрохождения $\frac{I_a}{I_k}$ 100 % должен быть более 98 %);
- необходимо практически исключить попадание электронов на вертикальную стенку внутренней поверхности стеклооболочки лампы;
- для эффективного использования автоэмиссионного тока необходимо обеспечить наиболее равномерное распределение электронного потока по внутренней поверхности экрана лампы в области с нанесенным люминофором;

- необходимо обеспечить максимальное значение управляющего напряжения (на модуляторе) на уровне менее 1500 В при силе тока катода (или анода) $I_k = 100$ мкА и анодном напряжении $U_a = 10$ кВ;
- для обеспечения высокого контраста работающей лампы необходимо также, чтобы при нулевом потенциале на модуляторе (или при небольшом положительном потенциале) отсутствовал автоэмиссионный ток ($I_a = 0$ мкА).

На рис. 4 представлены результаты моделирования электронного прожектора с оптимальным набором параметров. Оптимальные значения указанных параметров составили: $D = 4$ мм, $L = 7$ мм, $H = 1$ мм.

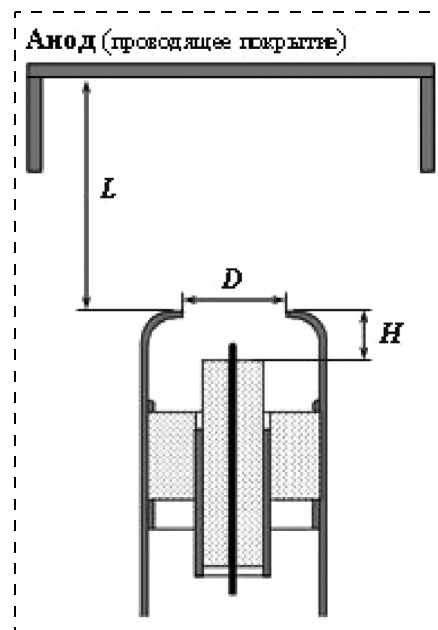


Рис. 3. Подбор геометрических параметров электронно-оптической системы лампы:

D — диаметр диафрагмы управляющего электрода (модулятора); L — расстояние от модулятора до люминесцентного экрана анода; H — глубина расположения автоэмиссионного катода

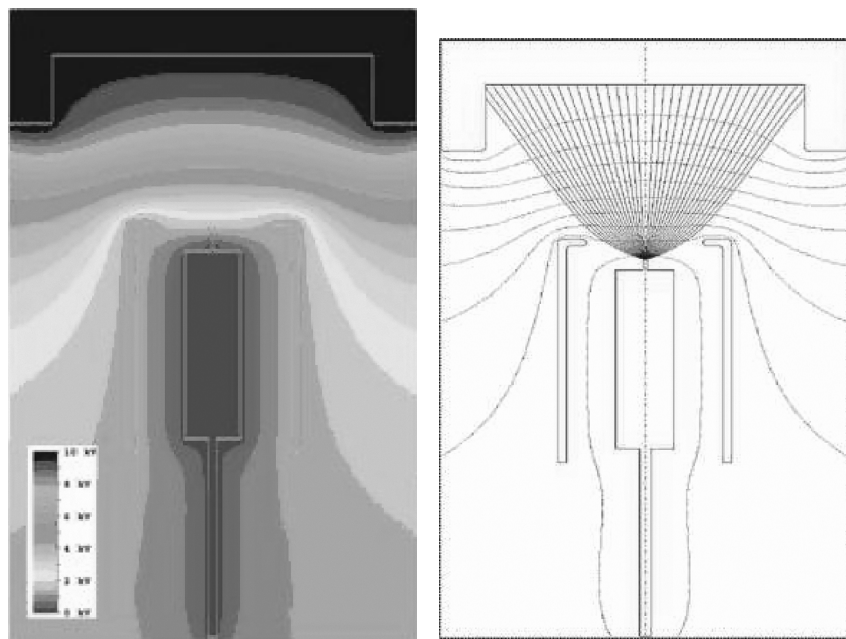


Рис. 4. Расчетная модель электронно-оптической системы нового электронного прожектора с автоэмиссионным катодом из пучка углеродных волокон ($U_a = +10$ кВ, $U_m = +1500$ В, $U_k = 0$ В):

a — расчетное распределение электрического потенциала в межэлектродном пространстве; *б* — расчетные траектории движения электронов

Полученные расчетные данные позволяют уверенно полагать, что спроектированный электронный прожектор удовлетворяет всем поставленным выше положениям (тестирование катодно-модуляторного узла, собранного по расчетным параметрам, практически подтверждает это).

Характеристики источника света

Для определения эмиссионных свойств и отработки технологии изготовления катодов было произведено более 100 катодолуминесцентных ламп триодной конструкции.

Были исследованы световые и эмиссионные характеристики опытной партии катодолуминесцентных источников света на предмет разброса параметров катодов, а также проведены проверка работы источников света в прототипе модуля видеоэкрана и анализ схемы управления.

Для исследования фотоэлектрических характеристик ламп был подготовлен специализированный измерительный стенд, с помощью которого были получены данные о спектре излучения ламп, их яркости, световой эффективности (рис. 5, 6).

Для каждой лампы из тестовой партии были сняты по четыре вольт-амперные характеристики (снималась зависимость автоэмиссионного тока катода от напряжения на модуляторе при фиксированном анодном напряжении $U_a = 7; 8; 9; 10$ кВ). На рис. 7 представлены вольт-амперные характеристики всех катодолуминесцентных ламп из тестовой партии при анодном напряжении $U_a = 10$ кВ.

Исходя из полученных экспериментальных данных по вольт-амперным характеристикам каждой катодолуминесцентной лампы (рис. 7, 8) можно отметить несколько моментов.

Во-первых, вольтамперные характеристики всех светоизлучающих пальчиковых ламп из тестовой партии (рис. 7) лежат в области управляющих напряжений

$$U_m [I_{k \max} = 100 \text{ мкА}] < 1500 \text{ В.}$$

Во-вторых, вольт-амперные характеристики катодолуминесцентных ламп не смещены в область отрицательных управляющих напряжений, а наоборот, при некотором положительном потенциале на модуляторе автоэмиссионный ток еще практически отсутствует: $U_m [I_{k \min} < 0,5 \text{ мкА}] > 500 \text{ В.}$

В-третьих, очевидно, что существует заметный разброс по управляющим напряжениям модулятора $\Delta U_m [I_{k \max} = 100 \text{ мкА}] \sim 300\text{--}400 \text{ В.}$ Видимо, такой разброс характеристик связан с комплексом технических причин:

- неточностью установки катода в держатель;
- неточностью выставления расстояния модулятор—анод в процессе запайки вакуумной оболочки лампы;
- небольшим разбросом длин пучков углеродных волокон;

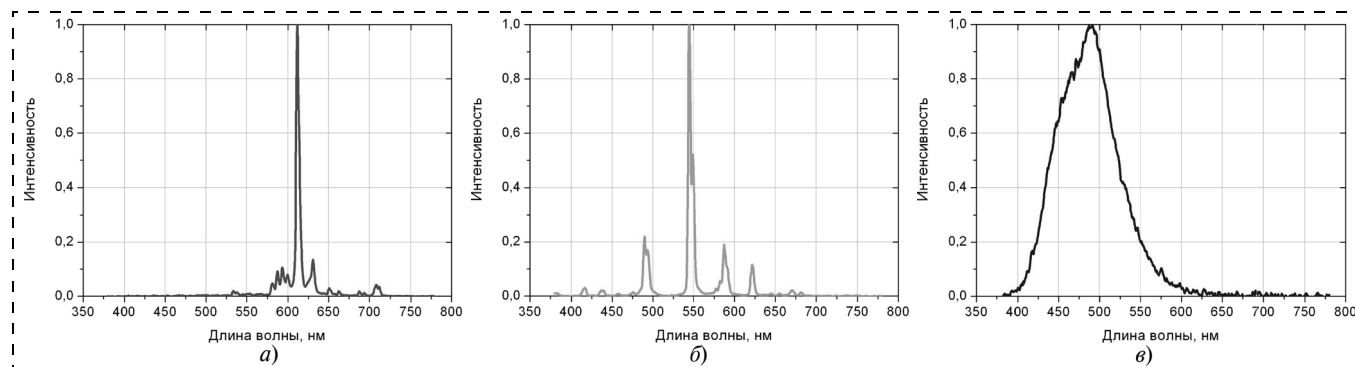


Рис. 5. Спектр излучения лампы:

a — красного цвета; *б* — зеленого цвета; *в* — синего цвета

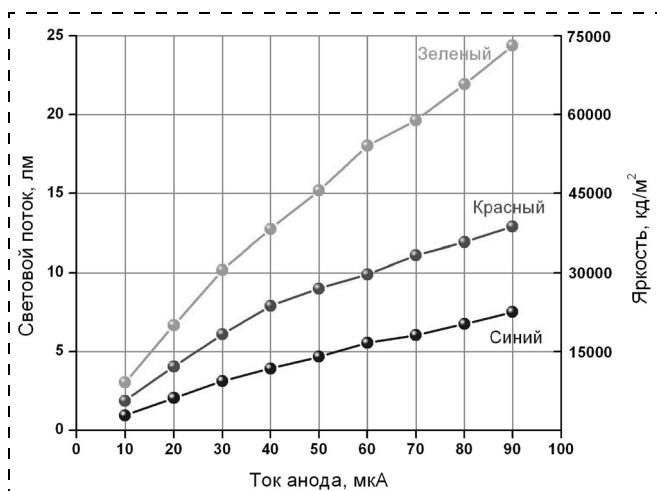


Рис. 6. Зависимость яркости излучения и светового потока пальчиковой лампы от силы автоэмиссионного тока

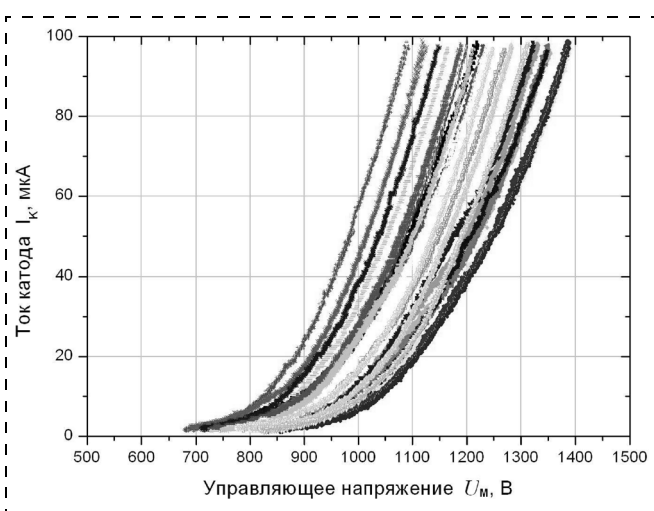


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики лампы из тестовой партии. Зависимость автоэмиссионного тока I_k катода от напряжения на управляющем электроде U_m при напряжении на аноде $U_a = 10$ кВ

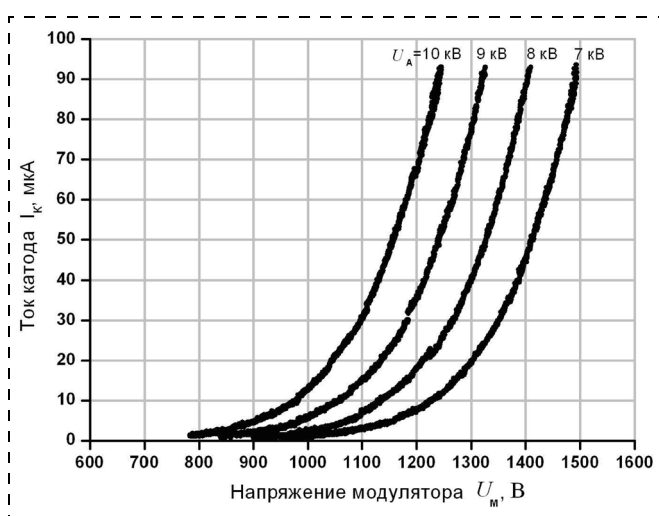


Рис. 8. Типичная вольт-амперная характеристика лампы с новым КМУ из тестовой партии. Зависимость автоэмиссионного тока I_k катода от напряжения на управляющем электроде U_m при фиксированных напряжениях на аноде $U_a = 7; 8; 9; 10$ кВ

- различным числом волокон в пучке для каждой лампы.

Полученные результаты по электрическим характеристикам тестовой партии ламп дают возможность создания простой схемы управления катодолуминесцентной пальчиковой лампой с автоэмиссионным катодом из пучка углеродных волокон.

Перспективные области применения источников света с автокатодом

Катодолуминесцентный источник света позволяет получить излучение видимого диапазона, спектральный состав которого благоприятен для визуального восприятия и не вызывает такой утомляемости человеческих глаз, как большинство известных источников света. В катодолуминесцентных излучателях отсутствуют неблагоприятное и вредное инфракрасное и ультрафиолетовое излучения.

Свет от катодолуминесцентных источников света можно получить диффузным или направленным в необходимый телесный угол для таких специальных применений, как видеоэкраны коллективного пользования.

Катодолуминесцентные лампы с автокатодом в своем составе не имеют ядовитых материалов и газов, вредных для здоровья человека. Для таких источников света не существует проблемы производства и утилизации вышедших из строя ламп, связанной с вредным производством и загрязнением окружающей среды, как они существуют при производстве, например, люминесцентных ламп, в которых имеются пары ртути.

Спектр использования катодолуминесцентных источников света широк:

- осветительные лампы;
- элементы подсветки ЖК-дисплеев;
- плоские автоэмиссионные экраны (FED);
- пиксели больших видеоэкранов коллективного пользования;
- светофоры;
- семафоры;
- источники резервного освещения;
- сигналы спасения на воде и в горах;
- любые источники света высокой яркости с возможностью подбора спектра излучения.

Примеры экспериментальных приборов приведены на рис. 9 (см. четвертую сторону обложки).

Заключение

Применение источников света с автокатодом из углеродных волокон в качестве различных светоизлучающих приборов оправдано преимуществами автоэмиссии. Исследование разброса характеристик источников света показало возможность построения схемы управления с использованием существующих высоковольтных транзисторов. Разработанные катодолуминесцентные источники света имеют широкий диапазон рабочих температур от -200 до $+150$ °С, их яркость составляет 10^4 кд/м², что не хуже современных аналогов, угол обзора более 120° , скорость включения/выключения пикселей менее 0,2 мс. Отсутствие греющихся частей, работа на малых токах

(менее 100 мкА на элемент) и достаточно длительный срок службы (более 10 000 ч) делает их конкурентоспособными и по сравнению с лучшими аналогами среди источников света — светодиодами, лампами накаливания, газоразрядными.

Список литературы

1. Itoh S. and Tanaka M. Current status of field — emission display // Proc. of IEEE. April 2002. V. 90. № 4. P. 514.
2. Field emission lighting element presented by SI Diamond Technology // SID International Exhibition. 1997.
3. Baker F. S., Osborn A. R., Williams J. The carbon-fibre field emitter // J. Phys. D: Appl. Phys. 1974. V. 7. P. 2105.
4. Baker F. S., Osborn A. R., Williams J. Field emission from carbon fibers: A New Electron Source // Nature. 1972. V. 239. № 8. P. 96.
5. Colin Lea. Field emission from carbon fibres // J. Phys. D: Appl. Phys. 1973. V. 6. P. 1105—1114.

6. Braun E., Smith J. F. and Sykest D. E. Carbon fibers as field emitters // Vacuum. 1975. V. 25. № 9/10. P. 425.
7. Mousa M. S. Electron emission from carbon fibers tips // Appl. Surf. Sci. 1996. V. 94/95. P. 129—130.
8. Бондаренко Б. В., Макуха В. И., Шешин Е. П. Стабильность и долговечность некоторых вариантов автокатодов. // Радиотехника и электроника. 1983. Т. XXVIII. № 8. С. 1649—1652.
9. Forbes R. G., Braun E., Smith J. F. and Sykes D. E. // Proc. 20th Field Emission Symp. Penn. State Univ. 1973. P. 37.
10. Latham R. V. and Salim M. A. // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1986. V. 20. P. 181—188.
11. Latham R. V. and Wilson D. A. // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1982. V. 15. P. 1083—1092.
12. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Физматкнига. 2001. С. 287.
13. Baturin A. S., Eskin I. N., Trufanov A. I. et al. Electron gun with field emission cathode of carbon fiber bundle // J. Vac. Sci. Technol. 2003. V. B21. № 1. P. 354—357.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.382:537.525

С. А. Жукова, канд. техн. наук, Д. Ю. Обижаев,
А. А. Жуков, д-р техн. наук,
П. Г. Бабаевский, д-р техн. наук,
"МАТИ" — Российский государственный
технологический университет
им. К. Э. Циолковского
E-mail: svetlzhukova@yandex.ru

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ПОЛИИМИДНЫХ "ЖЕРТВЕННЫХ" СЛОЕВ В НАНО- И МИКРОРАЗМЕРНЫХ ЗАЗОРАХ

Исследованы кинетика и механизм плазмохимического травления полиимидных "жертвенных" слоев в микро- и наноразмерных зазорах с заданной топологией функционального слоя (отверстий различного диаметра и балочной топологии) в сравнении со свободными поверхностями полиимидных покрытий. Получены и обсуждены экспериментальные данные о зависимости средней скорости травления и глубины вытравленного полиимидного слоя от режимов травления и толщины "жертвенного" слоя при различной топологии функционального слоя, а также о составе осаждаемых продуктов травления. Полученные результаты могут быть использованы при разработке конструктивно-технологических вариантов исполнения элементов устройств нано- и микросистемной техники методами поверхностной микрообработки с использованием полиимидных "жертвенных" слоев.

Введение

Развитие микро- и наносистемной техники, в частности, нано- и микроэлектромеханических систем, содержащих элементы конструкций с заданным зазо-

ром (микрофазовращателей, балочных и мембранных резонаторов, микропереключателей), требует решения задач миниатюризации конструкций и оптимизации технологических режимов их изготовления групповыми методами [1]. Уменьшение зазоров в таких конструкциях от десятков микрометров до нескольких нанометров в ряде случаев позволяет значительно снизить энергопотребление и массогабаритные характеристики устройств, а также обеспечить их дополнительные функциональные возможности. Формирование таких зазоров часто осуществляется групповыми методами поверхностной микрообработки, основанными на использовании "жертвенных" слоев, которые служат опорой при формировании функциональных слоев и элементов из них и удаляются на конечных стадиях технологического процесса. В качестве "жертвенного" слоя часто в качестве покрытия используют полиимид (ПИ), технологичность и термостойкость которого обеспечивают возможность получения и обработки как "жертвенного", так и функционального слоев различными методами при достаточно высокой скорости плазмохимического ("сухого") травления "жертвенного" слоя [1, 2]. Очевидно, что механизм и скорость травления и, соответственно, предельное значение вытравливаемого ПИ из зазора между подложкой и функциональным слоем при любом методе и режиме травления, помимо природы ПИ, должно определяться толщиной "жертвенного" слоя и топологией функционального слоя. В данной статье на примере нано- и микроразмерных слоев ПИ (толщиной от 15 нм до 15 мкм), нанесенных на кремниевую подложку и покрытых функциональным слоем заданной толщины (0,10—0,12 мкм) на основе нитрида кремния, приведены результаты исследования влияния толщины ПИ-"жертвенного" слоя на кинетику, предельную глубину и состав продуктов его травления при различной топологии функционального слоя. Для сравнения исследовали кинетику и состав продуктов

травления свободной поверхности ПИ-покрытия, нанесенного на кремниевую подложку.

Образцы и методы исследований

Образцами для исследований служили плоские структуры в виде последовательно сформированных на кремниевой подложке "жертвенного" и функционального слоев на основе ПИ и нитрида кремния соответственно, а также свободные ПИ-слои (покрытия) на кремниевых подложках. Технология получения образцов схематически изображена на рис. 1, а. ПИ-слои толщиной от 15 нм до 15 мкм получали на предварительно обработанных в перекисно-аммиачном растворе кремниевых подложках с использованием растворов полиамидокислоты на основе пиромеллитового диангидрида и оксидианилина различной концентрации методами центрифугирования и двухстадийной термоимидизации по режимам, подробно изложенным в работе [2]. Слои нитрида кремния наносили плазмохимическим осаждением из газовой фазы. В слое нитрида кремния методами литографии и плазмохимического травления формировали топологический рисунок с элементами различной формы и геометрических размеров: удлиненных прямоугольных (балочных, или кантилеверных) элементов и круглых отверстий с шириной и диаметром соответственно от 150 нм до нескольких десятков микрон. Образцы с балочной топологией функционального покрытия использовали для моделирования процессов плазмохимического вы-

травливания "жертвенного" слоя из зазора под плоскими элементами конструкций различной ширины и с различным расстоянием между ними, с круглыми отверстиями в сплошном функциональном покрытии — для моделирования процессов плазмохимического вытравливания "жертвенного" слоя из технологических отверстий, а без функционального покрытия — травления со свободных поверхностей.

Плазмохимическое травление ПИ-"жертвенных" слоев и покрытий осуществляли обработкой образцов в ВЧ-плазме воздуха на установке плазмохимического травления объемного типа при различной продолжительности процесса (15–120 мин), мощности разряда (100–600 Вт) и давлении (10–80 Па). Температуру в реакторе определяли с помощью термокрасок — полимерных композиций, изменяющих цвет (из-за фазового перехода) при определенной температуре. Скорость травления ПИ-"жертвенных" слоев и покрытий оценивали по объему удаленного травлением ПИ за заданный временной интервал. Объем удаленного "жертвенного" слоя из зазора при заданной его толщине рассчитывали по измеренной длине и выбранной ширине вытравленного зазора между подложкой и функциональным слоем. Объем удаленного ПИ при травлении свободной поверхности рассчитывали по измеренному значению утонения покрытия на площади в один квадратный микрон. Геометрические характеристики структур, длину вытравленных зазоров и толщину слоев измеряли с помощью оптического микроскопа со встроенным микроинтерферометром Axioskop 2 фирмы "Carl Zeiss". Микрофотография балочной структуры с частично вытравленным "жертвенным" слоем на начальной стадии травления, полученная с помощью такого микроскопа, показана на рис. 1, б. Толщину слоев нанометрового диапазона оценивали с помощью профилографа-профилометра Talystep.

Состав продуктов травления ПИ-"жертвенных" слоев и поверхности покрытий, осажденных на пластины из иодида калия, анализировали методами ИК-спектроскопии и электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА). ИК-спектры поглощения определяли с помощью спектрофотометра Specord M80 в частотном диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$, а спектры ЭСХА — с использованием рентгеновского фотоэлектронного спектрометра Riber SIA-100 с анализатором MAC-2 (MgK_α , 100 Вт, 15 кВ, 20 мА). Положение пиков (энергии связи) на спектрах ЭСХА калибровали по стандартному пику C_{1s} (284,6 эВ).

Результаты и их обсуждение

Предварительные исследования показали резкое различие в величине и характере зависимостей скоростей травления ПИ-"жертвенных" слоев из зазоров и свободных поверхностей ПИ-покрытий от продолжительности процесса и установившейся температуры в установке при практически аналогичной зависимости скоростей травления от варьируемых параметров режима — мощности разряда и давления. При увеличении мощности разряда скорость травления во всех случаях возрастает, а при увеличении давления наблюдается некоторый максимум в

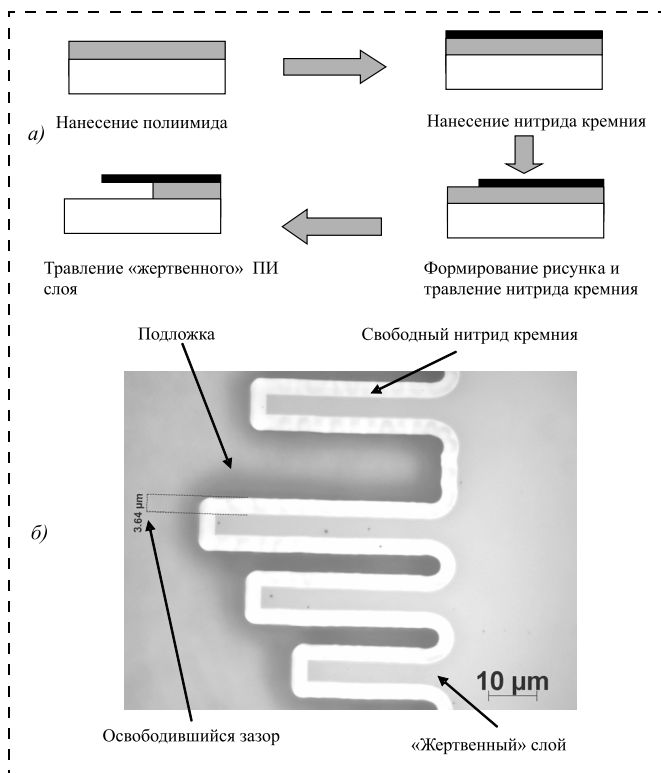


Рис. 1. Схемы получения ПИ-покрытия и "жертвенного" слоя, нанесения и формирования топологического рисунка функционального слоя и травления "жертвенного" слоя (а) и микрофотография структуры с частично вытравленным "жертвенным" слоем на начальной стадии травления (б)

области 50–60 Па. Экстремальный характер зависимости скорости травления от давления, проявляющийся тем более резко, чем больше мощность разряда, очевидно, связан с ростом числа активных частиц плазмы при увеличении давления в реакторе до 50–60 Па и с увеличением числа частиц, не подвергнутых ионизации и не участвующих в процессе травления из-за недостаточной энергии, при более высоком давлении. В дальнейших исследованиях травление проводили при давлении порядка 50–60 Па и максимальной мощности разряда (порядка 600 Вт).

В зависимости от режима травления и толщины "жертвенного" слоя максимальная скорость травления из зазора для слоев толщиной порядка единиц микрон значительно превосходит (вплоть до десятичного порядка) скорость травления со свободной поверхности, а для слоев толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров наблюдается противоположная картина: скорость травления гораздо меньше скорости травления свободной поверхности ПИ.

На рис. 2, а приведены зависимости температуры в установке для травления и скоростей травления ПИ со свободной поверхности и из зазора высотой 50 нм при балочной топологии функционального слоя от продолжительности процесса при давлении 60 Па и мощности разряда 600 Вт. Как было показано нами ранее в работе [2] и как следует из кривых 1, 4 на рис. 2, а, скорость травления ПИ со свобод-

ной поверхности покрытия четко коррелирует с температурой в установке: после достижения установившейся температуры достигается установившаяся скорость травления, которая зависит только от мощности плазмы и давления. В приведенном на рис. 2, а примере такая скорость порядка $0,07 \text{ мкм}^3/\text{мин}$ достигается при продолжительности процесса более 25 мин и установившейся температуре в установке порядка 493 К. Скорость травления ПИ из зазора при заданных режимах и толщине "жертвенного" слоя 50 нм после достижения постоянной температуры в установке проходит через резко выраженный максимум, достигая предельного значения порядка $0,025 \text{ мкм}^3/\text{мин}$ на 60-й минуте и спадая практически до нуля после 120 мин травления (кривая 2, рис. 2, а). С увеличением толщины "жертвенного" слоя время достижения максимальной скорости ($t_{\max}$) и ее спада до нуля, т. е. практически полного прекращения вытравливания (t_{∞}), а также ширина пика увеличиваются. Так, для слоев толщиной 150 нм предельная скорость травления (около $0,1 \text{ мкм}^3/\text{мин}$) достигается примерно на 115-й минуте (кривая 3, рис. 2, а). Зависимости $t_{\max}$ и t_{∞} от толщины "жертвенного" слоя для слоев толщиной до 150 нм представлены на рис. 2, б (кривые 1, 2).

Резко выраженный экстремальный характер зависимости скорости травления ПИ из зазора от продолжительности процесса и существенно отличающееся ее значение в максимуме от установившейся скорости травления со свободной поверхности вероятно всего обусловлено двумя противоположно влияющими на скорость травления эффектами:

- более резким повышением температуры в зазоре по сравнению с температурой в установке и на свободной поверхности покрытия вследствие более резко выраженных экзотермических эффектов реакций и физического воздействия частиц плазмы на полимер в зазоре и затруднения теплоотвода из него [4, 5];
- затруднениями в массопереносе реагентов и продуктов реакций плазмохимического травления в зазоре при увеличении его глубины.

Подтверждением того, что на скорость и, соответственно, на предельную глубину плазмохимического вытравливания ПИ-"жертвенного" слоя из зазора между подложкой и функциональным слоем решающее влияние, при прочих равных условиях, оказывают процессы тепло- и массопереноса в образующемся зазоре, т. е. возможности подвода реагентов и отвода тепла и продуктов травления из него являются установленные нами зависимости предельной длины вытравленного ПИ-слоя при различной длительности процесса от диаметра отверстия в сплошном функциональном слое, а также от толщины "жертвенного" слоя при балочной топологии функционального слоя.

В экспериментах с варьированием диаметра технологических отверстий использовали "жертвенные" слои толщиной, превышающей в 2–3 раза диаметр отверстий, чтобы предотвратить влияние освобождаемой подложки на геометрию формируемого зазора в процессе травления ПИ. Микрофотографии образцов при травлении "жертвенного" слоя представлены на рис. 3, а. Полученные зависимости предель-

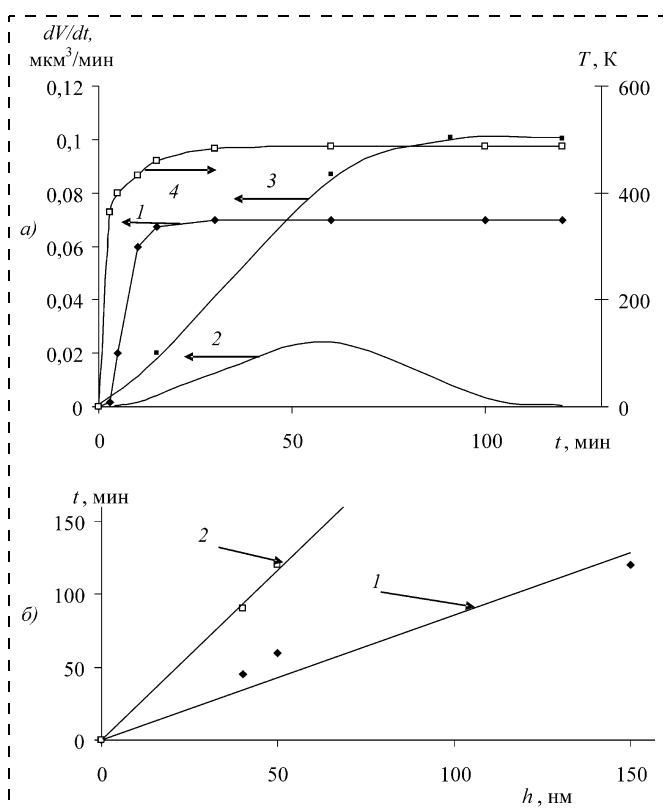


Рис. 2. Зависимости скорости травления (а) (dV/dt) свободной поверхности ПИ-покрытия (1) и "жертвенного" слоя толщиной 50 нм (2) и 150 нм (3), а также температуры (Т) в реакторе (4) от продолжительности процесса (t); зависимости $t_{\max}$ (1) и t_{∞} (2) от толщины "жертвенного" слоя (б)

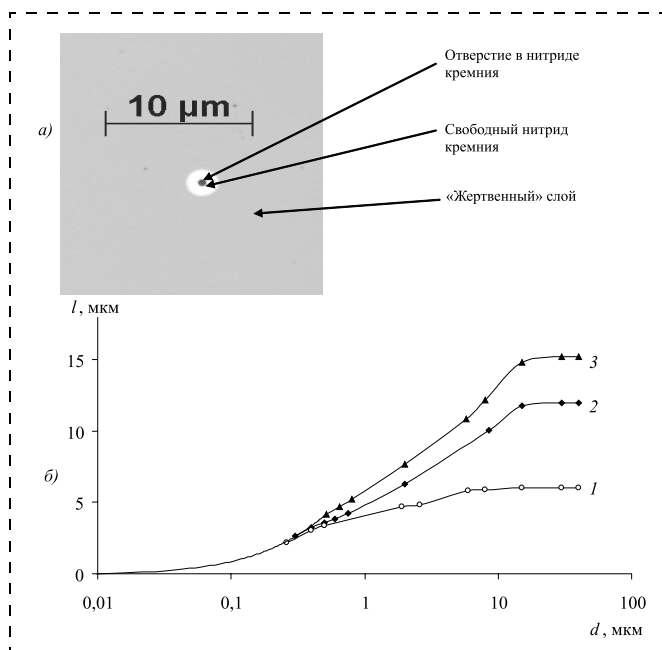


Рис. 3. Микрофотография структуры с технологическими отверстиями (а) и длина (l) освобожденного травлением зазора в зависимости от диаметра (d) отверстий в нитриде кремния (б) при различной продолжительности процесса (в минутах): 20 (1), 40 (2), 50 (3)

ной длины вытравленного слоя от диаметра отверстия для толщины "жертвенного" слоя толщиной 20 мкм при мощности разряда 600 Вт и давлении 60 Па представлены на рис. 3, б. При диаметре отверстий до 10 мкм, особенно в интервале от 1 мкм до 10 мкм длина предельно вытравленного "жертвенного" слоя резко возрастает с увеличением диаметра отверстий, что может быть связано с облегчением тепло- и массообмена с увеличением диаметра [4]. При диаметре отверстий больше 10 мкм предельная длина вытравленного "жертвенного" слоя практически не зависит от диаметра и при заданных толщине слоя и режимах травления определяется только продолжительностью процесса. Полученные результаты имеют важное практическое значение, поскольку в тех случаях, когда конструкции исполнительных элементов устройств микро- и наносистемной техники содержат зазоры малой толщины при относительно больших их геометрических размерах в плоскости подложки, одним из путей обеспечения полного вытравливания ПИ-"жертвенного" слоя из глубокого зазора может быть формирование в функциональном слое технологических отверстий оптимального диаметра.

В экспериментах по варьированию толщины "жертвенного" слоя использовали топологию балочных структур с большим расстоянием между балочными элементами, что позволяло предотвратить влияние соседних структур на процессы вытравливания. На рис. 4 представлены зависимости предельной длины вытравленного зазора от толщины ПИ-слоя, полученные при различной продолжительности процесса, мощности разряда 600 Вт и давлении 60 Па. На приведенных кривых можно выделить три участ-

ка с различным характером зависимости предельной длины вытравленного зазора от толщины слоев ПИ (участки А—В на рис. 4). Для толщин "жертвенных" слоев, лежащих в диапазоне от нескольких нанометров до примерно 0,6 мкм, с увеличением толщины слоев наблюдается резкое возрастание длины вытравленного слоя (участок А на кривых рис. 4) и достижение его предельного значения, определяемого длительностью травления. Для толщин "жертвенных" слоев от 0,6 мкм до 10 мкм (участок Б на кривых рис. 4) длины вытравленных слоев плавно уменьшаются, достигая при толщине "жертвенного" слоя больше 10 мкм предельных значений, соответствующих травлению ПИ-покрытий с открытой поверхности [2] для соответствующей длительности травления (участок В на кривых рис. 4). При большой длительности травления $t \geq t_{\max}$ (кривые 2—4 на рис. 4), обеспечивающей достижение и сохранение достаточно высокой скорости травления, такой характер зависимости проявляется особенно резко. При малой длительности травления (кривая 1 на рис. 4), когда эффективная скорость травления очень мала ($t < t_{\max}$), зависимость длины вытравленного "жертвенного" слоя от его толщины проявляется слабо.

Очевидно, что такой характер зависимостей длины вытравленного ПИ-"жертвенного" слоя от его толщины можно объяснить изменением условий теплообмена и массопереноса в "жертвенном" слое с изменением его толщины. При этом механизм и кинетика травления "жертвенных" слоев толщиной более 10 мкм при большой продолжительности процесса достаточно близки к травлению свободных поверхностей ПИ-покрытий, когда основную роль начинают играть параметры процесса и характеристики плазмы.

Представленные на рис. 5, а ИК-спектры, а на рис. 5, б спектры ЭСХА осажденных на твердой поверхности продуктов травления ПИ-"жертвенных" слоев и свободных поверхностей покрытий свидетельствуют о том, что помимо легко летучих продуктов травления [5] в результате воздействия плазмы на ПИ образуются также более высокомолекуляр-

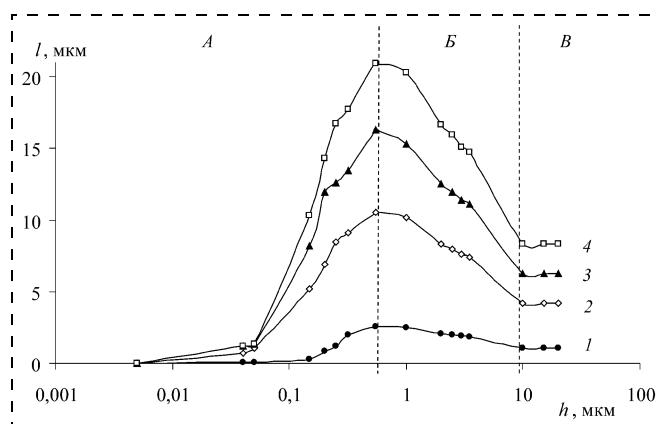


Рис. 4. Длина (l) освобожденного травлением зазора в балочной топологии функционального слоя от толщины (h) ПИ-"жертвенного" слоя различной продолжительности процесса (в минутах): 15 (1), 60 (2), 90 (3), 120 (4)

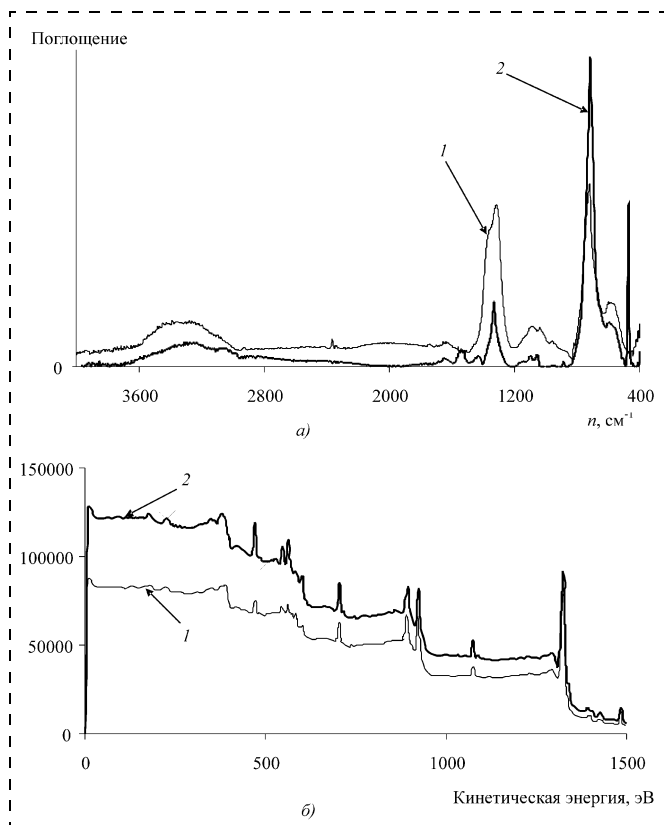


Рис. 5. ИК-спектры поглощения (а) и спектры ЭСХА (б) продуктов травления ПИ-"жертвенного" слоя (1) и открытой поверхности (2)

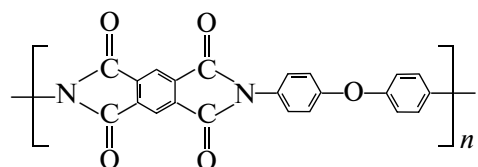
ные, мало летучие продукты, представляющие собой органические соединения сложного состава, содержащие ароматические кольца, фрагменты имидных циклов (связи $C=O$) и другие группы, содержащие углерод, азот, кислород и водород. Такие соединения, полученные при травлении ПИ-"жертвенных" слоев и свободных поверхностей покрытий, отличаются друг от друга по составу и структуре.

Анализ ИК-спектров продуктов травления (рис. 5, а) показывает, что полосы поглощения, соответствующие кремнийсодержащим группам, в спектрах отсутствуют, что свидетельствует об отсутствии заметного распыления функционального слоя балочных структур в процессе травления "жертвенного" слоя и, как следствие, изменения высоты формируемого зазора за счет утонения слоя нитрида кремния. Как для продуктов травления свободной поверхности, так и для "жертвенных" слоев характерно отсутствие полос поглощения 1252 см^{-1} и 1380 см^{-1} , имеющихся в спектре исходного полиимидомеллитидида [6, 8] и относящихся к наличию в образцах эфирной связи $R-O-R$ и связи $C-N$ соответственно. Это свидетельствует о полном распаде этих связей в процессе плазмохимического травления. Наряду с этим в составе осаждаемых продуктов травления как для свободной поверхности, так и для "жертвенных" слоев имеются полосы поглощения, характерные для связей $C=O$ в имидных циклах, $C-N$ бензольного кольца и самого кольца (717 , $1000-1100$, 1415 см^{-1} соответственно), а также связей $C=O$ и

$C-NH$ в амидной группе $CONH$ ($1616-1623\text{ см}^{-1}$ соответственно), которые имеются также и в исходных ПИ. Симметричные колебания связи $C=O$ имидного цикла также проявляются на спектрах осаждаемых продуктов травления повышением интенсивности поглощения при частоте 1720 см^{-1} , однако более слабо, чем в исходном ПИ. При сравнении продуктов травления "жертвенных" слоев и свободных поверхностей ПИ-покрытий оказалось, что во втором случае (кривая 2 на рис. 5, а) в спектре имеется полоса поглощения на частоте $1515-1520\text{ см}^{-1}$, по-видимому, относящаяся к асимметричным колебаниям связи $N-O$ в нитропроизводном или $C-N$ в ароматическом кольце (что маловероятно, поскольку отсутствует полоса поглощения 1380 см^{-1}). В продуктах травления "жертвенных" слоев полосы поглощения в области $1515-1520\text{ см}^{-1}$ отсутствуют.

Анализ спектров ЭСХА осаждаемых продуктов травления ПИ-"жертвенных" слоев также показывает, что следов атомов кремния в продуктах травления не обнаружено. Сравнение спектров ЭСХА осаждаемых продуктов (кривые 1 и 2 на рис. 5, б) показывает, что относительное содержание атомов кислорода и азота в образующихся продуктах травления "жертвенного" слоя существенно больше, чем при травлении открытой поверхности ПИ-покрытия. Если энергию связи, соответствующую $404,3\text{ эВ}$, отнести к азоту, $282,1\text{ эВ}$ — к углероду, а $529,6\text{ эВ}$ — к кислороду [7], состав осаждаемых продуктов травления ПИ-"жертвенных" слоев на 100 атомов углерода можно представить формулой $C_{100}O_{15}N_{23}$, а свободной поверхности ПИ-покрытий — $C_{100}O_{11}N_{11}$.

Таким образом, при взаимодействии исходного ПИ, имеющего структурную формулу



с компонентами плазмы воздуха происходит полная деструкция эфирной связи $R-O-R$ и имидного цикла. Продукты травления содержат в своей структуре преимущественно бензольные кольца и $C=O$ связи. Азот присутствует в составе групп $CONH$ и $C-NH$, а в продуктах травления свободной поверхности ПИ еще и в группах $N-O$, которые, по-видимому, деструктируют в случае более интенсивных режимов травления "жертвенных" слоев.

Полученные данные свидетельствуют о существенном различии не только в кинетике, но и в механизме деструктивных процессов, протекающих при травлении ПИ в тонких "жертвенных" слоях и травлении свободной поверхности.

Выводы

Показано, что влияние технологических режимов (мощности разряда и давления) на скорость плазмохимического травления ПИ-"жертвенных" слоев и свободной поверхности ПИ-покрытий имеет идентичный характер, однако зависимости скорости травления от длительности процесса при различных

топологии функционального покрытия, толщине слоев и диаметре отверстий в "жертвенных" слоях, а также механизм реакций, протекающих при травлении "жертвенных" слоев и свободной поверхности ПИ, резко различаются. Отличия в скоростях травления ПИ-"жертвенных" слоев в тонком зазоре по сравнению со свободными поверхностями покрытий на определенном этапе объясняются различиями в протекающих при этом процессах тепло- и массопереноса, обуславливающих повышение температуры в зазоре, усиление активности реагентов травления и конвективного переноса компонентов плазмы и продуктов реакции.

О различии механизмов реакций травления ПИ-"жертвенных" слоев и свободных поверхностей ПИ-покрытий свидетельствует образование продуктов реакции с повышенным содержанием азота и кислорода при травлении ПИ-"жертвенных" слоев. Установленные зависимости скорости травления и максимально возможной длины освободившегося зазора от диаметра отверстий в непрерывном функциональном слое, формируемых для доступа компонентов плазмы к ПИ-"жертвенному" слою, и от толщины этого слоя при балочной топологии функционального слоя и заданных режимах травления могут быть использованы при разработке конструктивно-технологиче-

ских вариантов исполнения элементов устройств микро- и наносистемной техники методами поверхностной микрообработки с использованием ПИ-"жертвенных" слоев.

Список литературы

1. Вардан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера. 2004.
2. Жуков А. А., Жукова С. А., Корнеева Г. А., Четверов Ю. С. Влияние плазмохимического травления на свойства тонких полиимидных покрытий различного химического состава и молекулярной массы // Прикладная физика. 2004. № 2. С. 53—59.
3. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. С. 105—107.
4. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума: Пер. с англ. М.: Мир. 1988.
5. Словецкий Д. И. Механизмы плазмохимического травления материалов. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Кн. III / Под. ред. В. Е. Фортова. М.: Наука. 2000. С. 346.
6. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.
7. Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. В. Бриггса и М. П. Сиха: М.: Мир, 1987.
8. Polyimides: Fundamental and applications / Ed. M. Ghosh, K. Mittal. Marcel Decker Inc., New York, Basel, Hong Kong, 1996.

УДК 535.343.2, 539.23

Т. П. Мясникова, канд. физ.-мат. наук, доц.,
В. А. Алешин, **С. Г. Гах**, **И. Н. Захарченко**,
канд. физ.-мат. наук, **С. В. Толстоусов**, канд.
физ.-мат. наук, **Э. Н. Мясников**, д-р физ.-мат. наук,
Южный федеральный университет,
г. Ростов-на-Дону
E-mail: myasnik@phys.rsu.ru

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПЛЕНОК (Ba_xSr_{1-x})TiO₃ НА MgO И Si ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

Исследованы оптические спектры тонких пленок $Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO_3/MgO$ и $Ba_{0,85}Sr_{0,15}TiO_3/Si$. Обнаружены особенности в области 80, 140 и 190 °С. Существенные различия, обнаруженные в спектрах на $Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO_3/MgO$ и $Ba_{0,85}Sr_{0,15}TiO_3/Si$ в ближней ИК-области спектра, обусловлены, вероятно, различием структур этих пленок на наноровне вследствие различий в эпитаксии. Широкая полоса с максимумом на 0,68 эВ в спектре фотоиндуцированного ИК-поглощения пленок $Ba_{0,85}Sr_{0,15}TiO_3/MgO$ обусловлена фотодиссоциацией поляронов большого радиуса.

Гетероэпитаксиальные пленки (BaSr)TiO₃ были получены ВЧ-катодным распылением в атмосфере кислорода при давлении 200 Па на сколах (001) монокристаллов MgO и подложках из монокристаллов кремния. Такие пленки имеют размытый максимум диэлектрической проницаемости, по которому труд-

но определить температуру фазового перехода (ФП) из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу [1—3]. Исследование оптических спектров сегнетоэлектриков, таких как BaTiO₃, CdTiO₃ [4, 5] и релаксора магнониобата свинца [6], показало себя как чувствительный метод для определения ФП. В настоящей работе в широком интервале температур исследованы спектры оптического поглощения и люминесценции пленки $Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO_3$ на сколе монокристаллов MgO (001) толщиной 1 мкм и пленки $Ba_{0,85}Sr_{0,15}TiO_3$ на кристаллическом кремнии толщиной 250 нм для определения температур ФП.

Спектры поглощения, как и в [4—6], снимались на спектрофотометре СФ-14 в видимой области спектра (400—750 нм) и на инфракрасном спектрофотометре ИКС-14А в ближней инфракрасной области (ИК) (3800—14 200 см⁻¹) при температурах от 20 до 200 °С. Температура регулировалась терморегулятором ВРТ-3 с точностью 0,1 °С. Спектры люминесценции получены на дифракционном спектрофотометре ДФС-12. В качестве источника возбуждения использовалась ртутная лампа СВД-120 с фильтрами УФС-3, выделяющим ультрафиолетовую область, и ЖС-3, убирающим возбуждающую линию.

В видимой области спектра пленки $Ba_{0,85}Sr_{0,15}TiO_3/MgO$ толщиной 1 мкм наблюдалась полоса поглощения с длиной волны максимума поглощения 400 нм. Для длинноволнового края этой полосы поглощения выполняется правило Урбаха, а коэффициент поглощения в максимуме ее увеличивается с повышением температуры.

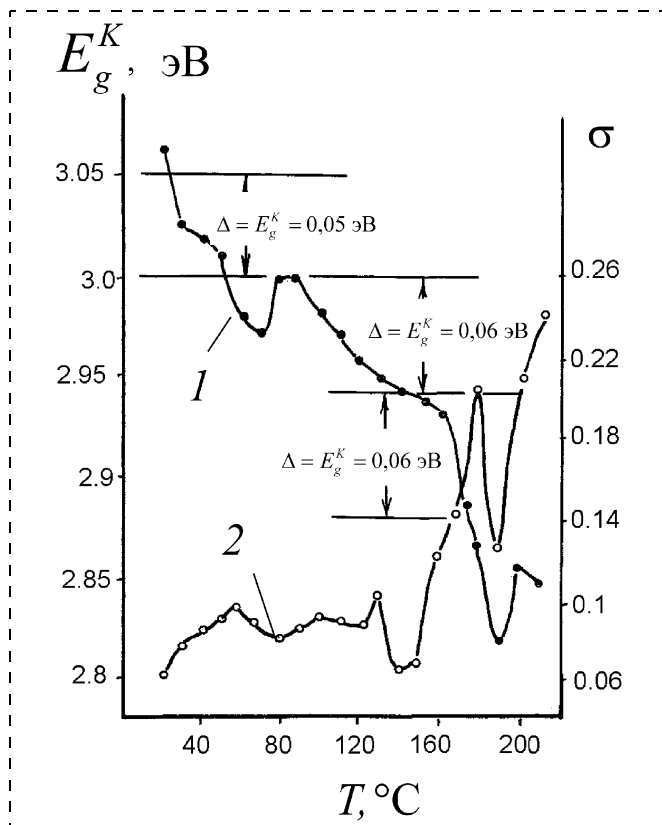


Рис. 1. Температурная зависимость энергетического положения длинноволновой части полосы поглощения E_g^K при $\ln K = 8,8$ (кривая 1) и параметра правила Урбаха σ (кривая 2) для пленки $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3/\text{MgO}$

На рис. 1 видно, что параметр правила Урбаха σ , характеризующий наклон прямолинейной зависимости $\ln K(h\omega)$ в цикле нагревания и охлаждения, имеет минимумы при 80, 140 и 190 °С. Энергетическое положение края поглощения при постоянном коэффициенте поглощения $\ln K = 8,8$ в области 80 °С уменьшается на 0,05 эВ, в области 140 и 190 °С уменьшается на 0,06 эВ в цикле нагревания. Так как минимумы параметра σ соответствуют наиболее разупорядоченному состоянию вещества, то можно предположить, что ФП из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую происходит при 80 °С, а при 140 и 190 °С происходит перестройка электронной подсистемы. Константа электрон-фононного взаимодействия ниже 80 °С $g = 4,04$, на интервале 80—140 °С она численно равна $g = 5,09$, а выше 140 °С $g = 2,96$. Константа электрон-фононного взаимодействия g определялась из формулы

$$g = 2/3\sigma_0^{-1},$$

где значение σ_0 определялось из графика зависимости σ от $1/12(kT)^2$ как координата точки пересечения прямой, проходящей через точки в каждой фазе, с осью ординат при $1/12(kT)^2 = 0$. Энергия эффективного фонона при температуре ниже 80 °С $h\omega_{\text{эфф}} = 524 \text{ см}^{-1}$, на интервале 80...140 °С — 540 см^{-1} ,

а выше 140 °С — 742 см^{-1} , что согласуется с частотами фононного спектра $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ [7].

Все параметры правила Урбаха вносят вклад в изменение энергетического положения края поглощения. А именно, в области 80 °С вклад в изменение ширины запрещенной зоны $\beta\eta^2$ за счет аномалии параметра правила Урбаха E_0 равен 0,086 эВ, вклад от аномалии $K_0\gamma\eta^2 = -0,03$ эВ, вклад от аномалии $\sigma\delta\eta^2 = -0,016$ эВ. В области 140 °С вклад в изменение ширины запрещенной зоны от аномалии $E_0\beta\eta^2 = 0,04$ эВ, вклад от аномалии $K_0\gamma\eta^2 = -0,01$ эВ, вклад от аномалии $\sigma\delta\eta^2 = 0,016$ эВ.

В ближней ИК области для пленки $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{Si}$ наблюдалась полоса поглощения с максимумом в районе $10\,000 \text{ см}^{-1}$ (1,24 эВ) и полушириной 0,31 эВ при 60 °С. Форма полосы такова, что коэффициент поглощения α больше при высоких частотах, чем при низких частотах (рис. 2, а). Это является признаком полярона большого радиуса с энергией связи 0,295 эВ, определенной по формуле $h\omega_{\text{max}}/4,2$ [8]. Как видно на рис. 2, б, коэффициент поглощения в максимуме α_{max} этой полосы увеличивается с повышением температуры с уступами при 80, 140 °С и максимумом при 180 °С, что совпадает с температурами предполагаемых ФП.

В ближней ИК области спектра пленки $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ наблюдалась полоса поглощения шириной 1 эВ с центром 1 эВ (рис. 3, а), имеющая активационную температурную зависимость с энергией активации 0,011 эВ при частоте 5000 см^{-1} и 0,018 эВ на частоте $14\,000 \text{ см}^{-1}$. На основе этих данных можно заключить, что пленка $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ сформирована не из кристаллитов микрометровых размеров, а представляет рыхлую структуру кластеров (возможно наноразмерных), энергия возбуждения в которых широко варьируется, начиная с 0,5 эВ. Рыхлость ионной структуры пленки $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ позволяет надеяться, что электрон проводимости может демонстрировать связь с деформацией (поляризацией) этой структуры. Для проверки такого предположения были измерены коэффициенты поглощения света $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ в ближней ИК области в условиях фотовозбуждения УФ излучением (фото-

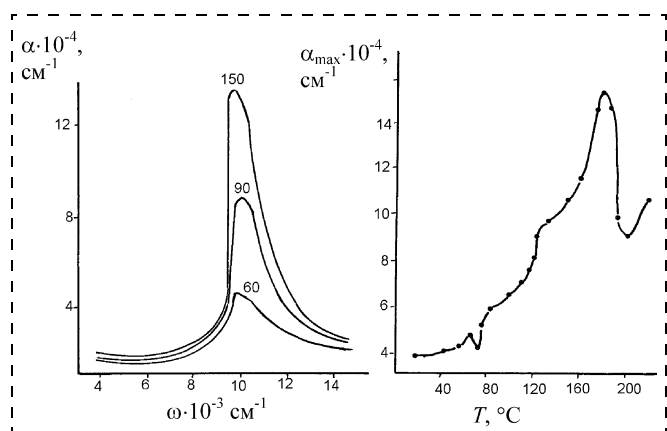


Рис. 2. Спектры поглощения в ближней ИК области пленки $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{Si}$ при температурах, указанных на рисунке (а), и температурная зависимость коэффициента поглощения в максимуме α_{max} $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{Si}$ (б)

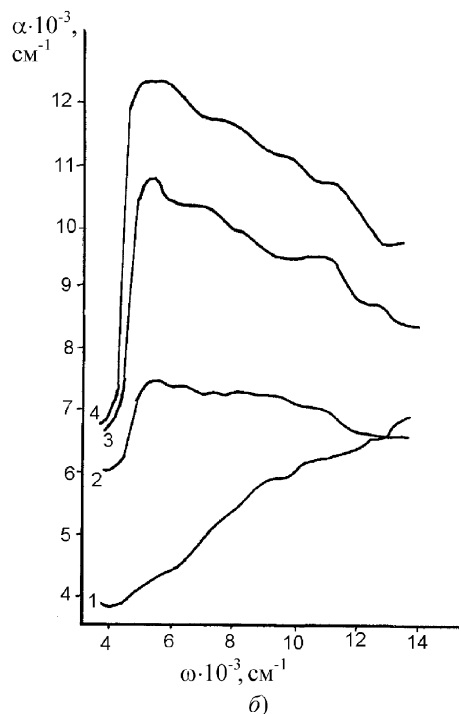
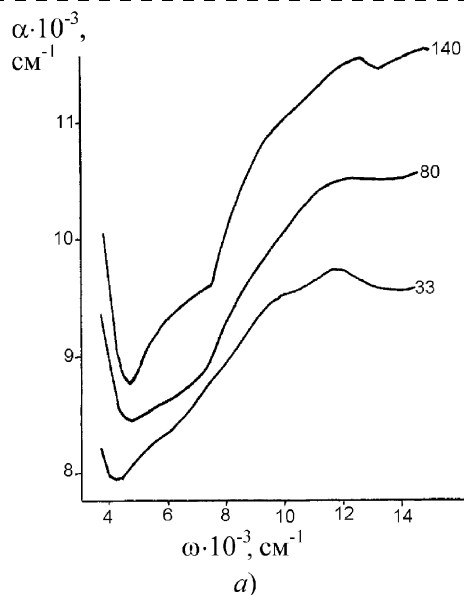


Рис. 3. Спектры поглощения в ближней ИК области $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ при температурах, указанных на рисунке (а), и спектры поглощения $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ (б) без действия УФ излучения (1) и с увеличением времени действия УФ излучения (2, 3, 4)

индуцированное ИК поглощение). Как видно на рис. 3, б, с увеличением времени облучения на фоне полосы, которая была без облучения УФ, появляется полоса в области 5500 см^{-1} ($0,68\text{ эВ}$). По форме эта полоса аналогична асимметричной полосе поглощения света в ИК области при фотодиссоциации поляронов Ландау — Пекара [8].

В спектре люминесценции пленки $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{Si}$ наблюдалась полоса с $\lambda_{\text{max}} = 497\text{ нм}$ и полушириной $0,55\text{ эВ}$ при 23 °C со стоксовым

сдвигом $0,57\text{ эВ}$. Эту полосу можно интерпретировать как суперпозицию электронно-колебательных переходов, так как на контуре полосы люминесценции укладывается чисто электронный переход и три электронно-колебательных перехода с энергией эффективного фонона 1553 см^{-1} . Сила электрон-фононного взаимодействия, найденная из спектра люминесценции, равна $1,23\text{ эВ/Å}$ при 23 °C , достигает максимумов при $110, 140$ и 180 °C , равных соответственно $1,42, 1,33$ и $1,38\text{ эВ/Å}$, что приблизительно соответствует температурам предполагаемых ФП. Энергия эффективного фонона из спектра люминесценции определялась по формуле

$$\hbar\omega_{\text{эфф}} = 0,363\Delta E_{\text{л}}^2/\Delta E_{\text{ст}},$$

а сила электрон-фононных взаимодействий

$$F_{\text{эф}} = \Delta E_{\text{л}}\sqrt{2m\hbar\omega}/2,35\hbar c,$$

где $\Delta E_{\text{л}}$ — полуширина полосы люминесценции; $\Delta E_{\text{ст}}$ — стоксов сдвиг; m — приведенная масса Ti—O колебания.

Таким образом, для пленок $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ обнаружены особенности в оптических спектрах при 80 °C , по-видимому, обусловленные ФП из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу, и при 140 и 190 °C , соответствующие перестройке электронной структуры. Различия в спектрах поглощения пленок $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ и $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3/\text{Si}$ в ближней инфракрасной области, по-видимому, обусловлены различием структуры на наноуровне.

Список литературы

1. Zakharchenko I. N., Nikitin E. S., Mukhortov V. M., Golovko Yu. I., Radchenko M. G., Dudkevich V. P. Peculiarities of Ferroelectric Phase Transition in (Ba, Sr)TiO₃ Heteroepitaxial Films Obtained by HF Cathode Sputtering // Phys. Stat. Sol. (a). 1989. 114. P. 559.
2. Мясников Э. Н., Толстоусов С. В., Фроленков К. Ю. Эффект памяти в сегнетоэлектрических пленках $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3$ // ФТТ. 2004. 46. № 12. P. 2193.
3. Греков А. А., Толстоусов С. В., Кваско Д. М. Особенности свойств сегнетоэлектрических пленок на кремниевых подложках и эффект памяти // Изв. АН. Сер. Физ. 2004. 68. № 5. С. 703.
4. Мясникова Т. П., Евсеева Р. Я., Гах С. Г. Оптические спектры титаната бария с примесями // Труды 9-го международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов". Сочи. 2006. 2. С. 41.
5. Мясникова Т. П., Кабилов Ю. В., Куприянов М. Ф., Евсеева Р. Я. Оптические спектры титаната кадмия // Труды 8-го международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов". Сочи. 2005. Ч. 1. С. 21.
6. Мясникова Т. П., Малицкая М. А., Раевский И. П., Емельянов С. М., Сахар Е. В. Оптические спектры поглощения монокристаллов $(1-X)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 - X\text{PbTiO}_3$ ($0 < X < 0,3$) // Труды международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов". Сочи. 2002. Ч. 2. С. 16.
7. Yuzyuk Yu. I., Alyoshin V. A., Zakharchenko I. N. and Sviridov E. V., Almeida A., Chaves M. R. Polarization — dependent Raman spectra of heteroepitaxial (BaSr)TiO₃/MgO thin films // Phys. Rev. B. 2002. 65. P. 134107.
8. Мясников Э. Н., Мясникова А. Э., Матропас З. П. О множественном рождении фононов при фотодиссоциации поляронов Ландау — Пекара // ЖЭТФ, 2006. 129. № 3. С. 548.

Е. С. Леонов¹, Л. Г. Пахомов², д-р хим. наук, проф.,
А. П. Лучников²,

Г. Л. Пахомов³, канд. физ.-мат. наук,

¹ Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского,

² Московский институт радиотехники,
электроники и автоматики (технический
университет),

³ Институт физики микроструктур РАН,
г. Нижний Новгород

НАНОРАЗМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ДОПИРОВАННОГО БЕЗМЕТАЛЬНОГО ФТАЛОЦИАНИНА

*Представлены результаты исследований структурных и электрических свойств органических двухкомпонентных наноразмерных тонкопленочных композиционных систем фталоцианин/*n*-хлоранил, полученных сублимацией компонентов в вакууме и последующем осаждении на подложке в пленку. Полученные пленочные наноструктуры могут использоваться как активные электрические элементы в приборах микросистемной электроники, а также в химических сенсорах газов.*

Введение

Бинарные органические системы приобретают все большее значение в нанотехнологии органических полупроводниковых материалов [1–4]. Особый интерес представляют наноразмерные пленочные системы с донорно-акцепторным взаимодействием между молекулярными компонентами, составляющими материал. Такие молекулярные системы находят применение в технологии полупроводниковых материалов: они имеют перспективу широкого практического использования в качестве высокочувствительных материалов для нелинейных элементов электрических и оптических устройств, а также чувствительных слоев химических сенсоров газов и новых приборов микросистемной электроники [5–9].

Имеющиеся в таких органических материалах комплексы с переносом заряда также являются самостоятельным объектом исследования механизмов межмолекулярного электропереноса в композиционных системах, определяющих их электрические свойства, что весьма важно при создании пленочных материалов с заданными свойствами.

Ароматические π -доноры, в том числе фталоцианины (Pc), легко формируют комплексы с переносом заряда с различными органическими акцепторами [10], такими как хлоранил (ХА) и тетрацианоэтилен TCNQ и др. [3, 11].

Образцы и методика эксперимента

Коммерческие реактивы *n*-хлоранил (97 %) (*n*-ХА) и фталоцианин безметалльный (98 %) (PcH₂) были приобретены в компании *Avocado* и дополнительно

очищены сублимацией в процессе приготовления пленок. Хлоранил *n*-ХА известен как сильный акцептор электронов (сродство к электрону 0,703 эВ [11]), а фталоцианин безметалльный PcH₂ (полупроводник *p*-типа) в данной паре предположительно является донором электронов.

Для исследований использовались наноразмерные композиционные пленки на диэлектрической подложке, полученные в высоком вакууме ($\sim 10^{-5}$ Торр) при термическом испарении (сублимации) исходных компонентов PcH₂ и *n*-ХА и осаждении их из газовой фазы на подложку как одновременно из обоих молекулярных потоков (смешанные композиции), так и последовательно (слоистые композиции) на установке ВУП-5 по методике описанной в работах [7, 12]. Толщина пленок составляла $\sim 100\ldots 150$ нм и $\sim 400\ldots 450$ нм.

Совместное нанесение двух компонентов PcH₂ и *n*-ХА из газовой фазы позволяет получать равномерное гомогенное распределение допанта в объеме матричного вещества системы PcH₂/*n*-ХА в вакуумной пленке.

Получение органических композиционных пленок с различной концентрацией *n*-ХА в PcH₂ проводилось путем обеспечения постоянства сублимационных молекулярных потоков обоих веществ компонентов из разных автономных источников. Молекулярный поток PcH₂ устанавливался с помощью метода пьезорезонансного микровзвешивания. Поток *n*-ХА устанавливался по зависимости от времени нагрева массы испарившегося *n*-хлоранила при постоянной температуре и контролировался спектрально фотометрированием растворов *n*-ХА (при $\lambda = 384$ нм), полученных его экстрагированием из пленок чистым растворителем [12].

Для электрических измерений использовалась измерительная ячейка, схема которой представлена на рис. 1. Подложка 1 выполнена из ситалла размерами $3 \times 3 \times 1$ мм и имеет никелевые электроды

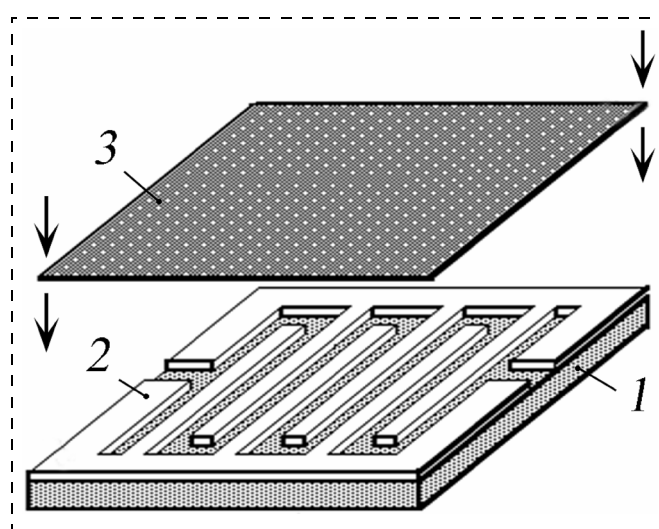


Рис. 1. Схема измерительной ячейки с исследуемой пленочной наноструктурой:

1 — диэлектрическая подложка из ситалла; 2 — измерительные электроды встречно-штырьевые типа из нихрома; 3 — исследуемая наноструктура на основе безметалльного фталоцианина

встречно-штырьевых типа. Ширина зазора между электродами 2 составляет ~30 мкм при его общей длине ~84 мм. В расчетах удельной электрической проводимости исследуемой пленки 3 за высоту принималась исходная толщина.

Электрические измерения удельной электрической проводимости γ исследуемых пленок проводились по стандартной схеме на постоянном токе как в ручном, так и в автоматическом режиме с использованием программируемого источника питания, под управлением компьютера. Использовались следующие приборы: источник питания типа НУ1802D, измеритель малых токов У5-11 и вольтметр В7-34А. Все измерения проводились на воздухе при комнатной температуре и освещенности. В каждой серии тестировались пять образцов пленок, для которых значения удельной электрической проводимости различались не более ~15...20 %. Ниже приводятся усредненные данные.

Рентгенофазовый анализ пленок проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4. Пленки для рентгенофазового анализа наносились на спутниковые подложки из ситалла одновременно с пленками для электрических измерений.

Для оптических измерений использовались пленки толщиной ~100... 150 нм, нанесенные на кварцевое стекло по той же методике, что и для электрических измерений. Спектральные измерения проводились на спектрометре КСВУ-12 (200...1100 нм) и специально собранной установке для спектральных исследований в ближней ИК области.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 2 представлены кривые электронных абсорбционных спектров органических пленок. Последний спектр (кривая 3) максимально близок к спектру индивидуального вещества.

Экспериментально исследованный электронный спектр поглощения тонкой пленки чистого PcH_2 в области видимого ультрафиолетового излучения (УФ) в диапазоне 350...1700 нм, приведенный на рис. 2, полностью соответствует его α -модификации [13, 14]. Длинноволновая полоса спектра поглощения, или Q-полоса, состоит из двух пиков: один с максимумом 1 (см. вставку на рис. 2) в области ~650 нм, а другой — 2 (плечо) с меньшей интенсивностью, смещен в красную область ~740 нм. Оба пика соответствуют π — π^* -переходам. Согласно работе [15] для случая изолированной молекулы эта полоса представляет собой дублет невырожденных Q_X и Q_Y переходов. Особенности наблюдаемого спектра поглощения пленки PcH_2 , по сравнению со спектром индивидуальной молекулы, можно объяснить кофациальным расположением молекул, приводящим к сильным экситонным взаимодействиям [13]. Полоса поглощения в области ~300 нм соответствует также π — π^* -переходу (В-полоса).

Установлено, что у двухкомпонентной пленки в УФ и ближней ИК области (350...1700 нм) спектра поглощения не наблюдается значительных отклонений от спектра поглощения чистого безметаллического фталоцианина PcH_2 . Полосы поглощения n -ХА в

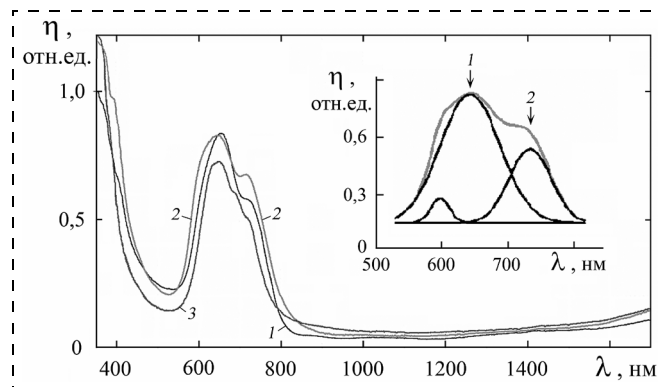


Рис. 2. Электронные абсорбционные спектры полученных пленок: 1 — безметаллического фталоцианина PcH_2 толщиной ~150 нм; 2 — двухкомпонентной наноструктуры системы PcH_2/n -ХА; 3 — безметаллического фталоцианина PcH_2 в полимерной матрице

этой области спектра также отсутствуют. Однако наблюдается проявление "плеча" на Q-полосе поглощения, которое путем деконволюции легко выделяется в полосу с максимумом при ~600 нм. Наблюдаемую полосу поглощения можно отнести к явлению переноса носителей заряда посредством образующихся донорно-акцепторных (Д-А) комплексов от фталоцианина Pc (донор) к n -ХА (акцептор), по схеме $\text{Pc} + \text{ХА} \rightarrow \text{Pc}^{\sigma+} \cdots \text{ХА}^{\sigma-} \rightarrow \text{Pc}^+ + \text{ХА}^{\cdot-}$.

Проведенные нами исследования и исследования других авторов [16] на двухслойных структурах тонкопленочных наноструктур показали монотонное увеличение электрической проводимости γ на 2—3 порядка.

На рис. 3 представлена зависимость удельной электрической проводимости γ от концентрации $C_{\text{ХА}}$ легирующей добавки n -ХА в пленке фталоцианина PcH_2 . За нулевую точку взято значение удельной электрической проводимости γ пленки чистого PcH_2 толщиной ~200 нм. Начальный участок зависимости удельной электрической проводимости γ от $C_{\text{ХА}}$ (рис. 3), соответствующий концентрации $C_{\text{ХА}}$ до значения 10 %, отражает резкий рост значений γ (на 3—4 порядка). Здесь максимальное значение γ составляет $\sim 1,5 \cdot 10^{-10}$ См/м, тогда как у пленок чистого фталоцианина безметаллического γ составляет $\sim 3 \cdot 10^{-14}$ См/м. Такое экстремальное увеличение

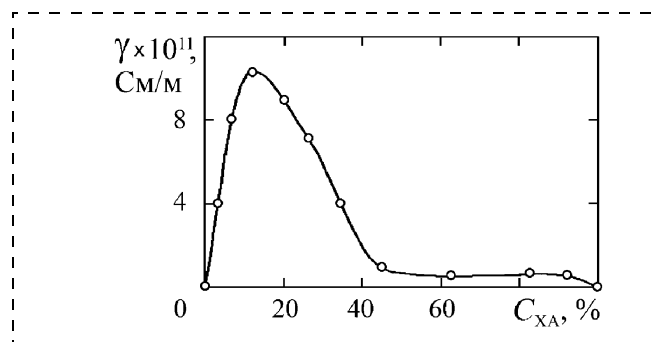


Рис. 3. Зависимость удельной электрической проводимости γ от концентрации $C_{\text{ХА}}$ n -хлоранила в композиционных наноструктурах состава PcH_2/n -ХА, одновременно осажденных компонентов на подложку из газовой фазы

значений γ связано, прежде всего, с образованием межмолекулярных донорно-акцепторных (Д-А) комплексов с переносом заряда на межфазной границе гетерогенной наноструктуры $\text{PcH}_2/n\text{-XA}$. При этом не наблюдается изменения фазового состава в композиционных пленках, о чем свидетельствуют их колебательные спектры.

При содержании легирующей добавки $n\text{-XA}$ порядка $\sim 10\text{--}12\%$ структура пленочного нанокомпозита приобретает свойства пересыщенного твердого раствора, когда базовая решетка фталоцианина безметалльного принимает $n\text{-XA}$ без разрушения. Дальнейшее увеличение концентрации C_{XA} $n\text{-хлоранила}$ приводит к выпадению его в самостоятельную твердую фазу. Здесь при достаточном накоплении твердого $n\text{-XA}$ в пленке образуются межблочные области акцептора, вызывающие незначительный прирост ее электрической проводимости.

Ранее в работах [16, 17] отмечалось, что при легировании фталоцианинов Pc сильными акцепторами наблюдается значительное повышение удельной электрической проводимости, которое объяснялось как обогащение пленки фталоцианина основными носителями заряда (дырками). Однако при содержании в пленке $n\text{-XA}$, превышающего концентрацию порядка $\sim 10\%$, ее удельная электрическая проводимость значительно снижалась.

На рис. 4 представлены спектры рентгеновской дифракции на малых углах 2θ исследуемых органических пленок.

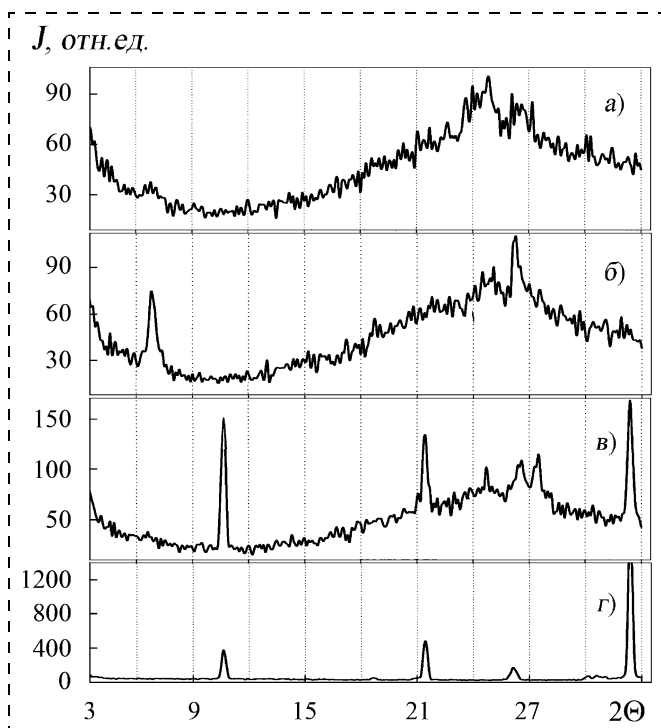


Рис. 4. Спектр рентгеновской дифракции (интенсивность рефлекса J) исследуемых пленок на малых углах 2θ рассеяния для чистого безметалльного фталоцианина типа PcH_2 (а); двухкомпонентной композиционной наноструктуры системы $\text{PcH}_2/n\text{-XA}$ с содержанием $n\text{-XA}$ $\sim 10\%$ (б), $\sim 26\%$ (в) и порошкообразного чистого $n\text{-XA}$ (г)

Спектр полученных пленок чистого безметалльного фталоцианина PcH_2 (рис. 4, а) соответствует его α -модификации [4]. При разном соотношении содержания компонентов в композиционных пленках $\text{PcH}_2/n\text{-XA}$ не наблюдается существенных изменений в их структуре, и спектр (рис. 4, б) соответствует рентгенограмме чистого фталоцианина.

Однако экспериментально наблюдаемая нами зависимость электрической проводимости пленок при малых концентрациях $n\text{-XA}$ (C_{XA} до $\sim 10\%$) в PcH_2 растет до максимального значения, а при дальнейшем его увеличении ($C_{\text{XA}} > 10\%$) начинает существенно снижаться. Этому же уровню концентраций C_{XA} соответствуют структурные изменения в пленке (рис. 4, в), которые проявляются в виде четких пиков фазы $n\text{-XA}$, подобных пикам для чистого $n\text{-хлоранила}$ (рис. 4, г).

Наблюдаемые изменения в зависимости электрической проводимости молекулярного органического полупроводника от концентрации легирующей добавки (допанта) характерны для области малых концентраций допанта в случае его низкой растворимости в матрице [18]. Если формирование твердой фазы (Тв) происходит при быстром охлаждении совместного расплава (Ж) или пара (П) молекулярного пучка, как в нашем случае, то переход $\text{П} \rightarrow \text{Тв}$ и $\text{Ж} \rightarrow \text{Тв}$ происходит в неравновесных условиях. Распад образовавшейся метастабильной (пересыщенный раствор) фазы на фазу твердого раствора допанта в матрице и собственную фазу допанта затруднен ввиду малой скорости молекулярной диффузии в твердом теле и высокой энергии активации образования зародыша индивидуального компонента. Достаточно малая растворимость $n\text{-XA}$ в PcH_2 ($< 10\%$) объясняется значительным различием размеров молекул компонентов. Кроме того, резкое возрастание проводимости в области существования твердых растворов свидетельствует о том, что только нахождение (расположение) молекул легирующей добавки в базовой решетке PcH_2 вызывает существенное возрастание его проводимости, что также соответствует результатам работы [18].

На основании известного "геометрического принципа" Китайгородского [19] можно ожидать, что обратная растворимость (PcH_2 в хлораниле) меньше прямой (хлоранила в PcH_2), и рентгенограммы чистого хлоранила и хлоранила с PcH_2 будут мало различимы.

Наблюдаемые выше (см. рис. 3) значительные изменения в электрической проводимости органической композиционной наноструктуры при увеличении в ней концентрации легирующей добавки могут также обуславливаться фактором образования комплекса с переносом заряда за счет образования в структуре композита водородных связей (Н-связи) между молекулами PcH_2 и XA -допанта. Образование Н-связей на межфазной границе $\text{PcH}_2/n\text{-XA}$ может создать поверхностную промежуточную фазу ("мезафазу") из связанных молекул фталоцианина и хлоранила с Н-связями. Так при концентрациях $\sim 10\text{--}12\%$ легирующей добавки $n\text{-XA}$ в композиционной пленке может сформироваться "мезафаза", достигая своего максимального межфазного слоя (подобно

эффекту перколяции). При увеличении содержания $C_{\text{ХА}}$ допанта в пленке, когда n -ХА выделяется в самостоятельную объемную фазу, происходит перераспределение слоя "мезафазы" с разрушением установившегося ранее, что и приводит к резкому снижению значения электрической проводимости нанокompозита.

Заключение

Исследование структурных, оптических и электрических свойств двухкомпонентных тонкопленочных наноструктур системы $\text{PcH}_2/\text{ХА}$ показало, что в оптическом спектре пленок проявляется область поглощения вблизи ~ 600 нм, характеризующая перенос заряда. Изменения электрической проводимости двухкомпонентных композиционных пленок сопровождаются образованием и распадом пересыщенных твердых растворов $\text{PcH}_2/\text{ХА}$.

Установлено, что электрофизические свойства полученных органических пленок определяются тремя факторами: донорно-акцепторными свойствами исходных компонентов и структурными особенностями композиционных систем, а также возможным образованием в молекулярной структуре композита водородных связей между молекулами PcH_2 и ХА -допанта.

Проведенные исследования свидетельствуют об устойчивой связи структурных и электрофизических свойств молекулярных комплексов с донорно-акцепторными свойствами в композиционном органическом полупроводнике, полученном из газовой фазы. Это весьма важно для получения наноструктур с заданными свойствами путем молекулярного легирования производных фталоцианина, используемых для создания элементов с заданными свойствами приборов микроэлектронной техники.

Работа выполнена при поддержке гранта аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2006—2008 гг.)", подраздел: № 2.1.2, и гранта РФФИ 07-02-13661-офи_ц.

Список литературы

1. Goetzberger A., Hebling C., Schock H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook // Materials Science and Engineering R. 2003. V. 40. P. 1—46.
2. Bortchagovsky E. G., Kazantseva Z. I., Koshets I. A., Nespurek S., Jastrahik L. Optical properties of double-layer structure phthalocyanine—tetracyanoquinodimethane // Thin Solid Films. 2004. V. 460. P. 269—273.
3. El-Nahass M. M., Sallam M. M., Ali H. A. M. Optical Properties of Thermally Evaporated Metal-Free Phthalocyanine

(H_2Pc) Thin Films // International Journal of Modern Physics B. 2005. Vol. 19. N 27. P. 4057—4071.

4. Miyazaki E., Morita Y., Nakasuji K. 2-Iodo-1,6-dithiapyrrene: Syntheses, crystal structures and physical properties of CT complexes and salt // Polyhedron. 2005. V. 24. P. 2632—2638.

5. Пахомов Л. Г., Леонов Е. С., Пахомов Г. Л., Лучников А. П. Нелинейные резистивные свойства тонкопленочного органического комплексного полупроводника // Материалы Международной научной конференции ПЛЕНКИ—2005, 22—26 ноября 2005 г., Москва. М.: МИРЭА, 2005. Ч. 2. С. 67—70.

6. Алиев В. Ю., Мамедов А. К., Садррадинов С. А. Пленочный варистор // Авторское свидетельство СССР. МКИ H01C 7/10. / Бюллетень изобретений. 1986, № 5.

7. Мамедов А. К. Температурные параметры тонкопленочных варисторов // Журнал радиоэлектроники. 2003. № 2.

8. Пахомов Л. Г., Лучников А. П. Тонкопленочные наноструктуры на основе двухкомпонентных органических систем фталоцианинов для сенсоров аммиака // Материалы Международной НТК ПЛЕНКИ—2004. 7—10 сентября 2004 г., Москва. М.: МИРЭА, 2004. Ч. 2. С. 74—79.

9. Ram Reddy A., KrishnaMurthy N. V., Bhudevi B. Molecular adducts between a few phenolic donors and π -acceptors in solid-state // Spectrochimica Acta Part A. 2006. V. 63. P. 700—708.

10. Boraie A. A. Spectroscopic study on charge transfer molecular complexes of pyrazole derivatives with some π -electron acceptors // Spectrochimica Acta Part A. 2002. V. 58. P. 1895—1901.

11. Леонов Е. С., Травкин В. В., Пахомов Л. Г., Лучников А. П. Определение концентрации компонентов в наноразмерных пленках PcH_2/n -хлоранил, полученных совместной сублимацией // Материалы Международной НТК INTERMATIC—2006. 24—28 октября 2006 г., Москва. М.: Изд. МИРЭА, 2006. Ч. 3. С. 44—47.

12. McKeown N. B. Phthalocyanine Materials, Cambridge University Press. 1998.

13. Yim S., Heutz S., Jones T. S. Model for the α - β (1) phase transition in phthalocyanine thin films // Journal of applied physics. 2002. V. 91, N 6. P. 3632—3636. 15 march 2002.

14. Assour J. M., Harrison S. E. On the Optical Absorptions of Phthalocyanines // J. Am. Chem. Soc. 1965. V. 87. N 3. P. 651—652.

15. Kearns D. R., Tollin G., Calvin M. Electrical properties of organic solids. II. Effects of added electron acceptor on metal — free phthalocyanines // J. Chem. Phys. 1960. V. 32. N 4. P. 1020—1025.

16. Zhivkov I., Spassova E., Dimov D., Danev G. Oxygen influence on the conductivity of copper phthalocyanine vacuum-deposited thin films // Vacuum. 2004. V. 76. P. 237—240.

17. Gupta R. K., Singh R. A. Thermochemical and microstructural studies on binary organic eutectics and complexes // Journal of Crystal Growth. 2004. V. 267. P. 340—347.

18. Китаргородский А. И. Органическая кристаллохимия. М.: Наука, 1983.

УДК 531.383

С. П. Тимошенков, д-р техн. наук,
С. А. Зотов, канд. техн. наук, Е. С. Морозова,
В. Н. Балычев, МИЭТ,
Е. П. Прокопьев, канд. техн. наук
ГНЦ ИТЭФ

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВИБРАЦИОННОГО ГИРОСКОПА LL-ТИПА

Представлены результаты разработки конструкции нового варианта микромеханического гироскопа LL-типа. Приведены основные характеристики полученного микромеханического гироскопа. Представлены уравнения движения чувствительного элемента гироскопа LL-типа на вращающемся основании и передаточные функции, полученные на основе уравнений движения.

Введение

В данной работе представлены результаты разработки конструкции нового варианта микромеханического гироскопа (ММГ) LL-типа. Отличительной особенностью ММГ является возможность использования их для измерения углов и угловых скоростей высокочастотных быстровращающихся объектов. Разрабатываемый датчик относится к классу интегрирующих микромеханических вибрационных гироскопов и предназначен для использования в системах управления подвижных объектов различного назначения, в частности высокочастотных быстровращающихся объектов, а также может использоваться в качестве индикаторов углового движения.

Уравнения движения чувствительного элемента гироскопа

В гироскопах LL-типа возбуждаются линейные колебания (первичные) по какой-либо оси, перпендикулярной оси чувствительности. При действии угловой скорости возникает переменное ускорение Кориолиса той же частоты что и первичные колебания, направленное по оси, перпендикулярной оси чувствительности и оси первичных колебаний, вследствие чего система совершает линейные колебания (вторичные) в направлении ускорения Кориолиса. При этом в установившемся режиме частоты первичных и вторичных колебаний совпадают [1, 2].

Схематично чувствительный элемент (ЧЭ) гироскопа LL-типа можно изобразить как чувствитель-

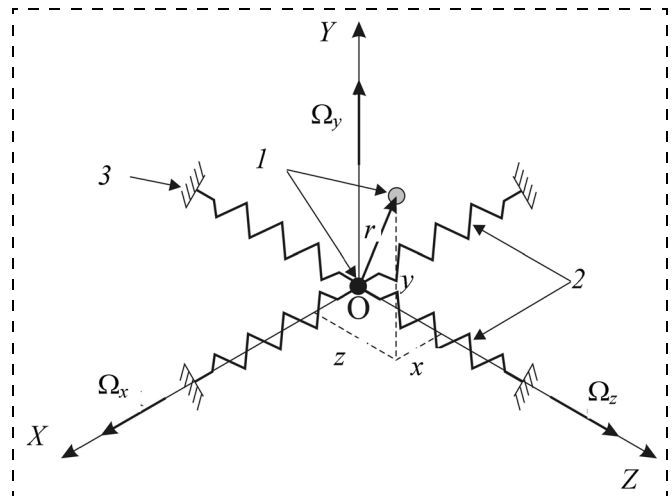


Рис. 1. Схема ЧЭ гироскопа LL-типа:

1 — чувствительная масса; 2 — упругий подвес; 3 — корпус прибора

ную массу 1, соединенную с корпусом прибора 3 посредством упругих подвесов 2 (рис. 1).

При выводе уравнений движения чувствительного элемента гироскопа введем следующие допущения: масса ЧЭ является абсолютно жестким и полностью симметричным телом. Введем систему координат $OXYZ$, связанную с ЧЭ гироскопа (рис. 1), точку O совместим с центром масс ЧЭ в положении его устойчивого равновесия. Рассматривается только линейное перемещение ЧЭ гироскопа в пространстве, т. е. введены три обобщенные координаты — x , y и z . Корпус гироскопа подвержен трехкомпонентной угловой скорости, переменной во времени, заданной своими компонентами Ω_x , Ω_y , Ω_z .

Пользуясь методом Лагранжа второго рода, получим уравнения движения ЧЭ гироскопа на подвижном основании:

$$\left\{ \begin{aligned} m\ddot{x} + b_x\dot{x} + G_x x + 2\Omega_y\dot{z}m - 2\Omega_z\dot{y}m + \\ + \dot{\Omega}_y z m - \dot{\Omega}_z y m + \Omega_x\Omega_z z m + \Omega_x\Omega_y y m - \\ - \Omega_z^2 x m - \Omega_y^2 x m = F_x; \\ m\ddot{y} + b_y\dot{y} + G_y y + 2\Omega_z\dot{x}m - 2\Omega_x\dot{z}m - \\ + \dot{\Omega}_x z m + \dot{\Omega}_z x m + \Omega_y\Omega_z z m + \Omega_y\Omega_x x m - \\ - \Omega_z^2 y m - \Omega_x^2 y m = F_y; \\ m\ddot{z} + b_z\dot{z} + G_z z + 2\Omega_x\dot{y}m - 2\Omega_y\dot{x}m + \\ + \dot{\Omega}_x y m - \dot{\Omega}_y x m + \Omega_z\Omega_y y m + \Omega_z\Omega_x x m - \\ - \Omega_y^2 z m - \Omega_x^2 z m = F_z \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где b_x, b_y, b_z — коэффициенты демпфирования колебаний относительно соответствующей оси; $b_x\dot{x}, b_y\dot{y}, b_z\dot{z}$ — диссипативные силы; F_x, F_y, F_z — внешние силы, приложенные к ЧЭ по соответственной оси; m — масса ЧЭ; G_x, G_y, G_z — жесткости подвеса ЧЭ.

Полагая, что основание подвержено постоянной угловой скорости, перепишем уравнения движения (1):

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b_x\dot{x} + (G_x - \Omega_z^2 m - \Omega_y^2 m)x + \\ + m(2\Omega_y\dot{z} - 2\Omega_z\dot{y} + \Omega_x\Omega_z\dot{z} + \Omega_x\Omega_y\dot{y}) = F_x; \\ m\ddot{y} + b_y\dot{y} + (G_y - \Omega_z^2 m - \Omega_x^2 m)y + \\ + m(2\Omega_z\dot{x} - 2\Omega_x\dot{z} + \Omega_y\Omega_z\dot{z} + \Omega_y\Omega_x\dot{x}) = F_y; \\ m\ddot{z} + b_z\dot{z} + (G_z - \Omega_y^2 m - \Omega_x^2 m)z + \\ + m(2\Omega_x\dot{y} - 2\Omega_y\dot{x} + \Omega_z\Omega_y\dot{y} + \Omega_z\Omega_x\dot{x}) = F_z. \end{cases} \quad (2)$$

Данные уравнения позволяют исследовать динамику ЧЭ гироскопа на вращающемся основании.

Структурная схема и передаточные функции

На рис. 2 приведена структурная схема ЧЭ гироскопа LL-типа, полученная в соответствии с уравнениями (2) [3].

Рассматривая в качестве входного возмущения силу F_x , запишем передаточные функции для выходных координат x, y и z :

$$\begin{aligned} W_{F_x x} &= \\ &= [(mp^2 + b_y p + G_y - \Omega_z^2 m - \Omega_x^2 m)(mp^2 + b_z p + G_z - \Omega_y^2 m - \Omega_x^2 m) - m^2(-2\Omega_z p + \Omega_x \Omega_y)(-2\Omega_x p + \Omega_y \Omega_z)]/\Delta; \\ W_{F_x y} &= \frac{m^2(2\Omega_x p - \Omega_y \Omega_z)(2\Omega_y p - \Omega_z \Omega_x) - m(mp^2 + b_z p + G_z - \Omega_y^2 m - \Omega_x^2 m)(2\Omega_z p + \Omega_y \Omega_x)}{\Delta}, \\ W_{F_x z} &= \frac{m^2(2\Omega_z p + \Omega_y \Omega_x)(2\Omega_x p + \Omega_z \Omega_y) - m(mp^2 + b_y p + G_y - \Omega_z^2 m - \Omega_x^2 m)(-2\Omega_y p + \Omega_z \Omega_x)}{\Delta}. \end{aligned}$$

Рассматривая в качестве входного возмущения силу F_y , запишем передаточные функции для выходных координат:

$$\begin{aligned} W_{F_y x} &= \frac{m^2[(2\Omega_x p + \Omega_z \Omega_y)(2\Omega_y p + \Omega_x \Omega_z) - (-2\Omega_z p + \Omega_x \Omega_y)(-2\Omega_x p + \Omega_y \Omega_z)]}{\Delta}; \\ W_{F_y y} &= \\ &= [(mp^2 + b_x p + G_x - \Omega_z^2 m - \Omega_y^2 m)(mp^2 + b_z p + G_z - \Omega_y^2 m - \Omega_x^2 m) - m^2(-2\Omega_y p + \Omega_z \Omega_x)(2\Omega_y p + \Omega_x \Omega_z)]/\Delta; \\ W_{F_y z} &= \frac{m^2(2\Omega_z p - \Omega_x \Omega_y)(2\Omega_y p - \Omega_z \Omega_x) - m(2\Omega_x p + \Omega_z \Omega_y)(mp^2 + b_x p + G_x - \Omega_z^2 m - \Omega_y^2 m)}{\Delta}. \end{aligned}$$

Рассматривая в качестве входного возмущения силу F_z , запишем передаточные функции для выходных координат:

$$W_{F_z x} = \frac{m^2(2\Omega_z p - \Omega_x \Omega_y)(2\Omega_x p - \Omega_y \Omega_z) - m(mp^2 + b_y p + G_y - \Omega_z^2 m - \Omega_x^2 m)(2\Omega_y p + \Omega_x \Omega_z)}{\Delta};$$

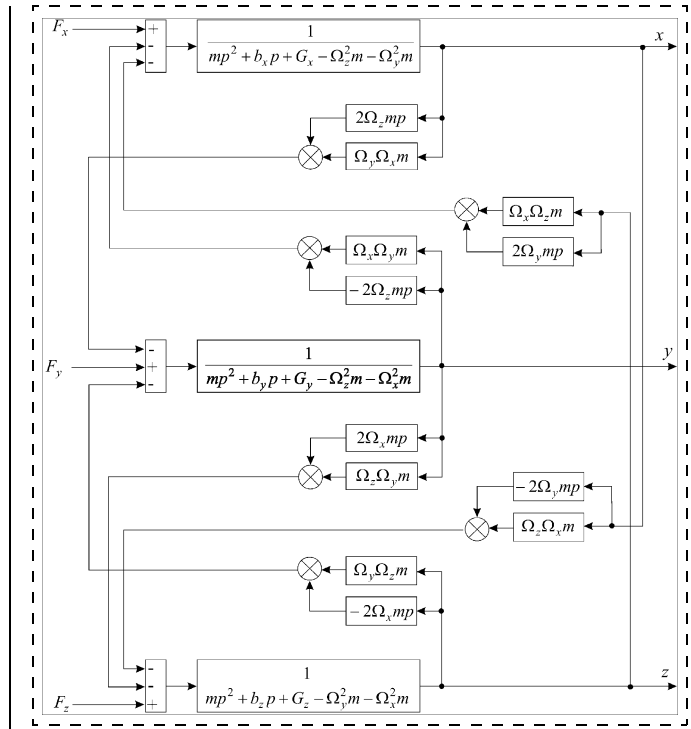


Рис. 2. Структурная схема ЧЭ гироскопа LL-типа

$$W_{F_z y} = \frac{m^2(2\Omega_z p + \Omega_y \Omega_x)(2\Omega_y p + \Omega_x \Omega_z) - m(2\Omega_x p + \Omega_y \Omega_z)(mp^2 + b_x p + G_x - \Omega_z^2 m - \Omega_y^2 m)}{\Delta};$$

$$W_{F_z z} =$$

$$= [(mp^2 + b_x p + G_x - \Omega_z^2 m - \Omega_y^2 m)(mp^2 + b_y p + G_y - \Omega_z^2 m - \Omega_x^2 m) - m^2(2\Omega_z p + \Omega_y \Omega_x)(-2\Omega_z p + \Omega_x \Omega_y)]/\Delta,$$

где

$$\Delta = \begin{bmatrix} mp^2 + b_x p + G_x - \Omega_z^2 m - \Omega_y^2 m & m(-2\Omega_z p + \Omega_x \Omega_y) & m(2\Omega_y p + \Omega_x \Omega_z) \\ m(2\Omega_z p + \Omega_y \Omega_x) & mp^2 + b_y p + G_y - \Omega_z^2 m - \Omega_x^2 m & m(-2\Omega_x p + \Omega_y \Omega_z) \\ m(-2\Omega_y p + \Omega_z \Omega_x) & m(2\Omega_x p + \Omega_z \Omega_y) & mp^2 + b_z p + G_z - \Omega_y^2 m - \Omega_x^2 m \end{bmatrix}.$$

Полученные передаточные функции позволят провести анализ динамики ЧЭ гироскопа на равномерно вращающемся основании, а также дать оценку чувствительности прибора.

Конструктивная схема, принцип действия, полученные характеристики

Коллективом кафедры "Микроэлектроника", МИЭТ был изготовлен микромеханический вибрационный гироскоп (ММВГ), чувствительный элемент которого содержит (рис. 3) инерционную массу 1, подвешенную посредством консолидно закрепленных в корпусе 2 восьми упругих элементов 3 [4]. Системы съема, вибрационного двигателя, силовой компенсации выполнены в виде гребенчатых структур 4, 5, 6, 7.

ЧЭ микромеханического вибрационного гироскопа работает следующим образом. С помощью электростатической гребенчатой структуры 4 обеспечивается поступательное вибрационное движение инерционной массы вдоль оси OX . Контроль и стабилизация параметров вибрационного движения вдоль оси OX осуществляется с помощью гребенчатых структур — электростатической 4 и емкостной 5. При наличии угловой скорости вокруг оси OZ появляется переменная сила Кориолиса вдоль оси OY .

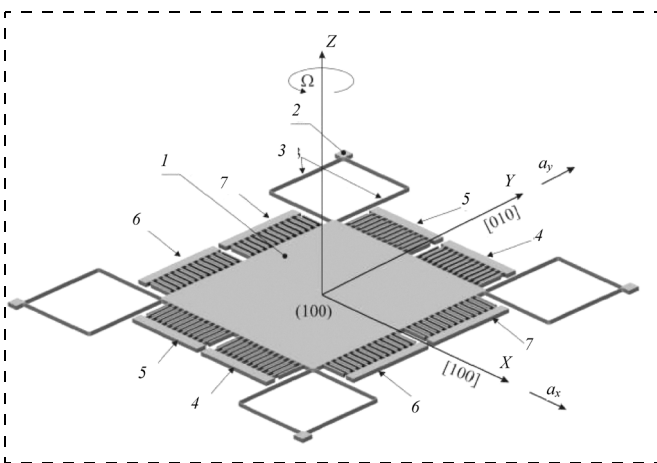


Рис. 3. Конструктивная схема механической структуры ЧЭ

Перемещения инерционной массы, вызванные этой силой, измеряются с помощью емкостной гребенчатой структуры 6. Компенсационный режим измерения в ММВГ реализуется с помощью электростатической гребенчатой структуры 7.

Были получены следующие характеристики ММВГ:

Диапазон измеряемых угловых скоростей	(75; 150; 300) °/с
Угловая скорость случайного дрейфа гироскопа	0,01...0,1 °/с
Полоса пропускания	0...50, 0...100 Гц
Перегрузки	0...1000 g
Энергопотребление	0,1 Вт
Размеры чувствительного элемента	10 × 10 мм
Ресурс	20 000 ч

Список литературы

1. Тимошенков С. П., Рубчиц В. Г., Зотов С. А. и др. Микромеханические акселерометры серии АРК и АЗ, микромеханические гироскопы серии МГК и системы на их основе: стадия разработки и перспективы // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Датчики и системы-2005". С. 35, 36.
2. Микромеханический вибрационный гироскоп и способ его изготовления / Заявитель и патентообладатель. Рубчиц В. Г., Калугин В. В., Лапенко В. Н., Шилов В. Ф., Плеханов В. Я., Тихонов В. А., Зотов С. А., Тимошенков С. П., Максимов В. Н.; Пат. 2004101707. Российская Федерация, опубл. 12.01.04.
3. Бессекерский Б. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972.
4. Тимошенков С. П., Зотов С. А., Калугин В. В., Прокопьев Е. П. Исследование и разработка технологических процессов изготовления элементов микромеханики // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. 2006. № 2. С. 3—7.

И. А. Каштанкин, канд. техн. наук,
Н. Т. Гурин, д-р физ.-мат. наук,
Ульяновский государственный университет
E-mail: ido@ulsu.ru

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ N-ПРИБОРЫ С СИММЕТРИЧНОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Проведено моделирование и исследование фоточувствительных N-приборов, имеющих симметричную выходную вольт-амперную характеристику. Реализация симметричной характеристики рассмотренных приборов достигается встречно-параллельным и комплементарным включением биполярных и МДП-биполярных фоточувствительных негатронов.

Полупроводниковые приборы с симметричной N-образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) могут использоваться в различных узлах электронной аппаратуры, работающей на переменном токе, в том числе в качестве устройств защиты и управления индуктивной нагрузкой [1]. Однако гораздо более широкими функциональными возможностями обладают фоточувствительные N-приборы с управляемой ВАХ, которые могут использоваться в позиционно-чувствительных фотодатчиках, оптоэлектронных аналого-цифровых преобразователях, элементах памяти, N-транзисторных оптронах, различных устройствах автоматики и оптомикросистемной техники [2–7]. В связи с этим представляется важным изучение возможности создания фоточувствительных N-приборов с симметричной ВАХ, способных работать на знакопеременном напряжении.

В данной работе рассмотрены три типа фоточувствительных симметричных N-приборов: комплементарные, биполярно-полевые и биполярные. Исследуемые негатроны выполнены на полупроводниковой пластине, изготовленной по БиКМОП-технологии с n^+ скрытым слоем, эпитаксиальной пленкой n -типа, p -карманом, являющимся базой n - p -транзистора, поликремниевым затвором, ионно-легированными n^+ - и p^+ -областями для формирования как МОП, так и биполярных транзисторов, и с одним уровнем металлизации (рис. 1).

Параметры структуры следующие: слева сверху (рис. 1, а) — p^+ -область, легированная бором до поверхностного сопротивления $R_s = 110 \text{ Ом}/\square$, p -карман — база биполярного транзистора легирована бором до уровня $2,6 \text{ кОм}/\square$. Эмиттер биполярного, а также сток и исток МОП-транзистора с сопротивлением $30 \text{ Ом}/\square$ легирован фосфором и имеет толщину $0,8 \text{ мкм}$. Коллектор состоит из трех областей: n^+ скрытого слоя с сопротивлением $20 \text{ Ом}/\square$ и толщиной 9 мкм , легированного сурьмой, эпитаксиального слоя толщиной $7,8 \text{ мкм}$, легированного фосфором

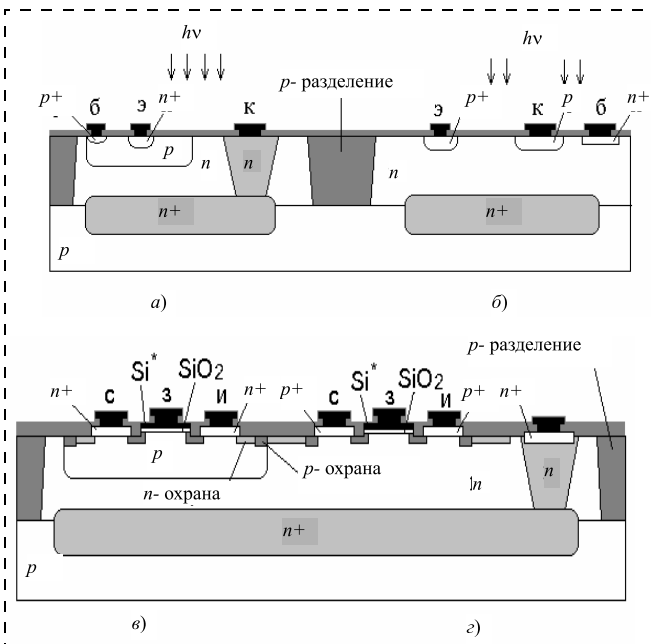


Рис. 1. Структуры транзисторов симметричных N-приборов:
а — n - p - n ; б — p - n - p ; в — n -МОП; з — p -МОП

(удельное сопротивление $\rho_v = 2,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) и глубокой коллекторной области сопротивлением $3 \text{ Ом}/\square$ и толщиной 10 мкм , легированной фосфором.

Толщина n^+ -области базы p - n - p -транзистора, а также n^+ стока и истока, легированных фосфором ($R_s = 30 \text{ Ом}/\square$), составляет $0,8 \text{ мкм}$. Затвор полевого транзистора выполнен из поликремния и имеет толщину $0,5 \text{ мкм}$. Подзатворный оксид (SiO_2) имеет толщину 65 нм , p -охрана толщиной 1 мкм легирована бором до уровня $3 \text{ кОм}/\square$. Легированная фосфором n -охрана ($R_s = 2,5 \text{ кОм}/\square$) имеет толщину 1 мкм . Подложка марки КДБ-12 $\langle 100 \rangle$ легирована бором. Толщина металлизации, выполненной из сплава АК1, составляет $1,2 \text{ мкм}$. Транзисторы разделены областью толщиной 10 мкм , легированной бором до уровня $13 \text{ Ом}/\square$. Методика моделирования и экспериментального исследования рассмотренных N-приборов описана в работе [3].

Первый вариант симметричного N-прибора, реализующий комплементарную схему, имеет двух- (рис. 2, а) и четырехэлектродную (рис. 2, б) реализацию.

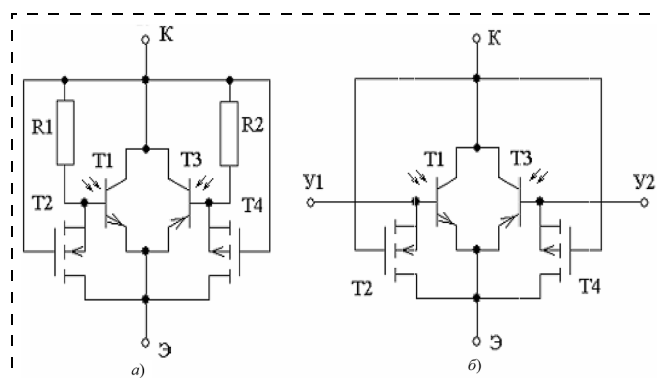


Рис. 2. Комплементарная схема МДП-биполярного N-прибора, реализующая симметричную ВАХ:

а — двухэлектродный вариант; б — четырехэлектродный вариант

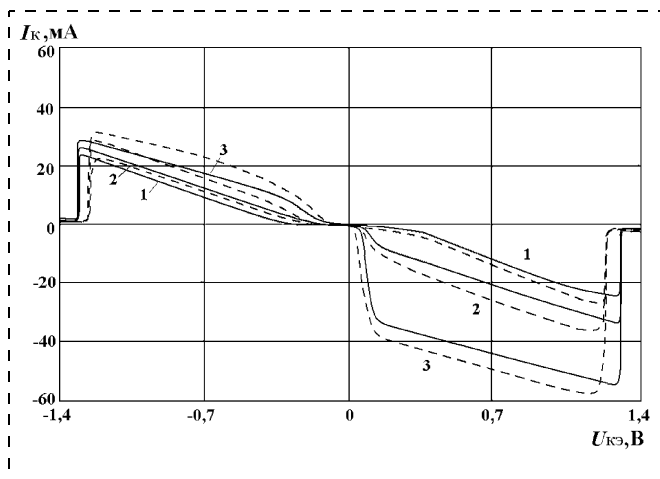


Рис. 3. Выходная ВАХ комплементарного двухэлектродного биполярно-полевого N -прибора в зависимости от мощности ИК излучения:

1 — 0 мВт; 2 — 20 мВт; 3 — 60 мВт; - - - — экспериментальные данные, — — — — данные схемотехнического моделирования

Симметричный МДП-биполярный негатрон (рис. 2) состоит из двух N -приборов противоположной структуры, принцип работы каждого из них описан в работе [8]. Резисторы сопротивлением $R_1 = 7$ кОм и $R_2 = 5$ кОм (рис. 2, а) задают напряжение смещения на биполярных транзисторах негатрона и определяют симметричность выходной ВАХ прибора. Первоначально транзисторы Т1 и Т3 находятся в режиме отсечки. При подаче положительной полярности питающего напряжения на коллектор относительно эмиттера $U_{КЭ} > 0$ работает пара транзисторов Т1 и Т2, образующих первый негатрон, через резистор R_2 на базу транзистора Т3 подается положительное запирающее напряжение, и негатрон, образованный транзисторами Т3 и Т4, остается в высокоомном режиме, не оказывая влияния на первый негатрон прибора. Если напряжение $U_{КЭ} < 0$, то работает пара транзисторов Т3 и Т4. Для четырехэлек-

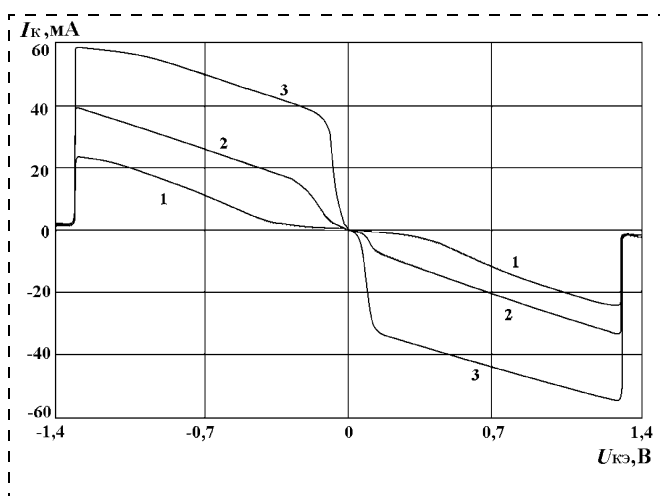


Рис. 4. Выходная ВАХ комплементарного двухэлектродного биполярно-полевого N -прибора в зависимости от мощности ИК излучения, полученная в результате моделирования при коэффициенте усиления транзистора Т3 $B_{ст} = 140$:

1 — 0 мВт; 2 — 20 мВт; 3 — 60 мВт

тродного прибора смещение транзисторов Т1 и Т3 задается внешними источниками тока, подключенными к управляющим электродам У1 и У2 (рис. 2, б).

Выходная ВАХ комплементарного двухэлектродного N -прибора представлена на рис. 3. Увеличение мощности ИК излучения приводит к росту тока пика негатрона, как на положительной, так и на отрицательной ветви ВАХ. Рост тока коллектора выходной ВАХ в зависимости от ИК излучения определяется (в большей степени) коэффициентами усиления транзисторов Т1 и Т3, различием которых объясняется несимметричность положительной и отрицательной ветвей выходной характеристики при облучении. При приведении в модели коэффициента усиления $B_{ст}$ по току $p-n-p$ -транзистора Т3 к значению, равному 140, выходная ВАХ при облучении транзисторов будет иметь симметричный вид (рис. 4). Выходная ВАХ четырехэлектродного варианта симметричного N -прибора аналогична указанным выше при токах управления $I_{y1} = 0,25$ мА и $I_{y2} = -0,5$ мА (рис. 2, б).

Симметричная характеристика N -типа может быть получена, если соединить два негатрона с одинаковым типом проводимости встречно-параллельно. Основное преимущество такого подхода — это применение транзисторов одного типа проводимости, что значительно упрощает и удешевляет процесс производства указанных приборов. Схемы замещения приборов в двух- и четырехэлектродном исполнении представлены на рис. 5.

Принцип работы данных N -приборов заключается в том, что при положительном напряжении на коллекторе относительно эмиттера транзистор Т3 оказывается в запертом состоянии и N -участок выходной ВАХ реализуется негатроном Т1, Т2, R_1 . И наоборот, при отрицательном напряжении на коллекторе работает негатрон, образованный транзисторами Т3, Т4, в то время как транзистор Т1 находится в высокоомном состоянии. Еще одно преимущество встречно-параллельного включения заключается в том, что

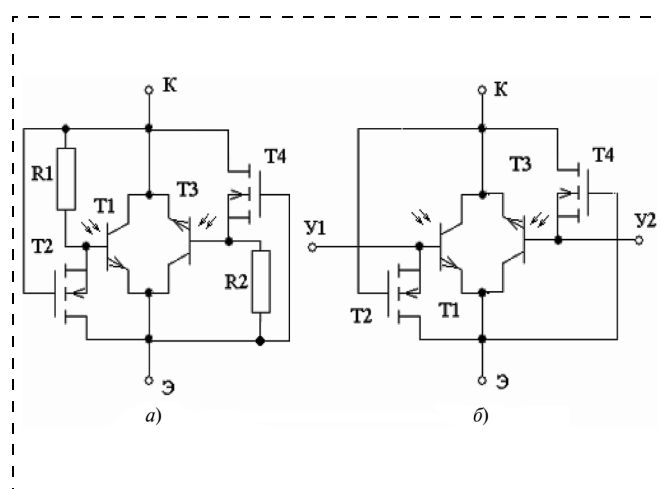


Рис. 5. Схема замещения биполярно-полевого фоточувствительного N -прибора, реализующая симметричную ВАХ (встречно-параллельное включение):

а — двухэлектродный вариант; б — четырехэлектродный вариант

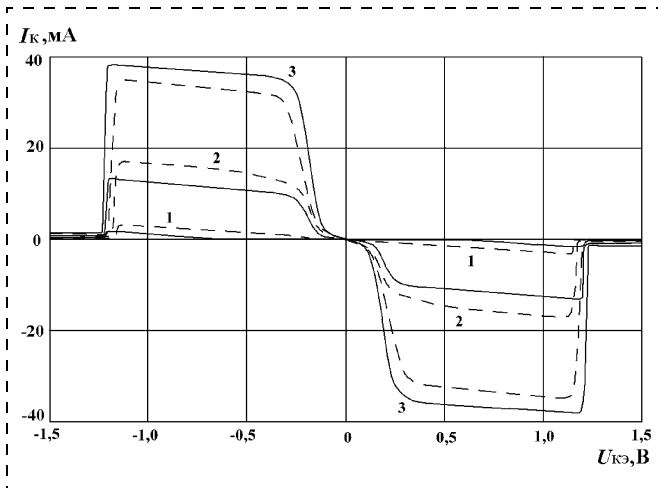


Рис. 6. Выходная ВАХ двухэлектродного биполярно-полевого N -прибора (встречно-параллельное включение) в зависимости от мощности ИК излучения:

1 — 0 мВт; 2 — 20 мВт; 3 — 60 мВт; — — — экспериментальные данные, — — — данные схемотехнического моделирования

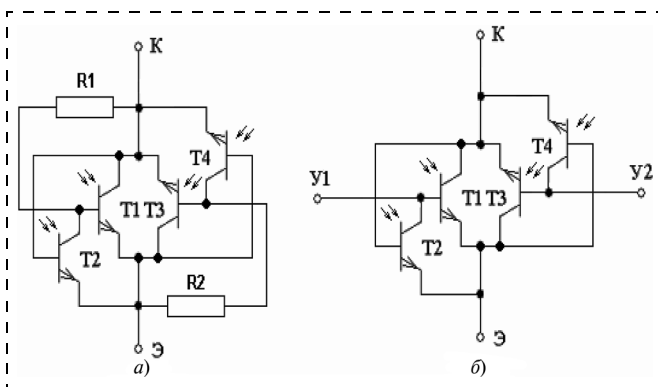


Рис. 7. Схемы замещения биполярных фоточувствительных N -приборов, реализующих симметричную выходную ВАХ (встречно-параллельное включение):

а — двухэлектродный вариант; б — четырехэлектродный вариант

как на положительной ветви ВАХ, так и на отрицательной работают идентичные по параметрам транзисторы, что приводит к симметричности ВАХ при их облучении (рис. 6). Сопротивления резисторов $R1$ и $R2$ составляют 10 кОм.

Недостаточная технологическая совместимость процессов изготовления биполярных и полевых транзисторов является основным недостатком МДП-биполярных негатронов, особенно комплементарных. На основе биполярного N -прибора с шунтированием база-эмиттерного перехода [5] могут быть предложены два варианта схемных решений, с помощью которых возможно получение симметричной N -образной ВАХ. Достоинствами данных схем являются: малое число элементов, простота и дешевизна изготовления, универсальность при реализации двух- и трехэлектродных приборов, возможность управления выходной ВАХ как в сторону увеличения тока максимума N -участка, так и в сторону его снижения посредством управляющего электрического сигнала или оптического излучения.

Первый вариант (рис. 7) симметричного негатрона построен на основе синтеза двух схем замещения биполярного N -прибора с шунтированием эмиттерного перехода, включенных встречно-параллельно.

Преимущество данной схемы заключается в том, что все четыре транзистора идентичны по своей структуре и параметрам.

Выходная ВАХ первого из рассмотренных биполярных N -приборов (рис. 7, а) в зависимости от мощности ИК излучения представлена на рис. 8. Принцип работы биполярного фоточувствительного негатрона с шунтированием эмиттерного перехода рассмотрен подробно в работах [2, 3]. Транзисторы $T1$ и $T2$ работают при токе $I_{KЭ} > 0$, транзисторы $T2$ и $T3$ — при $I_{KЭ} < 0$. При облучении транзисторов $T1$, $T3$ наблюдается рост тока пика выходной ВАХ (рис. 8, а); при облучении транзисторов $T2$, $T4$ наблюдается снижение тока коллектора и полное спрямление N -участка при мощности излучения 35 мВт (рис. 8, б); при облучении всех четырех транзисторов превали-

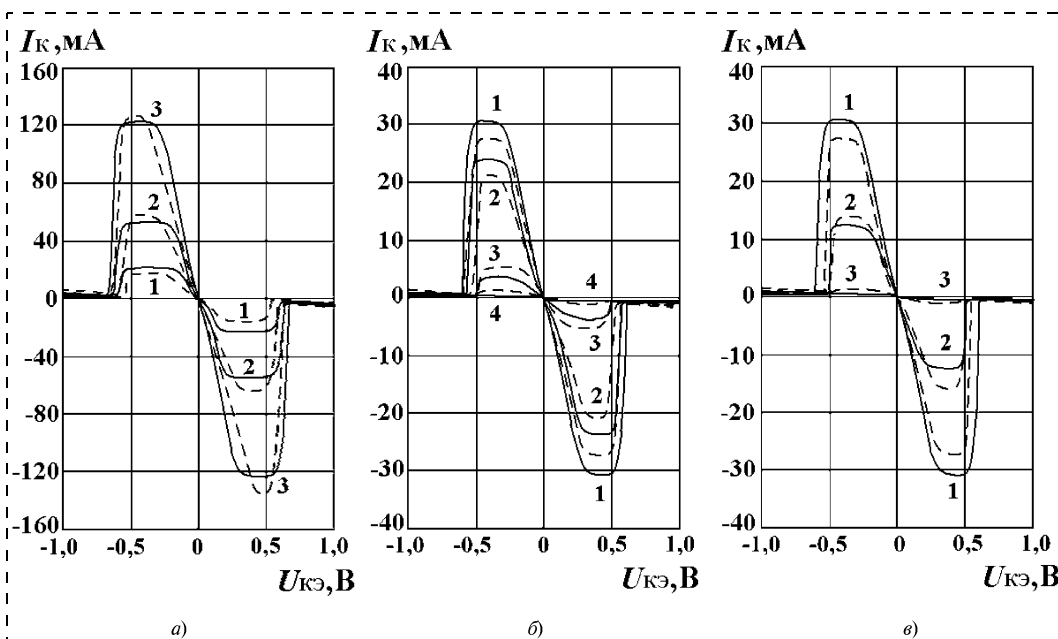


Рис. 8. Выходная ВАХ четырехэлектродного биполярного N -прибора (встречно-параллельное включение) в зависимости от мощности ИК излучения при $I_{Y2} = -0,2$ мА и $I_{Y1} = 0,2$ мА:

а — облучаются транзисторы $T1$ и $T3$ (кривая 1 — 0 мВт; кривая 2 — 30 мВт; кривая 3 — 50 мВт); б — облучаются транзисторы $T2$ и $T4$ (кривая 1 — 0 мВт; 2 — 10 мВт; 3 — 25 мВт; 4 — 35 мВт); в — облучаются транзисторы $T1$ — $T4$: кривая 1 — 0 мВт; 2 — 50 мВт; 3 — 95 мВт; — — — экспериментальные данные, — — — данные схемотехнического моделирования

рует эффект шунтирования (рис. 8, в) и наблюдается полное спрямление N -участка при 95 мВт. Выходная ВАХ второго варианта биполярного двухэлектродного симметричного N -прибора (рис. 7, б), в котором смещение на базовые электроды задается с помощью резисторов R_1, R_2 с сопротивлением 4 кОм, представлена на рис. 9.

Принцип работы этого прибора аналогичен работе четырехэлектродного негatrona, смещение на базовые электроды транзисторов T_1 и T_3 задается с помощью делителей напряжения, образованных резисторами и эмиттерными переходами вышеуказанных транзисторов. При равномерном облучении всех четырех транзисторов наблюдается спрямление N -участка.

Биполярный симметричный N -прибор, образованный встречно-параллельным включением двух негatronов с шунтированием эмиттерного перехода, можно упростить, заменив транзисторы T_1 и T_3 транзистором с близкими коэффициентами усиления в прямом и инверсном режиме работы (рис. 10, а). Первоначально транзисторы T_2 и T_3 , образующие цепь положительной обратной связи, находятся в режиме отсечки. При подаче положительной полярности питающего напряжения на электрод коллектора относительно эмиттера выходную характеристику реализует схема замещения N -прибора, состоящая из транзисторов T_1 и T_2 . Положительное напряжение на коллекторе смещает эмиттерный переход транзистора T_3 в обратном направлении, переводя его в высокоомный режим отсечки, в то время как транзистор T_2 переходит в ак-

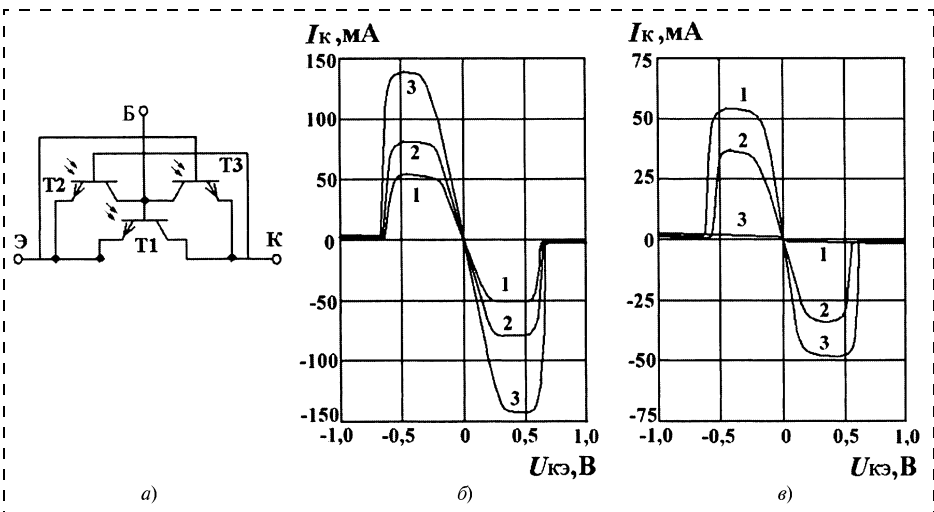


Рис. 10. Выходная ВАХ биполярного фоточувствительного N -прибора в зависимости от мощности ИК излучения при $I_0 = 0,5$ мА, полученная в результате моделирования:

а — схема замещения биполярного N -прибора; б — облучается транзистор T_1 (кривая 1 — 0 мВт; 2 — 20 мВт; 3 — 60 мВт); в — облучаются транзисторы T_2 и T_3 (кривая 1 — 0 мВт; 2 — 20 мВт; 3 — 45 мВт)

тивный режим работы, шунтируя ток базы транзистора T_1 . При облучении транзистора T_1 наблюдается увеличение тока пика N -участка выходной ВАХ: при облучении шунтирующих транзисторов наблюдается снижение тока максимума (рис. 10).

В рассмотренных симметричных N -приборах возможно управление положением тока максимума выходной ВАХ как электрическим, так и оптическим управляющим сигналом. Более перспективными с точки зрения практического применения являются биполярные N -приборы, так как они обладают лучшей фотоуправляемостью по сравнению с МДП-биполярными приборами.

Список литературы

1. Новиков С. Т., Гури́н Н. Т. Схемотехнические аналоги симметричных негatronов // Микросистемная техника. 2004. № 12. С. 27—30.
2. Каштанкин И. А., Гури́н Н. Т. Фоточувствительный кремниевый биполярный N -прибор с управляемой вольт-амперной характеристикой. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 13. С. 46—49.
3. Каштанкин И. А., Гури́н Н. Т. Фоточувствительные кремниевые биполярные N -приборы с управляемой вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 6. С. 39—42.
4. Каштанкин И. А., Гури́н Н. Т. Динамические характеристики фоточувствительных биполярных N -приборов с управляемой вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 10. С. 35—39.
5. Каштанкин И. А., Гури́н Н. Т. Температурные характеристики биполярных N -приборов с управляемой вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 6. С. 41—43.
6. Новиков С. Г., Гури́н Н. Т., Корнеев И. В. Моделирование фотоприемника с отрицательной проводимостью на основе полупроводниковой структуры // Известия вузов. Электроника. 2006. № 4. С. 88—89.
7. Каштанкин И. А., Гури́н Н. Т. N -транзисторные оптроны // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 37—39.
8. Гури́н Н. Т., Каштанкин И. А., Новоселов А. Ю. Моделирование маломощного биполярно-полевого N -транзистора с шунтированием эмиттерного перехода // Известия вузов. Электроника. 2004. № 5. С. 40—45.

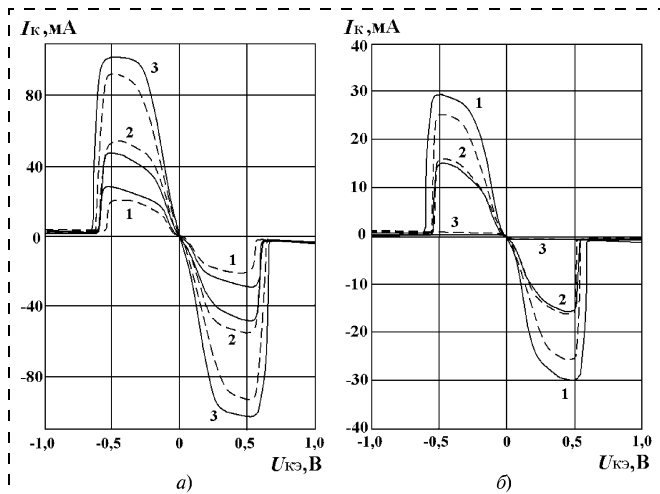


Рис. 9. Выходная ВАХ двухэлектродного биполярного фоточувствительного N -прибора (встречно-параллельное включение) в зависимости от мощности ИК излучения:

а — облучаются транзисторы T_1 и T_3 (кривая 1 — 0 мВт; 2 — 20 мВт; 3 — 50 мВт); б — облучаются транзисторы T_2 и T_4 (кривая 1 — 0 мВт; 2 — 18 мВт; 3 — 37 мВт); - - - - - экспериментальные данные, — — — — — данные схемотехнического моделирования

А. И. Воробьева, канд. техн. наук,
Б. Г. Шулицкий, Е. Л. Прудникова,
 Белорусский государственный университет
 информатики и радиоэлектроники
 E-mail: nil-4-2@bsuir.unibel.by

ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ИЗ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Рассматривается процесс формирования матрицы из анодного оксида алюминия для использования в качестве шаблона при осаждении углеродных нанотрубок. Оксид с высокоупорядоченной структурой имеет размеры пор 10–50 нм, шаг 200–500 нм и аспектное отношение больше 1000.

Введение

Нанопористые матрицы из пленки пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) являются многообещающим кандидатом в качестве стартового материала при создании наноэлектронных приборов [1–4]. Сама заготовка (*template*) представляет собой регулярную матрицу гексагональных ячеек, размер которых можно контролировать, изменяя условия процесса анодирования. Метод дешев, прост в реализации и не наносит ущерба экологии. Кроме того, он не требует использования дорогостоящих оборудования и материалов. Особенно перспективным является использование таких матриц для осаждения массивов углеродных нанотрубок (УНТ) [5–7]. Для формирования названных структур необходимы матрицы с наноразмерными порами и высоким аспектным отношением $n = H_0/d$ (H_0 — толщина оксида, d — диаметр пор). При малом аспектном отношении могут возникнуть проблемы отделения нанотрубок от оксида из-за осаждения углерода на поверхность заготовки.

Кроме малого размера пор и больших значений n для успешного осаждения УНТ желательно получить большие (по сравнению с размерами пор) расстояния между ними, т. е. шаг сетки должен быть почти на порядок больше диаметра пор. В этом случае приемлемыми становятся современные технологические процессы осаждения и разделения углеродных нанотрубок для дальнейших манипуляций отдельными экземплярами. В обычных мезопористых матрицах образуется "губка" из неупорядоченных нанотрубок. Поэтому представляет научный и практический интерес разработка методов формирования пленок регулярного пористого анодного оксида алюминия для осаждения углеродных нанотрубок.

В данной статье рассматривается метод формирования нанопористой матрицы с размером пор 10–50 нм, шагом 200–500 нм и аспектным отношением больше 1000 из пленки самоупорядоченного анодного оксида алюминия для осаждения углеродных нанотрубок.

Методика эксперимента

В качестве подложки использовали алюминиевую фольгу (99,95) толщиной (100 ± 5) мкм размером 30×40 мм. Перед формированием пленки анодного оксида алюминия (ПАОА) заготовки из фольги химически полировали в смеси ортофосфорной и азотной кислот в пропорции 8 : 1. Рабочая температура раствора составляла $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$, время обработки 1 мин при расположении образца под углом 45° . После обработки образец помещался в дистиллированную воду (40°C) с последующей промывкой в проточной воде и сушкой при температуре 90–95 °C в термощафу.

Двухстадийное пористое анодирование Al проводили в трех различных электролитах:

- (I) — 4 %-ный водный раствор ортофосфорной кислоты;
- (II) — 4 %-ный водный раствор щавелевой кислоты;
- (III) — 10 %-ный водный раствор серной кислоты.

Так как диаметр пор в ПАОА увеличивается в ряду H_2SO_4 , $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, H_3PO_4 [8], при формировании нанопористой матрицы с размером пор порядка 10 нм пористое анодирование проводили в 10 %-ном водном растворе серной кислоты. Подробно двухстадийное анодирование описано в работах [9–11].

На первой стадии формировали пористый оксид толщиной порядка 30–40 мкм в высоковольтном режиме. Затем его химически удаляли в селективном травителе состава: 35 мл/л 85 %-ной H_3PO_4 + 20 г/л CrO_3 при температуре $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$. После этого на поверхности фольги оставались отпечатки дна ячеек первичного пористого оксида. Ямки на поверхности пленки алюминия, оставшиеся после селективного химического травления пористого оксида, соответствуют положению дна ячеек пористого оксида и имеют полусферическую форму.

При втором пористом анодировании поры зарождались не хаотически, как на первой стадии, а в местах, соответствующих ячейкам первичного оксида, повторяя размер диаметра ячейки. На второй стадии анодирование можно проводить в обычном режиме.

При анодировании фольги использовали стабилизированный аналоговый источник питания ТЕС 5818 с ограничением тока и напряжения. Напряжение анодирования V_a (SCE) устанавливали с постоянной скоростью развертки в диапазоне 0,05–1,0 В/с в зависимости от типа режима анодирования. Время анодирования на второй стадии определялось толщиной пленки анодного оксида алюминия, температура поддерживалась постоянной с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. При этом плотность тока самопроизвольно устанавливалась постоянной после 10–15 мин от начала процесса анодирования.

В ходе электрохимических процессов проводили синхронную запись изменения параметров анодирования во времени — хроновольтамперометрических (ХВА) диаграмм.

Микроструктуру пористых анодных оксидных пленок (ПАОА) изучали с помощью электронного микроскопа JEM-T6, сканирующих электронных микроскопов JSM-840 и JSM-35 и зондового микроскопа фирмы NT-MDT (Россия) SOLVER P47. Для

проведения комплексных исследований проводили анализ микрорельефа лицевой и обратной поверхности ПАОА и сколов образцов на различных стадиях технологического процесса.

Результаты и обсуждение

Для получения оксида с необходимыми параметрами был разработан специальный режим анодирования. В зарубежной литературе для обозначения этого режима используется аббревиатура *HA* (*high field anodization*) — анодирование при высокой напряженности электрического поля. Такое же обозначение используется для идентификации другого широко используемого в промышленности метода *HA* (*hard anodization*) — анодирование в жестком режиме. В первом случае прикладывается высокое напряжение (потенциостатический режим), поэтому этот режим можно назвать *высоковольтным* [12, 13]. Во втором случае используются большие плотности тока — гальваностатический режим. В обоих случаях создаются жесткие условия анодирования, которые значительно отличаются от обычного режима анодирования *MA* (*mild anodization*) — анодирование в умеренном режиме. Так как публикаций на эту тему в отечественных изданиях не обнаружено, будем использовать обозначение *HV* (*high voltage anodization*) — "HV-режим", чтобы отличить этот режим от *HA* (*hard anodization*) режима.

Отличительной особенностью "HA-режима" является высокая скорость анодирования. Начиная с 60-х годов, его широко использовали в промышленных целях для получения механически прочных, толстых (> 100 мкм) и низкопористых пленок оксида алюминия. Однако в микро- и нанoeлектронике этот режим не использовался, так как ПАОА, полученные в этом режиме, имеют неупорядоченную, нерегулярную структуру. И только в последнее время появились работы, в которых описываются возможности использования преимуществ этого режима в целях получения упорядоченных пористых матриц, которые можно использовать в новых техно-

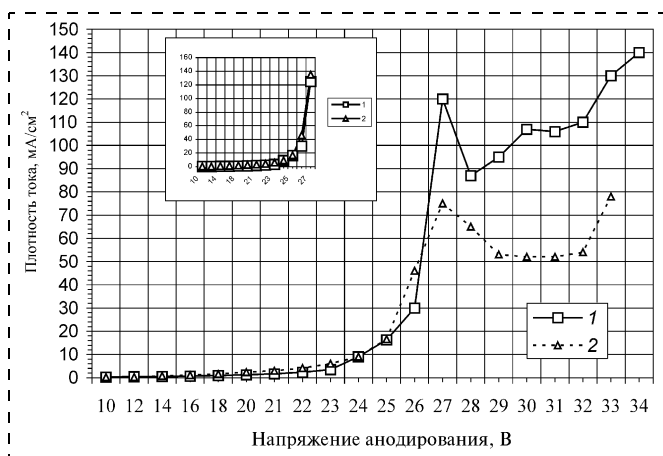


Рис. 1. Зависимость плотности тока от напряжения и температуры при анодировании Al фольги в сернокислотном электролите: 1 — при температуре электролита 0 °C; 2 — при температуре электролита 6 °C в "HV-режиме". На вставке показаны те же зависимости для "MA-режима"

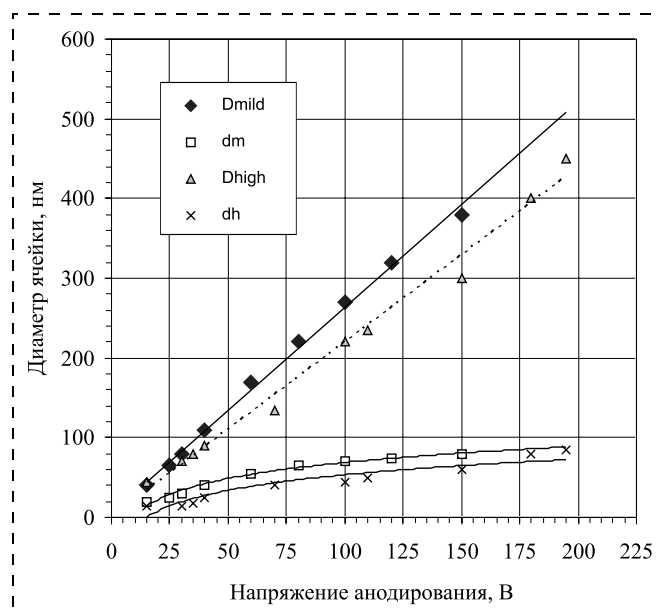


Рис. 2. Зависимость диаметра ячейки (D) и диаметра пор (d) от напряжения анодирования в "MA" (D_{mild} , d_m) и "HV" (D_{high} , d_h)-режимах

гических процессах. К таким процессам и относится "HV-режим" анодирования.

На рис. 1 представлены зависимости плотности тока от напряжения и температуры при анодировании Al фольги в сернокислотном электролите (1) — при температуре электролита 0 °C, 2 — при температуре электролита 6 °C в "HV-режиме". На вставке показаны те же зависимости для "MA-режима". Аналогичные зависимости, полученные для двух других электролитов, имеют идентичный характер. Из приведенных зависимостей видно, что диапазон напряжений можно расширить более, чем в 2 раза, а плотности тока увеличить на порядок. Причем, чем меньше температура электролита, тем большую плотность тока можно получить. Из этих зависимостей также следует, что до выхода на высоковольтный режим сначала на поверхности подложки необходимо сформировать оксид в обычном режиме в течение 5–10 мин, пока плотность тока не станет постоянной. Затем с очень низкой скоростью порядка 0,05 В/с напряжение разворачивается до нужного значения, при этом плотность тока принимает новое постоянное значение.

Установлено, что в "HV-режиме" размер ячейки является линейной функцией напряжения анодирования (V_a) и, кроме того, зависит от типа электролита или постоянного анодирования, как и в случае "MA-режима". Диаметр поры определяется в основном типом электролита и почти не зависит от напряжения анодирования. Сравнительные экспериментальные результаты приведены на рис. 2.

Основные параметры пористой матрицы (диаметр ячейки D и диаметр пор d) и их соотношения для различных условий анодирования приведены в табл. 1.

В табл. 1 жирным шрифтом выделены параметры "HV-режима" анодирования, позволяющего полу-

Основные параметры пористой матрицы и их соотношения для различных условий анодирования

Электролит	V_a , В	T , °С	D , нм	d , нм	p^* , %	D/d	D/V_a
4 % H_3PO_4	60	19	170—180	55—60	10	2,8	2,8
	80	19	220—240	60—70	10	2,8	2,8
	100	19	240—280	70—75	8,5	3,2	2,8
	150	18	350—380	80—90	4,5	4,3	2,3
	180	4,0	400—420	80—90	3,7	4,8	2,3
4 % $H_2C_2O_4$	30	19	80—100	30—40	12	2,8	2,8
	40	19	100—120	30—40	10	2,8	2,8
	100	4,0	220—230	40—50	3,4	4,6	2,3
10 % H_2SO_4	12	19	30—40	15—20	14	2,7	2,9
	14	10	40—50	10—15	12	2,7	2,9
	15	19	40—50	15—20	12	2,7	2,9
	25	18	65—70	20—25	7,0	2,9	2,8
	30	1,0	60—70	15—20	6,0	3,8	2,2
	34	0	75—80	15—20	4,3	4,6	2,3

* Пористость p определяли по методике, описанной в [12].

чить нанопористый оксид алюминия с большими значениями отношения D/d .

Из рис. 2 и табл. 1 видно, что наклон зависимости D от V_a (и значения отношения D/V_a) в "HV-режиме" уменьшаются, а значения D/d увеличиваются примерно в 1,5 раза. Этот результат позволяет определить возможные пути получения нанопористого оксида алюминия с большими значениями отношения D/d .

Как ранее было показано [14], основные структурно-морфологические параметры (геометрические размеры) пористого оксида пропорциональны только одному саморегулирующемуся параметру — толщине барьерного слоя на дне пор в устойчивом состоянии, т. е. толщине барьерного слоя полностью формованного оксида. Толщина барьерного слоя в пористой пленке является функцией приложенного напряжения и в процессе анодирования остается практически неизменной и пропорциональной постоянной анодирования в данном электролите. Размер ячейки D также является линейной функцией напряжения формовки и, кроме того, зависит от типа электролита и постоянной анодирования. Диаметр поры d определяется типом электролита и незначительно зависит от его температуры. Поэтому в "HV-режиме" диаметр пор несколько ниже, чем в "МА-режиме" при тех же напряжениях. Толщина оксида H_o определяется, как известно, временем анодирования и плотностью тока.

Таким образом, для того чтобы получить пористую матрицу с малым размером пор и большим диаметром ячейки (большим шагом пористой матрицы), анодирование необходимо проводить при низких температурах и при большом напряжении анодирования (см. табл. 1). А для получения самоупорядоченного оксида с большим аспектовым отношением (H_o/d) требуется либо большое время анодирования в "МА-режиме", либо большие напряжения в "HV-режиме".

Диаметр ячейки D пористого оксида оценивался по фотографиям поверхности и определялся расчетным путем по формуле:

$$D = (d + 2V_a k_a),$$

Таблица 2

Параметры процесса анодирования в "МА-режиме"

Электролит	Постоянная анодирования, нм/В	Оптимальное напряжение анодирования, В	Максимальное напряжение анодирования, В
4 % H_3PO_4	0,95—1,0	90 ± 5	160 ± 5
4 % $H_2C_2O_4$	0,95—1,0	40 ± 5	55 ± 5
10 % H_2SO_4	0,85—0,90	15 ± 2	20 ± 2

где d — диаметр поры; V_a — напряжение анодирования; k_a — постоянная анодирования.

Постоянную анодирования k_a (табл. 2) определяли по толщине стенки ячейки, которая в процессе анодирования электрохимически не растворяется, в отличие от дна ячейки. Для исследуемых электролитов она равна ($0,9 \pm 0,05$) нм/В при оптимальных напряжениях анодирования и температуре электролита 18 °С ("МА-режим") [15]. Диаметр пор d также определяли по микрофотографиям поверхности тестовых образцов. Экспериментальные и расчетные значения геометрических параметров пористой матрицы приведены в табл. 1 для образцов, полученных с трех циклов измерений.

Из приведенных данных видно, что для получения матрицы с большим шагом и малыми размерами пор необходимо не только выбрать подходящий электролит, но проводить процесс при высоких напряжениях. Однако известно, что для каждого электролита имеется максимально возможное значение напряжения анодирования (табл. 2), выше которого происходит пробой оксида или выгорание пленки под контактом [16]. Кроме того, с повышением напряжения при прочих равных условиях повышается и плотность тока анодирования, и температура электролита. Например, при повышении напряжения всего на несколько вольт относительно максимального значения для данного электролита плотность тока увеличивается в 5 и более раз, как показано на рис. 3. Логично предположить, что необходимо по-



Рис. 3. Зависимость плотности тока от напряжения при анодировании Al фольги в фосфорнокислом (1), щавелевокислом (2) и сернокислом (3) электролитах (при прочих равных условиях и температуре электролита 6 °С)

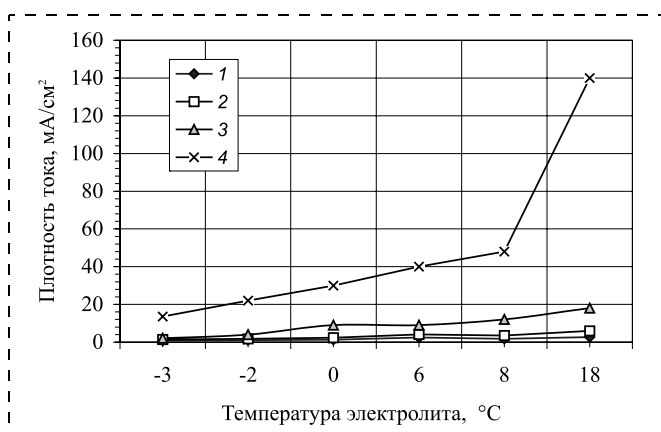


Рис. 4. Зависимость плотности тока анодирования от температуры электролита при анодировании Al фольги в сернокислом электролите:

при напряжении анодирования: 1 — 20 В; 2 — 22 В; 3 — 24 В; 4 — 26 В

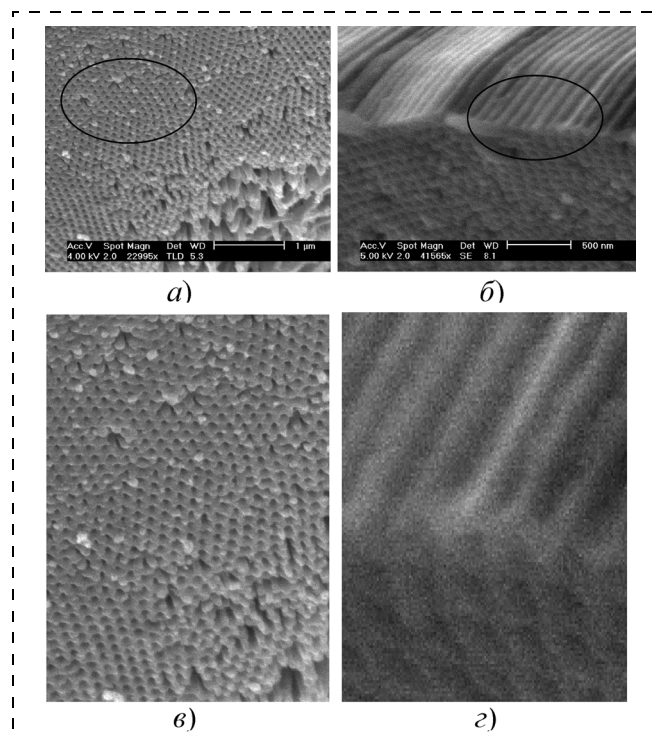
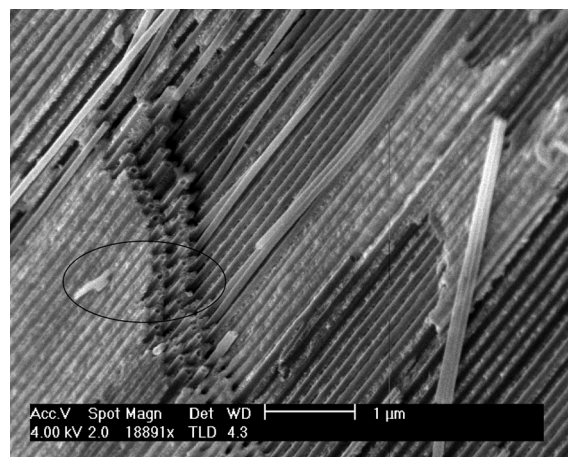
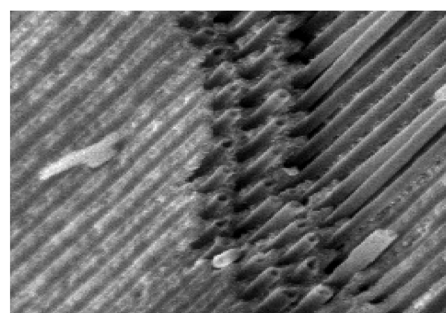


Рис. 5. Фотографии поверхности (а) и поперечного сечения (б) ПАОА, сформированной в "HV-режиме" во II электролите; в) и г) — увеличенное изображение участков, обозначенных овалом



а)



б)

Рис. 6. Фотографии скола (а) ПАОА со встроенными углеродными нанотрубками; б) — увеличенное изображение участка, обозначенного овалом

низить температуру проведения процесса. Поэтому были проведены исследования процессов анодирования при повышенных напряжениях и низких температурах. На рис. 4 показаны зависимости плотности тока анодирования от температуры электролита при анодировании Al фольги в сернокислом электролите. На рисунке видно, что при переходе к высоковольтному режиму ($V_a \geq 26$ В) температурная зависимость становится явно выраженной, поэтому даже незначительное изменение напряжения вызывает почти бесконтрольное увеличение плотности тока. В этом состоит особенность "HV-режима" анодирования. Выход на этот режим требует изменения скорости развертки напряжения при приближении к напряжению пробоя, характерного для "МА-режима", до минимальной.

На рис. 5 показаны фотографии поверхности и поперечного сечения ПАОА, сформированной в "HV-режиме" во II электролите, имеющей аспектовое отношение 1500 и диаметр пор ~ 30 нм ($H_0 = 45$ мкм). На рис. 6 показаны фотографии скола ПАОА со встроенными в него углеродными нанотрубками. Следует отметить, что время формирования оксида в "HV-режиме" в три и более раз меньше, чем в обычном "МА-режиме". На фотографиях видно, что в матрице, полученной в разработанном режиме, образуются массив упорядоченных углеродных нанотрубок.

Заключение

Разработан метод формирования нанопористых матриц из упорядоченного оксида алюминия, пригодных для получения массивов углеродных нанотрубок и других композиционных наноматериалов [14, 17]. Отличительной особенностью "HV-режима" является то, что несмотря на высокую скорость анодирования оксид получается упорядоченным. Сущность данного метода заключается в том, что первая стадия двухслойного анодирования проводится в высоковольтном режиме, причем сначала формируется обычный оксид небольшой толщины, который служит буферным слоем при дальнейшем выходе на "HV-режим". Вторую стадию анодирования можно проводить в любом режиме, позволяющем получить упорядоченный оксид. С технологической точки зрения "HV-режим" является предпочтительным, так как позволяет получить высококачественный упорядоченный оксид значительно быстрее.

Комбинируя "HV- и МА-режимы", можно изготовить образцы матриц из пористого оксида алюминия со следующим диапазоном основных регулируемых параметров:

- диаметр пор (d) — от 10 до 50 нм (регулируется типом электролита и температурой режима анодирования);
- аспектное отношение (n) — от 1 до 1500 ("HV-режим"), регулируется толщиной оксида алюминия и отношением высоты пор к диаметру пор;
- диаметр ячейки (D — шаг пористой матрицы) — от 200 до 500 нм ("HV-режим"), регулируется напряжением анодирования;
- пористость, p — 10–40 % ("МА-режим") и 3,0–4,5 ("HV-режим").

На основе пористого оксида алюминия, сформированного в разработанном режиме, получены массивы упорядоченных углеродных нанотрубок методом осаждения из газовой фазы.

Список литературы

1. **Davydov D. N., Sattari P. A., Almawlawi D.** et al. Field emitters based on porous aluminum oxide templates // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 86. P. 3983–3987.
2. **Martin C. R.** Nanomaterials: A membrane-based synthetic approach // *Science*. 1994. V. 266. P. 1961–1966.

3. **Simonds J. L.** Magnetoelectronics today and tomorrow // *Phys. Today*. 1995. V. 48. P. 26.
4. **Pas B., McGinnis S. P.** Novel template-based semiconductor nanostructures and their applications // *Appl. Phys. A*. 2000. V. 71. P. 681–688.
5. **Yin. A., Li. J.** et al. Fabrication of highly ordered metallic nanowire arrays by electrodeposition // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 79 (7). P. 1039.
6. **Kashi M. A., Ramazani A.** The effect of temperature and concentration on the self-organized pore formation in anodic alumina // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. P. 2396–2399.
7. **Slaughter J. M., Chen E. Y.** et al. Magnetic Tunnel Junction Materials for Electronic Applications // <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0006/Slaughter/0006.html>. P. 1–12.
8. **Одынец Л. Л., Орлов В. М.** Анодные оксидные пленки. Л.: Наука. 1990. 200 с.
9. **Masuda H., Fukuda K.** Ordered Metal Nanohole Arrays Made by a Two-Step Replication of Honeycomb Structures of Anodic Alumina // *Science*. 1995. № 268 (9). P. 1466–1468.
10. **Vorobyova A., Outkina E.** Study of pillar microstructure formation with anodic oxides // *Thin Solid Films*. 1998. V. 324. P. 1–10.
11. **Sokol V., Vorobyova A., Outkina E.** SEM investigation of pillared microstructures formed by electrochemical anodization // *Applied Physics A*. 1998. V. 67. P. 487–492.
12. **Woo Lee, Ran L. I., Ulrich Gösele** et al. Fast fabrication of long-range ordered porous alumina membranes by hard anodization // <http://www.nature.com/naturematerials> / Advance Online Publication. P. 1–7.
13. **Сокол В. А., Воробьева А. И., Уткина Е. А.** Формирование нанопористой матрицы анодного оксида алюминия // Доклады БГУИР. 2006. № 5. С. 62.
14. **Воробьева А. И., Уткина Е. А.** Получение тонких пористых оксидов алюминия с регулярной упорядоченной структурой // *Микроэлектроника*. 2005. Т. 34. № 2. С. 125–134.
15. **Анодные окисные покрытия на легких сплавах** / Под общ. ред. И. Н. Францевича. Киев: Наукова думка. 1977. 258 с.
16. **Воробьева А. И.** Кинетические особенности формирования столбиковых микроструктур методом анодного оксидирования // *Микроэлектроника*. 2001. Т. 30. № 6. С. 445–548.
17. **Воробьева А. И., Драпеза А. И., Судник Ю. М.** и др. Композитные материалы на основе нанопористого оксида алюминия для чувствительных элементов биочипов // Тез. докл. республ. научной конф. "Медэлектроника 2006". Минск, 12–13 декабря 2006.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 681.586'326

А. И. Галушков¹, канд. техн. наук,
И. В. Годовицын¹, канд. техн. наук,
С. Ю. Краснобородько², А. А. Тихомиров²

¹НПК "Технологический Центр"

Московского государственного института
электронной техники"

²ЗАО "Нанотехнология МДТ", г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

Представлены результаты исследований конструктивно-технологических параметров поликремниевой кольцевой диафрагмы интегрального емкостного преобразователя давления с использованием полуконтактного режима сканирующей атомно-силовой микроскопии. Показано, что экспериментально полученные зависимости прогиба диафрагмы от давления позволяют адекватно рассчитать абсолютную чувствительность преобразователя давления емкостного типа, а также могут быть использованы для расчета и уточнения механических параметров тонких диафрагм, которые необходимы для настройки и калибровки приборно-технологических моделей микромеханических элементов.

В настоящее время преобразователи давления широко используются в автомобильной, авиационной, нефтегазовой промышленности, машиностроении, коммунальном хозяйстве, медицине [1]. Емкостные преобразователи давления имеют ряд преимуществ перед тензорезистивными преобразователями, в частности, высокую чувствительность, высокую температурную стабильность, малые размеры. Изготовление емкостного преобразователя давления по технологии поверхностной микрообработки позволяет достичь высокой степени миниатюризации и сочетать формирование чувствительного элемента, а также схемы обработки и преобразования сигнала в едином технологическом цикле [2–4]. При этом, однако, требуется использование диэлектрических слоев (поликремний, нитрид кремния) с низкими механическими напряжениями, которые могут быть сформированы только с применением специальных технологических процессов.

В НПК "Технологический центр" МИЭТ разработан и изготовлен интегральный емкостный преобразователь давления с использованием стандартных технологических процессов КМОП-технологии, до-

полненных процессами поверхностной микрообработки. Структура преобразователя приведена на рис. 1.

Преобразователь представляет собой кольцевую поликремниевую диафрагму, жестко закрепленную по внутреннему и внешнему радиусам и отделенную от подложки пространственным зазором. Диафрагма служит подвижной обкладкой конденсатора, подложка служит неподвижной обкладкой. Толщина диафрагмы составляет 1 мкм, внутренний радиус диафрагмы — 20 мкм, зазор между обкладками — 1 мкм. Внешний радиус диафрагмы варьируется для получения требуемой чувствительности путем изменения параметров конструкции и технологических процессов.

Кристалл преобразователя имеет габаритные размеры 2 × 2 мм. На кристалле расположено 16 диафрагм, чувствительных к давлению, и 16 диафрагм, имеющих постоянную емкость. Диафрагмы обоих типов соединены между собой параллельно. Наличие постоянной емкости на кристалле облегчает реализацию дифференциальной схемы обработки сигнала. Фотография кристалла преобразователя приведена на рис. 2.

Исходным материалом для изготовления преобразователя служит подложка монокристаллического кремния *n*-типа. На подложке последовательно формируются жертвенный и структурный слои. Ключе-

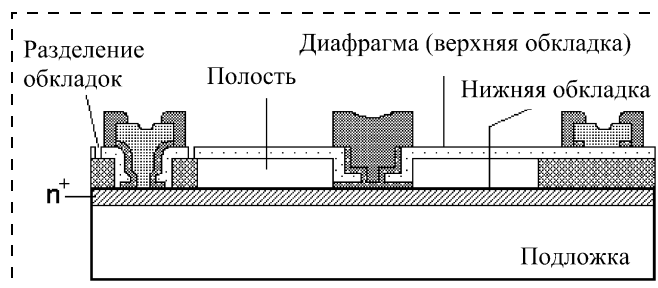


Рис. 1. Структура чувствительного элемента емкостного преобразователя давления

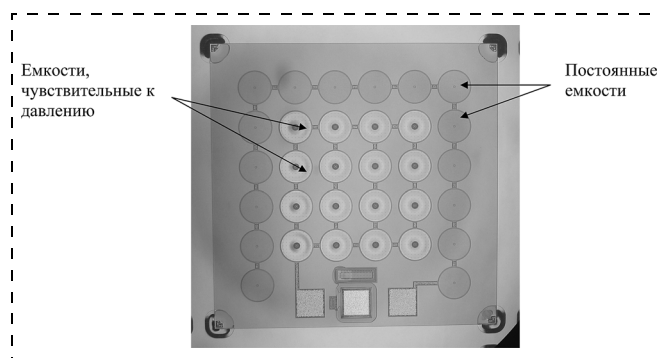


Рис. 2. Кристалл емкостного преобразователя давления

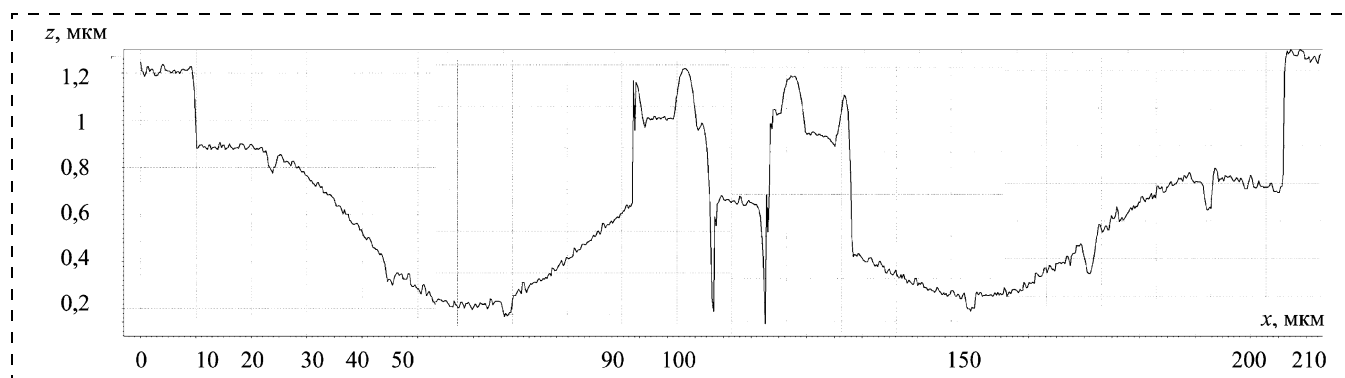


Рис. 4. Профилограмма сечения через центр диафрагмы:

z — высота рельефа; x — расстояние от края диафрагмы по центральной линии сканирования

вой операцией технологического маршрута является вытравливание жертвенного слоя и запечатывание отверстий, через которые вытравливался жертвенный слой, с помощью осаждения слоя диэлектрика толщиной 0,3...0,5 мкм. В результате этой операции формируется анероидная коробка преобразователя. Давление в анероидной коробке определяется давлением в реакторе осаждения диэлектрических слоев и обычно составляет 10...20 Па, что позволяет использовать чувствительный элемент в качестве преобразователя абсолютного давления.

Так как диафрагма, внешний радиус которой для данного конструктивного варианта составляет около 90 мкм, служит подвижной обкладкой конденсатора, а подложка — неподвижной, то одной из актуальных задач является определение прогиба диафрагмы преобразователя. Информация о профиле диафрагмы позволяет прогнозировать чувствительность датчика к изменениям атмосферного давления. Однако поскольку диафрагма является сверхтонкой, исследовать ее профиль известными средствами, например с использованием традиционного контактного профилометра, практически невозможно, так как любое механическое воздействие меняет первоначальный характер прогиба, вплоть до разрушения микроstructures.

Как известно [5], для исследования геометрии наноразмерных структур широко используют методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), так как они обеспечивают возможность исследования и диагностики свойств поверхности твердых тел с высоким разрешением, а также позволяют измерять с высокой точностью их размеры. Наиболее используемым методом СЗМ является атомная силовая микроскопия (АСМ). В АСМ имеется ряд режимов исследования, в частности полуконтактный, в котором механическое воздействие на исследуемую поверхность потенциально можно свести практически к нулю (сила воздействия на поверхность образца составляет 10^{-12} Н). АСМ была использована для исследования конструктивных элементов интегрального емкостного преобразователя давления, что обеспечило возможность измерения с высоким разрешением (менее 1 нм) прогиба поверхности субмикронной поликремниевой диафрагмы, а также позволило с высокой точностью измерить геометри-

ческие параметры конструкции преобразователя. Измерения были проведены с использованием прибора "Ntegra Prima" производства компании ЗАО "Нанотехнология МДТ". Единственным ограничением при применении существующей АСМ для исследования геометрии микрообъектов является ограниченное поле сканирования (до 50...100 мкм). Но данная проблема решаема. Для получения изображения всей микроstructures были сделаны сканы ее отдельных фрагментов, которые в дальнейшем "сшивались" для получения суммарной картины изображения.

На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) показан внешний вид микромембранной структуры преобразователя давления, сложенный из четырех отдельных ее фрагментов, полученных с применением полуконтактного режима АСМ.

На рис. 4 приведена профилограмма исследуемой поверхности поликремниевой диафрагмы субмикронной толщины, измеренная по центральной линии сканирования (см. рис. 3). Как следует из представленных результатов, диафрагма имеет сложный профиль, максимальный ее прогиб составляет 0,7 мкм. Из данной профилограммы можно определить реальные координаты каждой точки кривой, а следовательно, стал достижимым вывод математического

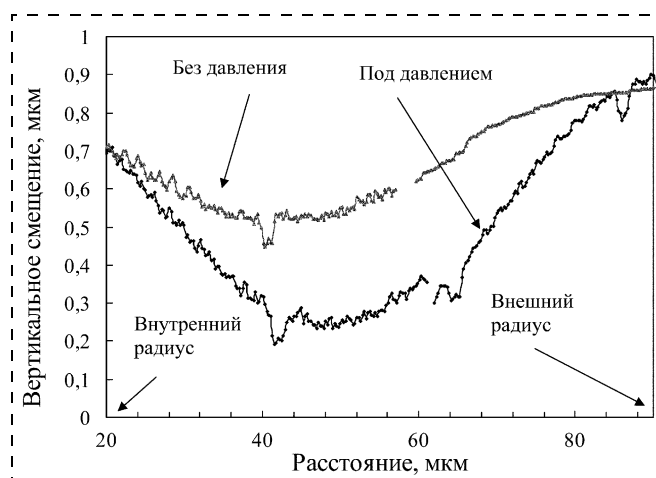


Рис. 5. Результаты измерения прогиба кольцевой диафрагмы с помощью метода АСМ

закона, по которому прогибается поликремниевая диафрагма, с учетом конкретных геометрических параметров конструкции и свойств материалов.

На рис. 5 приведены обработанные результаты измерений прогиба поликремниевой кольцевой диафрагмы с помощью АСМ. Измерения проводились при атмосферном давлении (т. е. после завершения изготовления преобразователя) и без давления. Точное значение атмосферного давления в день измерения прогиба с помощью АСМ определялось по метеорологическим данным. Измерения прогиба без давления проводились на том же образце преобразователя после нарушения герметичности анероидной коробки.

Как можно видеть (рис. 5), присутствует начальная деформация диафрагмы, обусловленная остаточными, встроенными механическими напряжениями, значение прогиба диафрагмы под давлением существенно больше, чем без давления, внутренний и внешний радиусы диафрагмы располагаются на разной высоте.

По экспериментально полученной зависимости прогиба диафрагмы от давления была проведена оценка абсолютной чувствительности преобразователя давления емкостного типа, значение которой составило около 22 фФ/кПа, что достаточно хорошо согласуется с результатами измерений чувствительности экспериментальных образцов (19...20 фФ/кПа).

На основании анализа результатов измерений можно также сделать вывод о целесообразности дальнейшей оптимизации технологии изготовления

преобразователя с целью устранения начального прогиба диафрагмы.

Полученные данные могут быть использованы для расчета и уточнения механических параметров (модуль Юнга, значение и градиент встроенных механических напряжений и т. п.) тонких диафрагм преобразователей давления емкостного типа, которые необходимы для настройки и калибровки приборно-технологических моделей.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты демонстрируют большие возможности использования АСМ для исследования не только наноразмерных, но и микроразмерных структур.

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ (грант № 05-02-08109 офи_n).

Список литературы

1. Eaton W. P., Smith J. H. Micromachined pressure sensors: review and recent developments // Smart Materials and Structures. 1997. № 6. P. 530—539.
2. Dudaicevs H., Kandler M., Manoli Y. et al. Surface micromachined pressure sensor with integrated CMOS read-out electronics // Sensors and Actuators. 1994. Vol. A43. P. 157—163.
3. Rey P., Charvet P., Delaye M. T., Abou Hassan S. A high density capacitive pressure sensor array for fingerprint sensor application // Solid State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '97 Chicago, 1997. Vol. 2. P. 1453—1456.
4. Hierold C., Clasbrummel B., Behrend D. et al. Implantable low power integrated pressure sensor system for minimal invasive telemetric patient monitoring // Proc. IEEE 11 Ann. Int. Workshop on MEMS 98. Heidelberg, Germany, 25—29 January 1998. P. 568—573.
5. Нанотехнологии в электронике / Под. ред. Ю. А. Чаплыгина М.: Техносфера, 2005. 448 с.

УДК 621.38.049.76

В. М. Колешко, д-р техн. наук,
А. В. Гулай, канд. техн. наук, **В. А. Гулай**,
Белорусский национальный технический
университет

ТУННЕЛЬНЫЕ МДМ-НАНОСЕНСОРЫ: СТРАТЕГИИ И ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведен комплексный анализ проблемы аналитического моделирования туннельных сенсорных МДМ-наноструктур (металл—диэлектрик—металл) и наносенсоров на их основе. Рассмотрены характерные особенности различных уровней моделирования данных наносенсоров: системного, функционального, информационного, схемотехнического, энергетического, механического, квантового. Для каждого уровня моделирования представлены аналитические модели, отражающие основные физико-химические параметры туннельных сенсорных МДМ-наноструктур, а также функциональные свойства МДМ-наносенсоров.

Перспективы применения туннельных МДМ-наноструктур (металл—диэлектрик—металл) на основе сверхтонких диэлектрических пленок (в частности, ок-

сидов редкоземельных металлов) в качестве чувствительных элементов сенсорных систем требуют всестороннего исследования свойств указанных наноструктур. Для этого проводится комплексное моделирование туннельных МДМ-наноструктур, основанное на представлении их в виде физических объектов, систем и схем разного уровня анализа и расчета [1—3]. Аналитическое моделирование многослойных МДМ-наноструктур и сенсорных МДМ-наносистем эффективно дополняет экспериментальные методы исследования параметров элементов изучаемых наносенсоров [4—7].

Многокритериальный подход к проблеме моделирования туннельных МДМ-наносенсоров

Аналитические уровни моделирования принимаются с учетом особенностей, ограничений и допущений, характерных для каждого из рассматриваемых на этих уровнях объектов (как элементов туннельных МДМ-наносенсоров), а также с учетом некоторых общих свойств МДМ-наноструктур. Такой подход к проблеме моделирования дает возможность интеграции отдельных схем, разрабатываемых на разных уровнях аналитики, и получения совокупности высокоинформативных обобщенных моделей конкретного объекта. При разработке моделей учитыва-

ется ряд особенностей МДМ-наноструктур, проявляющихся при использовании в качестве материала туннельнотонкого барьерного слоя соединений переходных (в том числе редкоземельных) металлов.

Многокритериальный подход к изучению сенсорных МДМ-наноструктур обуславливает предложение гаммы моделей, характеризующих основные физические свойства объекта исследования. К моделируемым свойствам туннельных МДМ-наноструктур и сенсорных систем на их основе относятся, например:

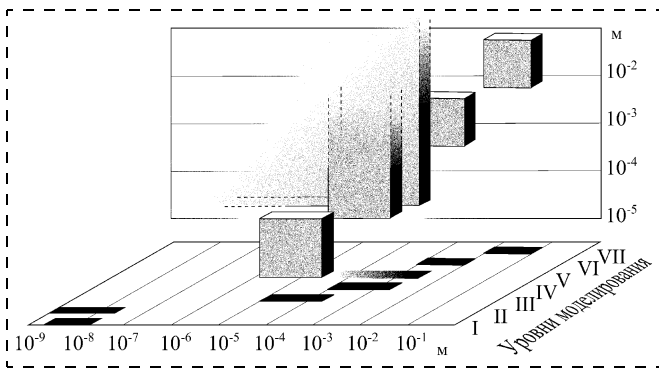
- условия токопереноса в туннельнотонком слое диэлектрика многослойной системы металл—диэлектрик—металл и характер проводимости сенсорной МДМ-наноструктуры;
- искажения кристаллической решетки диэлектрика при переходе к наномасштабным размерам по толщине и влияние их на параметры МДМ-наноструктур и наносенсоров;
- возникновение областей отрицательного дифференциального сопротивления и нелинейность характеристик МДМ-наноструктур, обусловленные параметрами сверхтонкого диэлектрика;

- механизмы генерации электрических шумов в многослойных МДМ-наноструктурах и диапазон чувствительности МДМ-наносенсора на основе туннельного эффекта;
- механизмы электрических потерь в туннельных МДМ-наноструктурах и эффективность преобразования внешних воздействий в выходной сигнал МДМ-наносенсора;
- конкретные реализации наносенсоров на основе МДМ-наноструктур для контроля различных физических параметров (особенно в экстремальных условиях применения);
- формирование распределенных сенсорных МДМ-наносистем: одномерных (сенсорных линеек), двумерных (сенсорных матриц и полей), трехмерных (сенсорных модулей и оболочек), а также пространственных сенсорных сетей.

Рассмотренные свойства туннельных МДМ-наноструктур и наносенсоров на их основе представлены в таблице в виде иерархического ряда уровней аналитического моделирования. Размерность элементов сенсорных МДМ-наноструктур как объектов моделирования, представленных на разных уровнях

Иерархия уровней моделирования туннельных МДМ-наносенсоров

Уровень анализа модели	Характеристика уровня: рассматриваемое явление, эффект	Объект (система) моделирования	Привлекаемые теории, анализируемые модели
VII Системный	Сенсорный контроль физических полей	Матрица туннельных МДМ-наноструктур как автоволновая сенсорная среда	• Теория открытых неравновесных систем; • теория нелинейных волновых процессов; • теория распознавания информационных образов
VI Функциональный	Зависимости параметров туннельных МДМ-наносенсоров от внешних воздействий	• Наносенсоры многокомпонентных газов; • широкодиапазонные термонаносенсоры; • наносенсоры высокоскоростных микрочастиц и др.	• Уравнения электродинамики и гидродинамики; • уравнения состояния металла и диэлектрика; • теория электроадсорбции и электрокатализа
V Информационный	Точность преобразования входной физической величины в изменение параметров туннельного МДМ-наносенсора	Туннельная МДМ-наноструктура как элемент входной цепи системы обработки информации	Динамические характеристики: • во временной области; • в частотной области; • в области комплексной частоты
IV Схемотехнический	Характеристики электрической схемы на основе туннельной сенсорной МДМ-наноструктуры	Эквивалентная электрическая схема МДМ-наноструктуры с отрицательной дифференциальной проводимостью	• Эквивалентная электрическая схема наноструктуры; • распределенные электрические параметры проводников; • формирование отрицательной дифференциальной проводимости; • теория нелинейных электрических колебаний
III Энергетический	Энергетическая эффективность преобразования входного воздействия туннельным МДМ-наносенсором	Туннельная МДМ-наноструктура как чувствительный элемент сенсорной системы	• Условия согласования; • характеристики преобразования; • чувствительность по входу; • шумовые свойства
II Механический	Внесение анизотропии в механические свойства диэлектрического слоя МДМ-структуры за счет его наноразмера	Сверхтонкая диэлектрическая пленка МДМ-наноструктуры в виде наноразмерного кристалла	• Континуальная теория упругости; • метод молекулярной динамики; • учет масштабных эффектов
I Квантовый	Механизмы токопереноса в сенсорной МДМ-наноструктуре	Сверхтонкая диэлектрическая пленка МДМ-наноструктуры как потенциальный барьер для электронов проводимости	• Теория туннельного эффекта; • теория электронной эмиссии; • теория пробоя диэлектрика; • теория фазового перехода



Масштаб элементов сенсорных МДМ-наноструктур на разных уровнях иерархии аналитических моделей

иерархического ряда аналитических моделей, показана на рисунке.

Анализ технологии моделирования параметров туннельных сенсорных МДМ-наноструктур

При использовании диэлектрических слоев наномасштабной толщины на первый план в процессе моделирования туннельной МДМ-наноструктуры выходят ее квантовые свойства. **Квантовый уровень** моделирования предполагает изучение туннельной МДМ-наноструктуры как потенциального барьера для носителей заряда, образуемого диэлектрической пленкой, и изменения параметров барьера при разных внешних воздействиях. Моделирование процесса токопереноса выполняется, например, в предположении, что проводимость МДМ-наноструктуры определяется облегченной электрическим полем эмиссией электронов над барьером на границе раздела металл—диэлектрик. Данный эффект связан с термической активацией и приводит к выражению для тока через МДМ-наноструктуру в виде

$$I = AT^2 \exp\{-[\Delta_0/(kT) - \alpha(E^{1/2}/kT)]\}, \quad (1)$$

где A — эффективная постоянная Ричардсона; T — абсолютная температура; Δ_0 — высота потенциального барьера; k — постоянная Больцмана; α — коэффициент; E — напряженность приложенного электрического поля [8].

Для этого случая характерна линейная зависимость между параметрами, включающими ток I через МДМ-контакт и напряжение U на нем: $\ln(I) \sim U^{1/2}$. Линейная аппроксимация экспериментальной зависимости между данными параметрами позволяет определить взаимосвязь электрических характеристик МДМ-наноструктуры и ее топологии:

$$\begin{aligned} \ln(I) &= C + BU^{1/2}; \quad R = U/\exp(C + BU^{1/2}); \\ R &= [\ln(I) - C]^2/B^2I, \end{aligned} \quad (2)$$

где B , C — коэффициенты, зависящие от параметров диэлектрического слоя и площади МДМ-контакта [5]. С использованием полученных выражений проводится моделирование зависимости сопротивления туннельных МДМ-наноструктур от приложенного напряжения и взаимосвязи сопротивления с пропускаемым через наноструктуру током.

Моделирование туннельных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ, в частности, туннельнотонких пленок оксида иттрия при их толщине 5; 16 нм и площади МДМ-контакта $1 \cdot 10^{-5}$; $2 \cdot 10^{-5}$ см², позволило получить следующие результаты. Сопротивление данных МДМ-наноструктур лежит в диапазоне $(1,2-6,5) \cdot 10^7$ Ом, причем с увеличением напряжения на электродах от 0,1 до 0,3—0,4 В оно несколько возрастает в пределах указанного диапазона, а при дальнейшем повышении напряжения вплоть до значений, соответствующих напряженности поля пробоя диэлектрика, происходит плавное снижение сопротивления. При малых уровнях прикладываемого напряжения его рост сопровождается относительно слабым увеличением тока через МДМ-наноконтакт, а при напряжениях больше 0,3—0,4 В ток достаточно резко увеличивается, что обусловлено снижением сопротивления диэлектрика.

Сверхтонкая диэлектрическая пленка МДМ-структуры рассматривается в виде наноразмерного объема твердого тела, при этом моделируется внесение анизотропии в механические свойства диэлектрического слоя за счет его наноразмерности (**механический уровень** модели). Например, модель тонкопленочного элемента представляет двухмерный кристалл, имеющий бесконечную длину в направлении x и $N > 2$ атомарных слоев в направлении y при условии, что постоянные растягивающие силы приложены к атомам на торцах кристалла [9]. В данном случае изучаются механические величины кристалла (модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν), проявляющие принципиальную неоднозначность при переходе к наномасштабу.

Путем анализа уравнения равновесия атома, находящегося на поверхности кристалла, а также рассмотрения суммарной нормальной силы, действующей со стороны произвольной части кристалла на другую его часть в направлении x , получены выражения для модулей упругости в виде

$$\begin{aligned} \nu_x &= \nu_\infty, \quad E_x = E_\infty N/N^*; \quad \nu_y = \nu_\infty(N-1)/(N-1/9); \\ E_y &= E_\infty N/(N-1/9), \end{aligned} \quad (3)$$

где x , y — индексы, указывающие значения модулей упругости при растяжении кристалла вдоль соответствующих осей; N^* — величина, отражающая произвол в определении толщины кристалла (его протяженности в направлении y): $N-1 < N^* < N$; $E_\infty = 2C \cdot 3^{-1/2}$, $\nu_\infty = 1/3$ — значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона, соответствующие бесконечному кристаллу; параметр C имеет смысл жесткости межатомной связи [9]. Для рассматриваемой модели коэффициент Пуассона убывает, а модуль Юнга возрастает с уменьшением толщины кристаллической пленки, причем масштабные эффекты особенно существенны, если число слоев атомов в рассматриваемом объекте исчисляется единицами; масштабный фактор оказывает некоторое влияние для десятков и пренебрежимо мал для сотен атомарных слоев.

Для описания свойств МДМ-наносенсоров в статическом режиме используются параметры, характеризующие функцию преобразования входного воздействия в электрический сигнал (**энергетический уровень** моделирования). Одной из важнейших ха-

рактических сенсорных элементов является статическая характеристика, описывающая зависимость между выходной величиной и входным параметром в стационарном, установившемся режиме работы. При этом под статической чувствительностью (коэффициентом преобразования) сенсорной наносистемы к контролируемому параметру понимается отношение изменения результата контроля к вызвавшему его изменению контролируемого параметра. Моделируемыми зависимостями этого уровня являются также шумовые свойства МДМ-наноконтакта, определяющие минимальные уровни измерительных сигналов, поступающих на вход электронного устройства, и условия согласования импеданса сенсорной МДМ-наноструктуры с входным электрическим сопротивлением измерительной схемы для передачи максимума мощности.

При моделировании шума МДМ-наноконтакта рассматривается круглая контактная площадка радиусом a между двумя тонкими пленками МДМ-наноструктуры и рассчитывается сопротивление объема материала в виде полусферы с тем же радиусом. Сопротивление между двумя концентрическими полусферами с радиусами r и $r + dr$ принимается равным $dR = \rho dr / 2\pi r^2$ (ρ — удельное сопротивление материала) и при интегрировании дает сопротивление одного из контактирующих элементов $R = \rho / 2\pi a$. При этом величину $1/f$ -шума контакта между двумя полусферами, определяемую общим числом подвижных носителей заряда в материале контактирующих элементов, можно представить в виде

$$\langle \Delta R / R^2 \rangle = \alpha \pi^2 R^3 / 20 \rho^3 n \Delta f / f, \quad (4)$$

где $\alpha = 2 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент; n — концентрация свободных носителей заряда; f — частота [10]. Из данного выражения следует, что спектральная плотность шума контакта между тонкими пленками на фиксированной частоте в значительной степени зависит от свойств материала контактирующих элементов. Это определяет выбор материалов элементов сенсорных МДМ-наноструктур с точки зрения улучшения их шумовых свойств и повышения чувствительности МДМ-наносенсоров.

Особый интерес представляет моделирование сенсорной системы на основе МДМ-наноструктуры с отрицательной дифференциальной проводимостью с учетом электрических параметров внешней электрической цепи (*схемотехнический уровень*). Характеристики электрической цепи, содержащей такую МДМ-наноструктуру, зависят как от микроскопических свойств объема туннельно-тонкого диэлектрического слоя, так и от параметров элементов цепи, таких, например, как сопротивления, индуктивности, емкости металлических проводников. В этом случае вольтамперная характеристика наноструктуры, имеющая S - или N -образную форму, аппроксимируется кусочно-линейной функцией. При учете распределенных R -, L - и C -параметров внешней электрической цепи ток через МДМ-наноструктуру имеет вид периодических импульсов с частотой от десятков гигагерц до единиц терагерц.

Выражение, характеризующее автоколебания электрической цепи, содержащей МДМ-наноструктуру с отрицательной дифференциальной проводимостью, можно представить в виде

$$U_0 / R = d^2 I_C / dt^2 + \{1 - [U_C(I_C) / I_C R]\} I_C + (1 / Z_0) [dU_C(I_C) / dI_C + Z_0 / R] (dI_C / dt), \quad (5)$$

где U_0 — напряжение внешнего источника; $Z_0 = (L / C)^{1/2}$; R , L , C — сопротивление, индуктивность и емкость электрической цепи; I_C и U_C — ток через МДМ-наноструктуру и напряжение на ней; $R_0 = dU_C / dI_C$ при $I_C = 0$ [11]. Данное выражение, являясь уравнением Ван-дер-Поля, при определенных начальных параметрах дает замкнутую фазовую траекторию. При малых R_0 / Z_0 затухание вносит малое возмущение и решения типа предельного цикла для $U_C(t)$ и $I_C(t)$ почти синусоидальны, с ростом R_0 / Z_0 характеристики меняют форму, а решения, соответствующие значениям R_0 / Z_0 , не входящим в рассматриваемый диапазон, описывают затухающие колебания. Результаты расчета показывают, что частота колебаний резко снижается с ростом значений R_0 / Z_0 : так, увеличение R_0 / Z_0 с 3 до 12 приводит к снижению частоты колебаний с 20–30 ГГц до 1–3 ГГц. Таким образом, можно сделать вывод, что частота колебаний достаточно чувствительна к изменению параметров цепи, содержащей туннельную МДМ-наноструктуру. Измеряя указанную частоту, можно судить о параметрах МДМ-наносистемы и, следовательно, выполнять контроль внешнего воздействия на данную структуру.

На *информационном уровне* МДМ-наноструктура рассматривается в виде элемента входной цепи системы обработки информации, при этом представляет интерес точность преобразования входной физической величины в изменения параметра рассматриваемой структуры. Конкретные рассчитываемые параметры МДМ-наноструктуры во временной и частотной областях, а также в области комплексной частоты характеризуют ее динамические свойства как сенсорного элемента. В модель включается также рассмотрение таких свойств и характеристик сенсорной системы на основе туннельной МДМ-наноструктуры, как условия согласования импедансов (для обеспечения минимума отражения сигнала), инвариантности контроля (независимости от незначимых параметров внешнего воздействия), уравнивания схемы (при включении МДМ-наноструктуры в состав компенсационной цепи).

Необходимые выводы о динамике сенсорной МДМ-наноструктуры можно сделать путем моделирования ее реакции на входной сигнал, изменяющийся во времени по известному закону. В качестве типовых тестовых воздействий на сенсорную структуру используются сигналы в виде единичного скачка и дельта-функции, которые рассматриваются как предельные в определенном классе функций. Реакция сенсорной структуры на единичный скачок входной величины описывается переходной функцией, которая проще сопоставляется с экспериментальными данными и поэтому чаще используется на

практике. Математическая модель переходной функции МДМ-наноструктуры имеет вид

$$h(\omega_g t) = 0,5 \pm 1/\pi \int_0^{\omega_g t} \sin(\omega t)/\omega t d\omega t, \quad (6)$$

где t — время; ω_g — частота среза (полоса пропускания), обратно пропорциональная времени успокоения t_E сенсорной структуры: $t_E = \pi/\omega_g$ [12].

Мерой динамических свойств сенсорной системы служит также наибольший поток информации, который может обработать система, называемый пропускной способностью канала сенсорной системы в единицу времени. Когда входная и выходная величины являются стационарными эргодическими случайными процессами, поведение системы описывается корреляционной функцией, выражающей степень связи между этими процессами. При известной корреляционной функции входного процесса и взаимной корреляционной функции входного и выходного процессов вычисляется амплитудно-фазовая частотная характеристика сенсорной системы. Данная характеристика, называемая также комплексной чувствительностью или комплексным коэффициентом преобразования, определяется при использовании в качестве типового воздействия синусоидальных колебаний, частота которых в целях наиболее полного выявления динамических свойств системы принимает в общем случае все значения в диапазоне от 0 до ∞ . Если амплитуда входных гармонических колебаний монотонно изменяется во времени, данное воздействие представляется в комплексной форме и сенсорная система характеризуется операторной чувствительностью.

Моделирование функций туннельных МДМ-наноструктур и наносенсоров на их основе

МДМ-наносенсоры с точки зрения осуществления с их использованием функций сенсорного контроля (**функциональный уровень**) представлены как совокупность методов измерения различных физических параметров с помощью рассматриваемых МДМ-наноструктур. Для эффективной обработки информации с преобразователей на основе МДМ-наноструктур используются модели расчета параметров сигналов как функции времени, характеристик внешнего воздействия и конструктивных параметров МДМ-наносенсоров. Поскольку параметры сигналов на выходе сенсорных МДМ-наноструктур определяются их электрическими характеристиками, выполняется также моделирование зависимости данных характеристик от воздействующих факторов.

Например, для контроля высокоскоростных микрочастиц (диаметр ~ 1 мкм, скорость $1 \cdot 10^3 - 10 \cdot 10^3$ м/с) рассчитывается проводимость ударно сжатой МДМ-наноструктуры при различных значениях скорости микрочастиц. Аналитическое выражение для определения относительного изменения проводимости ΔG в результате удара микрочастицы получено путем решения уравнений электродинамики с учетом эквивалентной схемы МДМ-преобразователя:

$$\delta G = [\sigma(t)/\sigma_0 - 1] \pi D t (D t + 2L + 2d)/S_g, \quad (7)$$

где $\sigma(t)$ — зависимость удельной электропроводности ударно сжатого диэлектрика от времени; σ_0 — удельная проводимость невозмущенной части ди-

электрика при комнатной температуре; D — скорость сферической ударной волны, распространяющейся из точки контакта микрочастицы с МДМ-преобразователем; t — время; d — толщина диэлектрика на расстоянии L от источника ударной волны; S_g — площадь МДМ-контакта [13].

При определении δG предполагается, что дополнительная составляющая тока через МДМ-контакт появляется в момент прихода ударной волны к тыльной поверхности диэлектрика. Резкое увеличение проводимости МДМ-наноструктуры, обусловленное ударным сжатием и термической ионизацией диэлектрического материала, позволяет эффективно использовать МДМ-наносенсоры в качестве преобразователей физико-химических параметров высокоскоростных микрочастиц.

Применение МДМ-наноструктур для контроля параметров газовых смесей (парциального давления, концентрации компонентов) основано на проявлении электроадсорбционного эффекта, т. е. влияния электрического поля в МДМ-наноструктуре на адсорбционную способность ее поверхности. В соответствии с уравнением состояния $N = N(P, T)$ число газовых молекул N , удерживаемых на поверхности, при постоянной температуре T однозначно зависит от давления газа P (характеризуется изотермой). Изменение адсорбционной способности поверхности под влиянием внешнего поля обусловлено изменением содержания на поверхности заряженной формы хемосорбции.

Заполнение поверхности МДМ-наноструктуры заряженной формой хемосорбции $N^\pm$ и изменение этого заполнения, вызываемое электрическим полем, определяется по компенсирующему полю ΔE и зависимости ΔE от напряженности приложенного электрического поля E^* :

$$N^\pm = \pm \Delta E / 4\pi e, \quad N^\pm = N^\pm(E^*), \quad (8)$$

где e — абсолютное значение заряда электрона; верхний или нижний знак выбирается в зависимости от того, имеем ли мы дело соответственно с акцепторными или донорными молекулами [14]. Здесь $\Delta E = E - E^*$; E — напряженность поля, при которой в газовой среде (при измеряемом давлении) проводимость образца κ и, следовательно, поверхностный потенциал V_S возвращаются к своим значениям в вакууме: $\kappa = \kappa^*$, $V_S = V_S^*$; V_S^* — поверхностный потенциал (соответствующий напряженности внешнего электрического поля E^*), при котором проводимость образца в вакууме (т. е. при отсутствии на поверхности состояний адсорбционного происхождения) имеет значение $\kappa^* = \kappa(V_S^*)$.

Когда газовая среда представляет собой многокомпонентную смесь, возможны следующие ситуации: каждый газ адсорбируется на отдельных адсорбционных центрах поверхности; все газы адсорбируются на одних и тех же центрах. В этих случаях для каждого газа изотерма Ленгмюра, характеризующая заполнение молекулами адсорбционных центров поверхности, имеет вид соответственно:

$$N_i = N^* P_i / b_i [1 + P_i / b_i];$$

$$N_i = N^* P_i / b_i [1 + \sum_j P_j / b_j], \quad (9)$$

где i — номер газа; P_i — его парциальное давление; N^* — общее число адсорбционных центров поверх-

ности; $b = b_0 \exp(-q/kT)$; $b_0 = v(2\pi MkT)^{1/2}/\kappa s$; M — масса адсорбированной молекулы; s — ее эффективная площадь; κ — вероятность закрепления газовой молекулы на адсорбционном центре поверхности; v — вероятность десорбции молекулы с поверхности; q — энергия связи адсорбированной молекулы с адсорбционным центром (дифференциальная теплота адсорбции); k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура [14]. При этом для каждого газа в смеси характерны определенные значения ΔE и зависимости ΔE от напряженности электрического поля у адсорбирующей поверхности МДМ-наноструктуры.

Таким образом, по компенсирующему полю ΔE и по зависимости ΔE от приложенного к МДМ-наноструктуре поля E^* однозначно определяются параметры газовых сред, в том числе многокомпонентных. Следует учесть также, что электроадсорбционный эффект несимметричен относительно знака поля: положительный потенциал на поверхности уменьшает адсорбцию акцепторов и увеличивает адсорбцию доноров, а отрицательный потенциал приводит к противоположному результату. С учетом данного обстоятельства определяют акцепторную или донорную природу адсорбируемого газа путем контроля изменения адсорбционной способности МДМ-наноструктуры при перемене полярности приложенного напряжения. Рассмотренные свойства МДМ-наноструктур позволяют использовать МДМ-наносенсоры для анализа и распознавания газовых смесей сложного состава, в частности, в виде сенсорных систем "электронный нос".

При определении температурной зависимости параметров туннельных МДМ-наносенсоров используется трехмерная модель, в которой предполагается, что в процессе туннелирования участвуют носители заряда, скорость и энергию которых можно представить как набор перпендикулярных и параллельных барьеру компонент: v_x , $v_r^2 = v_y^2 + v_z^2$, E_x , $E_r = E_y + E_z$. В данном случае ток через барьер рассматривается как ток вдоль направления x :

$$I = 4\pi meAkT/\hbar^3 \int_0^{E_m} |\tau(E_x)|^2 \ln\{[1 + \exp(E_f - E_x)/kT]/[1 + \exp(E_f - E_x - eV)/kT]\} dE_x, \quad (10)$$

где m , e — масса и заряд электрона; k — постоянная Больцмана; $\hbar$ — постоянная Планка; A — боковое поперечное сечение контакта; $|\tau(E_x)|^2$ — вероятность туннелирования электронов с энергией E_x ; E_f — энергия Ферми; E_m — максимально возможная энергия туннелирующих частиц; T — температура [15].

В данной модели зависимость проводимости туннельной МДМ-наноструктуры от температуры имеет вид

$$G(V, T) = G_0(1 + V^2/V_0^2)(1 + T^2/T_0^2), \quad (11)$$

где G_0 — проводимость при нулевом напряжении смещения; V_0 , T_0 — параметры: $V_0^2 = 4\hbar^2/me^2\phi_0/S$,

$T_0^2 = 3\hbar^2/\pi^2k^2m\phi_0/S$; ϕ_0 , S — высота и ширина барьера соответственно [15].

Характерные особенности туннельных МДМ-наноструктур предопределяют интересные возможности их использования в качестве распределенных сенсорных систем (**системный уровень** моделирования). В частности, рассматриваемые наноструктуры организуют в активную среду, физико-химические процессы в отдельных элементах и областях которой проявляют автоколебательные свойства. К возникновению автоколебаний приводит, например, нелинейность вольт-амперных характеристик туннельных МДМ-наноструктур, связанных с активными и реактивными компонентами внешней электрической цепи. Достаточно сложный механизм функционирования МДМ-элементов сенсорной среды при наличии между ними физического взаимодействия (перенос энергии, передача теплоты, электрическая проводимость) способствует возникновению автоволн в активной сенсорной среде. При этом отдельные элементы данной среды постоянно совершают устойчивые автоколебания определенной формы, амплитуды и частоты.

Внешнее воздействие вызывает возмущение автоколебаний и, как следствие, возникновение и распространение автоволн в сенсорной системе, которые характеризуют воздействующие факторы. После окончания возмущающего воздействия в течение некоторого времени релаксации параметры автоколебаний элементов сенсорной системы возвращаются к своим исходным значениям. Активная сенсорная среда описывается системой дифференциальных уравнений типа "реакция—диффузия" с нелинейной реакционной составляющей (система Жаботинского—Заикина):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y(1-x) - \delta x + \chi_1 \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}; \\ \varepsilon \frac{dy}{dt} &= \\ &= y\{1 - x[1 + \alpha + (y - \alpha)^2]\} + \varepsilon + \varepsilon \chi_2 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}, \quad (12) \end{aligned}$$

(входящие в уравнения величины имеют смысл: концентрации реагирующих веществ — x , y , констант реакции — α , δ , ε , коэффициентов диффузии — χ_1 , χ_2) [16]. Правые части уравнений (12), отображающие автоволновые процессы в каждой точке активной сенсорной среды, имеют реакционную составляющую, описывающую локальную кинетику, и диффузионную составляющую, характеризующую связь между отдельными элементами моделируемой сенсорной среды.

Список литературы

1. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Туннельные сенсорные МДМ-наноструктуры: стратегии моделирования // Матер. докл. междунар. научно-технической конференции "Новые технологии изготовления многокристалльных модулей", Минск—Нарочь, 25—29 сентября 2006 г. Доклады БГУИР. 2006. № 5. С. 97.
2. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Моделирование туннельных сенсорных МДМ-наноструктур // Тез. докл. 2-й междунар. научно-технической конференции "Сенсорная электроника и микросистемные технологии" (СЭМСТ-2), Одесса, 26—30 июня 2006 г. 2006. С. 75.

3. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Моделирование туннельных МДМ-структур для интегральных сенсорных микросистем // Тез. докл. 7-й междунар. конференции "Пленки и покрытия — 2005", Санкт-Петербург, 24–26 мая 2005 г. 2005. С. 54–56.
4. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Туннельные сенсорные МДМ-структуры // Сб. докл. междунар. конф. "Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ—2005)", Минск, 24–28 октября 2005 г. 2005. Т. 2. С. 510–512.
5. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Получение туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ // Межведомственный сб. научно-методических статей "Теоретическая и прикладная механика". БНТУ, 2007. Вып. 21. С. 135–144.
6. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Туннельные МДМ-структуры на основе тонких пленок оксидов РЗЭ // Тез. докл. 7-й междунар. конф. "Пленки и покрытия — 2005", Санкт-Петербург, 24–26 мая 2005 г. 2005. С. 121–123.
7. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Получение туннельных пленок оксидов РЗЭ для МДМ-структур // Матер. междунар. научно-технической конференции "Современные технологии металлообработки", Минск, 14–17 июня 2005 г. 2005. С. 117–121.
8. Дирнлей Дж. и др. Электрические явления в аморфных пленках оксидов // Успехи физических наук. 1974. Т. 112. Вып. 1. С. 83–128.

9. Кривцов А. М., Морозов Н. Ф. О механических характеристиках наноразмерных объектов // Физика твердого тела. 2002. Т. 44. Вып. 12. С. 2158–2163.
10. Hooge F. N., Hoppenbrouwers A. M. H. Contact noise // Physics Letters. 1969. V. 29. N 11. P. 642–643.
11. Shaw M. P., Gastman J. Circuit Controlled Current Instabilities in "S-Shaped" Negative Differential Conductivity Elements // Applied Physics Letters. 1971. Vol. 19. N 7. P. 243–245.
12. Хофманн Д. Техника измерений и обеспечение качества. М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.
13. Семкин Н. Д., Воронов К. Е. Проводимость ударно сжатых МДМ структур на основе полиметилметакрилата // Журнал технической физики. 1998. Т. 68. № 8. С. 63–66.
14. Волькенштейн Ф. Ф. Физико-химия поверхности полупроводников. М.: Наука, 1973. 400 с.
15. Korpiinen P. Temperature dependence of the tunneling conductance of a metal-insulator-metal barrier (Special assignment report). University of Jyväskylä, Department of Physics. Jyväskylä, 2001. 23 p.
16. Евтихов М. Г., Балкарей Ю. И., Никулин М. Г., Елинсон М. И. Математическое моделирование динамической фазовой памяти автоволновой среды // Микроэлектроника. 1978. Т. 7. Вып. 5. С. 421–425.

УДК 536.5

Д. В. Локтев, В. М. Андреев, д-р техн. наук, проф.,
Д. В. Зиновьев, канд. техн. наук,
К. А. Тузовский, канд. техн. наук,
Московский государственный институт
электронной техники

ЭФФЕКТ ТЕРМОФОРЕЗА В ТЕПЛОВЫХ МЭМС

Обнаружен и визуализирован эффект термофореза в плотных газах применительно к микросистемам. Разработана математическая модель поведения аэрозолей и твердых частиц в условиях высокоградиентного теплового поля. Рассмотрена практическая значимость эффекта термофореза в тепловых МЭМС как оригинальное средство защиты чувствительных элементов в случае существенных загрязнений измеряемых газовых потоков.

Неравномерно нагретые легкие тела, помещенные в разреженный газ, приходят в движение в сторону менее нагретой поверхности — эффект, который получил название *термофореза* [1]. Пониженное давление является обязательным условием, так как сила невелика и неспособна преодолеть вязкость плотного газа. Эффект имеет и практическое применение — на нем основано действие одного из типов тепловых вакуумметров. Прямыми измерениями теплового поля разработанного авторами микронагревателя было установлено, что в высокоградиентной области перепад температуры превышает 1 К/мкм на расстоянии до 100 мкм от поверхности прибора. Принимая, что в окружающем его воздухе содержатся аэрозоли и твердые частицы размером 0,1–10 мкм, можно оценить вероятность выталкивания их под действием градиента при атмосферном давлении.

Известно, что сила F , с которой молекулы ударяют в площадку с поверхностью, равной S , определяют по формуле

$$F = nmv^2S,$$

где n — число молекул; v — тепловая скорость; m — масса молекул.

Термофорез реализуется, когда скорости молекул воздуха по обе стороны частицы аэрозоля различны, вследствие чего

$$\Delta F = Fnm(v_1^2 - v_2^2)S.$$

Средняя скорость молекул газа, определяется их температурой $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT$, а в градиентном поле — разницей температур на длине частицы аэрозоля $v_1^2 - v_2^2 = \frac{3k\Delta T}{m}$, где k — постоянная Больцмана.

Сила, действующая на частицу,

$$F_\phi = n\pi R^2 3k\Delta T.$$

При радиусе частицы $R = 10^{-6}$ м сила выталкивания $F_\phi = 3,5 \cdot 10^{-9}$ Н. Зная плотность вещества частицы, можно определить ее ускорение $a = \frac{F}{m} = \frac{3,5 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-15}} = 1 \cdot 10^6$ м/с², где $m = 4 \cdot 10^{-15}$ — масса выталкиваемой частицы.

Принимая движение равномерно ускоренным, имеем $l = \frac{at^2}{2}$.

Размер l высокоградиентной зоны близок к 100 мкм, поэтому время пролета $t = 1,5 \cdot 10^{-5}$ с [2].

Выйдя из градиентной зоны, частица начинает тормозиться силой вязкости, определяемой законом Стокса:

$$F = 6\pi\eta Rv,$$

где η — коэффициент вязкости воздуха, равный $15 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Поскольку $m \frac{dv}{dt} = 6\pi\eta Rv$, решение дифференциального уравнения при граничных условиях $v = v_0$, $t = t_0$ дает:

$$\ln \frac{v}{v_0} = \frac{6\pi\eta R}{m} t.$$

Принимая $\frac{v}{v_0} = 0,1$, $t = 3 \cdot 10^{-5}$ с, получаем, что

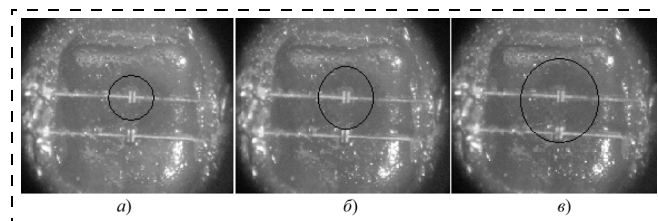
$$\text{путь } l = \frac{at^2}{2} = \frac{10^6 \cdot 10^{-9}}{2} = 500 \text{ мкм.}$$

Аналогичный расчет для частицы радиусом $R = 0,1$ мкм дает $l = 5$ мкм.

Эксперимент проводили следующим образом. Модуль помещали в прозрачный канал, так что зазор между нагревателем и стенкой не превышал 0,3 мм.

Сборку помещали в поле зрения микроскопа. В канал запускался табачный дым. Кинокамера фиксировала состояние атмосферы через каждые 15 мс после включения нагревателя (см. рисунок).

Полученные снимки свидетельствуют об оттеснении микрочастиц на расстояние 0,5–1 мм за пределы зоны нагрева, подтверждая тем самым наличие термофореза в плотном газе, что является следстви-



Фронт вытеснения частиц дыма:

a — 100 мс; b — 220 мс; c — 340 мс

ем высокого температурного градиента. Следует отметить, что предложенная модель (и, учитывая принятые упрощения), достаточно хорошо объясняющая эксперименты, предполагает наличие анизотропии вязкости в газовом пространстве, окружающем микронагреватель — еще одно следствие нового механизма теплоотдачи точечным источником [3].

Обнаруженный эффект при применении разработанного модуля в тепловых МЭМС может служить защитным механизмом при измерении параметров газовых сред в условиях наличия сильных загрязнений.

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Учеб. пособие для вузов. В пяти т. Термодинамика и молекулярная физика. 4-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 576 с.
2. Локтев Д. В. Разработка микромодульного расходомера газов // Тр. 14-й Всероссийской межвузовской научно-технической конф. студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика — 2007", Москва, апрель 2007. МИЭТ. 2007. 112 с.
3. Zinoviev D. V., Andreev V. M., Tuzovsky K. A., Loktev D. V. Investigation of microobjects heat transfer // Second International Conference on Transport Phenomena in Micro and Nano-devices. Barga, Italy. 11–15 June 2006.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.93

В. А. Малышев, д-р физ.-мат. наук,
Таганрогский радиотехнический университет

КВАНТОВО-СИНТЕЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ВОЗМОЖНАЯ ОСНОВА БИОТЕХНОЛОГИЙ

Рассматривается нестандартный подход к квантово-синтезному (фотосинтезному) механизму жизненных процессов в биологических растительных и живых организмах и отмечается ряд особенностей квантового синтеза, объясняющих детали энергетических закономерностей этих процессов.

Наблюдаемые процессы быстрого роста растений (например, подсолнуха) заставляют внимательно ис-

кать и изучать механизмы этого феномена в целях более полного его использования в жизни не только растений и живых существ, но и, возможно, в новых технологических процессах. Основой жизнедеятельности (в частности, роста) всех растительных и живых организмов являются процессы их фотосинтеза и термосинтеза (обычно считается, что фотосинтез происходит под действием ультрафиолета, а термосинтез — под действием менее жесткого облучения), т. е. квантового синтеза, поэтому познание и использование закономерностей этого процесса является одной из основных проблем современного естествознания.

Ключом к пониманию этих закономерностей может служить факт существования эксимерных молекул, когда, например, атомы инертных газов, получившие возбуждение от квантов вполне определенной энергии (или каким-либо другим путем), становятся способны создавать синтезные структуры (эксимерные молекулы) с теми же, но невозбужденными атомами инертных газов или с атомами галогенов. Эти эксимерные молекулы могут терять свое

возбуждение как спонтанно, так и индуцированно под влиянием внешнего кванта, вызывающего распад молекулы и излучение кванта такого же, как и внешний квант, что составляет основу работы эксимерных лазеров [1].

И хотя согласно общепринятым представлениям [2, 3] "фотосинтез растений заключается в преобразовании и запасании солнечной энергии, в результате которого из простых веществ CO_2 и H_2O синтезируются углеводы и выделяется кислород", но механизм этого "преобразования и запасания" остается весьма сложным для понимания и поэтому вышеупомянутый факт существования эксимерных молекул путем его гипотетического обобщения позволяет сформулировать следующие *основные особенности квантового синтеза*, которые, по-видимому, могут найти применение в биотехнологиях.

1. Атомы и молекулы, находящиеся в возбужденном состоянии, способны вступать в такие химические реакции и давать такие химические соединения, которые невозможны или маловероятны для тех же атомов и молекул, находящихся в невозбужденном состоянии.

2. В зависимости от частоты поглощаемых атомом или молекулой электромагнитных волн они возбуждаются на те или иные уровни возбуждения или системы уровней возбуждения и таким образом приобретают те или иные реакционные способности и дают те или иные химические соединения с другими возбужденными или невозбужденными атомами или молекулами, что и определяет имеющее место многообразие жизненных форм и жизненных процессов. То есть фактически каждый атом и молекула в действительности представляют собой целый набор разных атомов или молекул, зависящих от того уровня возбуждения, на котором они находятся.

3. Энергия первоначального возбуждения (активации) атомов или молекул в процессе совершения синтезной химической реакции может частично или полностью расходоваться на энергию связи новых химических структур, а частично может расходоваться на возбуждение других атомов, молекул или вновь образованных химических структур.

4. Кванто-синтезная молекула может распадаться путем:

- поглощения энергии извне, если продукты распада имеют больший энергетический запас, чем исходная молекула;
- спонтанного распада с выделением энергии связи под влиянием факторов, не поддающихся учету (как, например, возбужденный атом в обычном газе). Спонтанный распад может сопровождаться излучением, которое может носить многофонный или многофотонный характер, как, например, в акустических лазерах, т. е. это может быть обычное поглощение выделяемой при распаде энергии с переходом ее в тепло;
- индуцированного распада под влиянием внешнего кванта с энергией, равной энергии связи, с выделением такого же кванта, возможно, когерентного индуцирующему.

Это определяет закономерности распада квантово-синтезных структур с возможным выделением (гене-

рацией) квантов энергии связи, которые могут использоваться для создания других квантосинтезных структур по другой программе и с другими компонентами. То есть квантово-синтезные (активированные) молекулы могут служить рабочей средой с инверсной населенностью рабочих уровней для некоего квантосинтезного (эксимерного) лазера.

5. Процессы квантового механизма синтеза, упомянутые выше, составляют основу жизнедеятельности всех растительных и живых организмов и структур.

6. Энергия связи в растительных квантово-синтезных структурах, полученная ими от Солнца, выделяется при распаде в желудке или его аналоге живого организма, съевшего эту растительную структуру, и является для живых организмов аналогом солнечного источника энергии растительного мира и служит также основой квантового синтеза и процессов жизнедеятельности этого живого организма. Это выделение энергии, в частности, всегда наблюдается в тепловизорах и фиксируется как физические поля человека [4].

7. В случае, когда объектом питания живого организма является также живой организм, распад съеденного приводит к выделению энергии, идущей на акты квантового синтеза и процессы жизнедеятельности питающегося.

8. Таким образом, в живых организмах существует некое подобие солнечного излучения с центром, возможно, расположенным в желудке (или его аналоге) и вблизи него, которое служит источником электромагнитных волн, концентрированных в диэлектрическом резервуаре-резонаторе (которым является для них живой организм) и создает процессы квантового синтеза и жизнедеятельности в живых организмах.

9. Электромагнитные волны, которые могут индуцировано возбуждаться в живых организмах при распаде квантово-синтезных структур, по-видимому, способны распространяться на большие расстояния, что может служить объяснением целого ряда известных частично исследованных и до сих пор малопонятных эффектов, заметно проявляющихся у отдельных людей (Н. С. Кулагина, Джона Давиташвили, Ванга и др.), таких как "ясновидение", чтение мыслей на расстоянии, телекинез, эффект нанесения ожогов человеческому телу, гипнотические и экстрасенсорные явления и др. [5].

При этом приемниками и передатчиками упомянутых электромагнитных волн, по-видимому, микроволнового и инфракрасного диапазонов, могут у живых существ служить те наружные диэлектрические и волноведущие структуры, которые имеются на теле таких существ (усы у всех животных, волосистой покров, большие уши-антенны, пальцы рук и др.).

10. Так как, согласно общепринятым представлениям [2, 3] квантовый синтез (фотосинтез) сопровождается выделением кислорода, то распад квантово-синтезных структур на составляющие элементы обычно нуждается в поглощении кислорода. Поэтому все живые существа имеют органы дыхания, снабжающие организм животного кислородом, дополняющим разницу между кислородом, требуемым для распада, и кислородом, выделяемым при новом синтезе, и необходимым для реализации упомянуто-

го процесса распада и, таким образом, жизнедеятельности организма.

Поэтому процессы распада съединенных животным квантово-синтезных структур часто называют окислительными, а процессы создания таких новых структур — восстановительными.

Автор надеется, что эта статья послужит дальнейшим стимулом развития таких важнейших направлений современного естествознания, как химия возбужденных состояний, биологические спектроскопия, химия и физика, квантово-синтезные техника и технологии.

Список литературы

1. **Эксимерные** лазеры / Под ред. Ч. Роудза. М.: Мир. 1981.
2. **Фотосинтез** / Под ред. М. Говинджи. М.: Мир. 1987. Т. 1—2.
3. **Климов В. В.** Углекислота как субстрат и кофактор фотосинтеза // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 4.
4. **Годик Э. Э., Гуляев Ю. В.** Физические поля человека и животных // В мире науки. 1990. № 5. С. 75—83.
5. **Феномен "Д"** и другие. Состав. Л. Е. Колодный. М.: Политиздат. 1991. 335 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

УДК 57.088:535.(3 + 4)

С. И. Романов¹, канд. физ.-мат. наук,
Д. В. Пышный², канд. хим. наук,
Н. В. Вандышева¹, **А. А. Ломзов**^{2, 3},
А. В. Бубликов¹,

¹Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск

²Институт химической биологии и
фундаментальной медицины СО РАН,
г. Новосибирск

³Новосибирский государственный университет

КРЕМНИЕВАЯ МИКРОКАНАЛЬНАЯ МАТРИЦА ДЛЯ БИОЧИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Представлен краткий обзор исследований в области биочиповых технологий диагностики нуклеиновых кислот на основе трехмерных пористых носителей. Сделано и обосновано предположение об использовании кремниевых микроканальных матриц для перспективного развития методов гибридизационного анализа ДНК. Впервые на кремниевых матрицах получены результаты, подтверждающие высокую адсорбционную способность трехмерного носителя и возможность прямого спектрального анализа нуклеиновых кислот в инфракрасной области поглощения света.

Введение

Расшифровка генома человека на стыке столетий придала дополнительный импульс разработкам методов анализа нуклеиновых кислот. Реальная перспектива перейти к медицине, построенной на персональной генетической информации, устанавливающей, а затем и устраняющей первопричины болезней, выдвигает на передний план биотехнологии, направленные на массовое секвенирование геномной ДНК [1]. Наибольшее развитие получают подходы, использующие биологические микрочипы (биочипы), в основе анализа которых лежит метод

гибридизации олигонуклеотидных зондов с целевой ДНК [2, 3]. За последние годы технология биочипов, предложенных впервые в работах [4, 5], прошла стремительную эволюцию от двумерного (2D) формата к трехмерным (3D) структурам, созданным с применением микроканальных матриц (МКМ) [6]. До исследовательской и диагностической практики доведен вариант биочипа с двумерной матрицей гидрогелевых ячеек размерами $100 \times 100 \times 20$ мкм, содержащих специфический распознающий элемент [7, 8]. Увеличение поверхностной плотности иммобилизованных зондов, равномерно распределенных по всему объему гелевых ячеек, эффективная гибридизация в этом далеко не трехмерном биочипе уже дали преимущества перед монослойными аналогами. Однако немногочисленные исследования, выполненные на реальных 3D-носителях, привели к результатам, заслуживающим внимание [6, 9—12].

3D-МКМ

3D-МКМ представляет собой структуру с упорядоченным расположением сквозных микроканалов, имеющих однотипную внутреннюю поверхность и поперечные размеры в пределах $0,1 \dots 10$ мкм [13, 14]. Авторы отмеченных выше работ [6, 9—12] привлекла возможность использовать большую поверхность твердотельного объемного носителя для иммобилизации олигонуклеотидных зондов и его проточный тип для последовательной подачи требуемых растворов в контролируемом, очень небольшом объеме.

За счет развитой адсорбирующей поверхности 3D-МКМ был расчет получить:

- увеличенную на порядки поверхностную (имеется в виду внешняя поверхность носителя) плотность зондов и, следовательно, пропорционально возрастающее количество анализируемого биоматериала;
- предельно низкий уровень детектирования ДНК и/или высокую чувствительность метода анализа;
- широкий динамический диапазон измеряемых концентраций в пределах уровней "чувствительность—насыщение".

Проточный тип носителя с микроканалами позволял рассчитывать:

- на ускоренные гетерофазную гибридизацию и/или специфические реакции в канале-микро-реакторе с возможностью многократной рециркуляции растворов с взаимодействующими компонентами и *in situ* оптическим детектированием продуктов;
- на повышенную плотность участков олигонуклеотидных зондов, составляющих матрицу биочипа, за счет эффекта капиллярного смачивания, препятствующего растеканию растворов по внешней поверхности МКМ-носителя.

Первые микроканальные матрицы для биохимического анализа были изготовлены из свинцового стекла и использованы в исследованиях обратной гибридизации ДНК, результаты которых опубликованы в 2001 г. [6, 9, 10]. Тремя годами позднее появились работы на аналогичную тему, выполненные на матрицах из Al_2O_3 [11, 12]. Методом люминесценции (флуоресценции [6, 9, 11] и хемилюминесценции [10]) было изучено образование комплементарных комплексов ДНК в каналах МКМ. В работе [12] осуществлено прямое детектирование молекул ДНК с помощью спектрометрии в ультрафиолетовой и инфракрасной областях света. Во всех цитируемых работах был получен существенный положительный эффект от применения МКМ, который кратко можно резюмировать следующим образом.

1. Время проведения гибридизационного анализа ДНК сократилось с 18 ч до 20 мин, а пропускная способность SiO_2 -МКМ-биочипа составила более 350 проб/ч [9].

2. Поверхностная концентрация целевой ДНК на МКМ-биочипе была в 96 раз больше значения, полученного на 2D-биочипе [10] (расчет давал 101-кратное увеличение), а абсолютное значение этой характеристики составляло $4 \cdot 10^{12}$ молекул/см² при эффективности гибридизации 70 % [12].

3. Нижние предельные количества целевых олигонуклеотидов зарегистрированы в аттомольном диапазоне (10^{-18} моль) [6, 10].

4. Динамический диапазон измеряемых концентраций ДНК составил три порядка [10].

5. Размер участков специфических зондов, образующих матрицу биочипа, уменьшился в 1,6 раза по сравнению с плоским монокристаллическим аналогом [10].

Результаты этих работ продемонстрировали большие потенциальные возможности 3D МКМ в анализе нуклеиновых кислот. Становится очевидным, что на основе данного материала может быть создана диагностическая аппаратура для медицины.

Цель работы

Мы считаем, что в разработках диагностического биочипа как элемента высокоинтегрированной и предельно миниатюризированной структуры, включающей в себя помимо 3D МКМ системы анализа и транспорта, следует делать ставку на *кремний* — основной материал микрофотоэлектроники, широко применяемый в микроэлектромеханических системах и нанотехнологиях. В отличие от стеклянных и

Al_2O_3 -матриц 3D МКМ, изготовленная из монокристаллического кремния, имеет значительно больше возможностей быть объединенной в конечном устройстве с электронными, оптическими и микромеханическими элементами по причине общей быстро развивающейся элементной базы.

Преимущество кремниевой матрицы, технология изготовления которой достаточно хорошо известна (смотрите, например, [15—18]), видится также в практически неограниченной и высокоуправляемой функционализации поверхности монокристаллического материала, что обусловлено многими факторами, а именно:

- высокой реакционной способностью кремния;
- наиболее развитой технологией химической обработки и модификации поверхности кристалла;
- различной и контролируемой структурой-формой микроканалов.

По сравнению с аморфными матрицами из стекла и окиси алюминия, имеющими только цилиндрические каналы, Si-МКМ предоставляет выбор как цилиндрических [15], квадратных [18], так и гексагональных [19] в сечении каналов — стенки последних двух форм огранены кристаллографическими плоскостями, близкими к ориентации {110}. Последнее обстоятельство позволяет рассматривать Si-МКМ в качестве монокристаллического носителя огромной площади с одной (единой) кристаллографической ориентацией поверхности, что дает возможность контролировать состояние всей поверхности и проводить с равной эффективностью иммобилизацию специфических биоматериалов на различных участках носителя.

В подтверждение сказанному были проведены разносторонние постановочные исследования (до настоящего времени в открытой печати отсутствовали сообщения об использовании Si-МКМ для гибридизационного анализа ДНК), результаты которых показали реальную перспективу этой структуры в биохимическом анализе. С этой целью были выполнены:

- собственная разработка технологии создания Si-МКМ;
- оценка адсорбционной способности кремниевой матрицы в качестве эффективного 3D-носителя;
- спектрометрическое исследование отдельных стадий анализа ДНК в инфракрасной области поглощения света;
- разработка метода измерения показателя преломления растворов с применением Si-МКМ в качестве двумерной дифракционной решетки.

Эксперимент, результаты и выводы

1. Технология изготовления и характеристика кремниевой микроканальной матрицы

Для создания биосенсорных устройств нами была разработана собственная технология изготовления микроканальных матриц на пластинах Si (100) *p*-типа, которая отличалась от приводимых в журнальных публикациях описаний следующими моментами:

- специально подобранным водным раствором электролитов NH_4F и HCl с включением в состав поверхностно-активного вещества типа неонол;

Таблица 1

	Параметры
Микроканалы:	
ось	$\langle 100 \rangle$
угол наклона к оси поверхности	$0 \dots 10^\circ$
внутренняя поверхность	близкая к $\{011\}$
поперечное сечение	квадратное
поперечный размер	$3 \dots 15$ мкм
длина канала	$5 \dots 400$ мкм
толщина стенок	$0,5 \dots 4$ мкм
Удельная поверхность Si-MKM	~ 1 м ² /г или $\sim 0,4$ м ² /см ³
Коэффициент прозрачности Si-MKM	$0,4 - 0,9$
Внешний размер	≤ 76 мм
Конструкция мембран	Свободная с монокристаллическим обрамлением на пористой и/или монокристаллической подложке

- комбинированным режимом электрохимического анодного травления кремния, состоящим из гальваностатических и потенциостатических этапов обработки материала без подсветки;
- способами вскрытия микроканалов при создании прозрачных мембран толщиной от десятка до сотен микрометров.

В результате мы отработали изготовление совершенных микроканальных носителей мембранного типа с возможным моноканальным обрамлением.

Типичная структура и доступный выбор параметров кремниевых МКМ представлены на рис. 1 (см. вторую сторону обложки) и в табл. 1, соответственно. Следует отметить высокое качество внутренней поверхности матриц (шероховатость поверхности на оптических изображениях поперечных срезов не наблюдалась, см. рис. 1, е), что является важным фактором для получения оптических биосенсоров с предельными параметрами. Область практических применений кремниевых МКМ может быть расширена за счет ее превращения в кварцевую матрицу SiO_2 -МКМ и промежуточную форму SiO_2/Si -МКМ, что было дополнительно отработано специально подобранными режимами термического окисления.

В настоящей работе были использованы кремниевые матрицы, параметры которых указаны на рис. 1.

2. Кремниевая МКМ как объемный твердотельный носитель биоматериала

Сравнительная оценка адсорбционной способности 3D Si-MKM и типичного 2D-планшета (стеклянный слайд) была получена при исследовании иммобилизации олигонуклеотидных зондов, меченных радиоактивной меткой. Для выполнения этой задачи носители обоих типов одновременно подвергались стандартной предварительной очистке, гидроксилрованию хромовой смесью, функционализа-

ции поверхностей 3-глицидоксипропилтриметоксисиланом, и затем осуществлялась иммобилизация олигонуклеотидных зондов [20]. Результаты обработок поверхностей 2D и 3D объектов схематично показаны на рис. 2. Зонды представляли собой последовательность 15 нуклеотидов, у которых 5'-концевой фосфат содержал атом радиоактивного ^{32}P , а на 3-конец была введена алифатическая аминогруппа. Иммобилизованный олигонуклеотид имел структуру $[\text{}^{32}\text{P}]\text{pGATTATTTGGAAAAGp}(\text{CH}_2)_6\text{—NH}_2$. Далее носители тщательно промывались, и после удаления несвязанных молекул химически адсорбированные на матрицах и слайдах вещества собирались в отдельные капсулы, у которых измерялась интенсивность излучения Черенкова—Вавилова при β -распаде радиоактивного изотопа ^{32}P . Этим широко используемым методом количественного анализа, в котором учитывалась удельная радиоактивность меченых олигонуклеотидов, были получены зависимость удельной адсорбции ДНК-зондов от толщины 3D Si-MKM, варьируемой в пределах 5...160 мкм, и сопоставляемое значение их удельной адсорбции на 2D-планшетах.

Результаты анализа, представленные на рис. 3, показали, что количество иммобилизованной на микроканальных матрицах ДНК всегда превышало аналогичное значение, присущее плоским слайдам. Отметим здесь, что все расчеты удельной адсорбции 3D-носителя проводились, как это принято, с учетом площади внешней поверхности. По мере увеличения толщины адсорбционная способность матриц значительно возрастала, что приводило уже к 40-кратному превышению при толщине Si-MKM, равной 160 мкм (последняя точка на зависимости "количество ДНК — толщина матрицы" (см. рис. 3). Однако расчет давал 55-кратное увеличение (при оценке было сделано предположение об одинаковой плотности заполнения поверхности обоих носителей иммобилизованными олигонуклеотидными зондами). Мы допускаем, что отмеченное расхождение могло быть обусловлено более низкой эффективностью использования всей внутренней поверхности микроканальных матриц, поскольку в наших экспериментах не применялась прокачка рас-

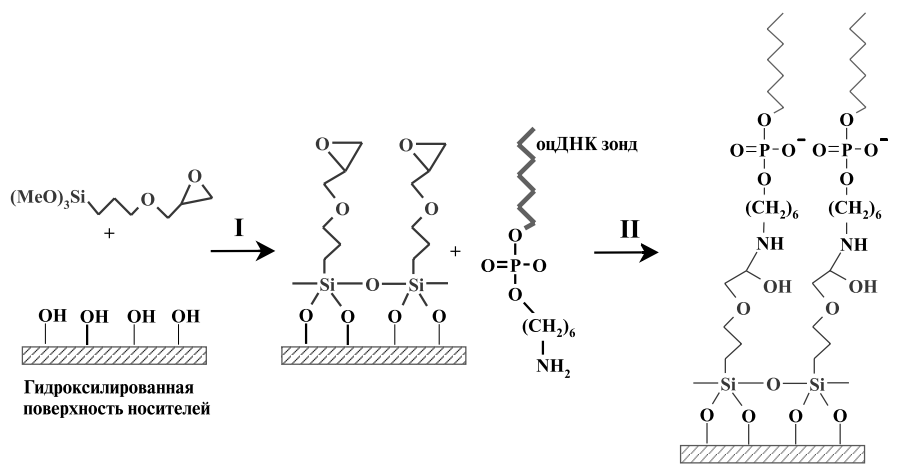


Рис. 2. Схема основных реакций на поверхности носителей:

I — функционализация гидроксированной поверхности 3-глицидоксипропилтриметоксисилоном; II — иммобилизация одноцепочечных фрагментов ДНК (олигонуклеотидных зондов)

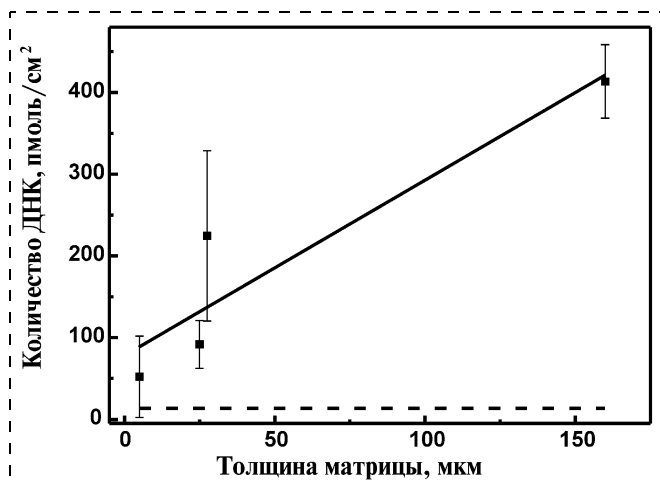


Рис. 3. Адсорбционная способность 3D Si-MKM, представленная в виде зависимости поверхностной (внешняя поверхность) плотности иммобилизованных олигонуклеотидных зондов от толщины матрицы. Штриховой линией показано значение поверхностной плотности зондов, иммобилизованных на плоской поверхности стеклянного слайда

творов через каналы — в ход пускалось капиллярное смачивание мембран с их периодической встряской.

Таким образом, полученные результаты продемонстрировали, что Si-MKM является эффективным носителем ДНК.

3. Кремниевая МКМ — элемент оптического ДНК-сенсора

Повышенная удельная адсорбция ДНК-зондов на кремниевой микроканальной матрице, на порядки превышающая пределы, достигаемые при использовании обычных плоских планшет, позволила осуществить прямое спектральное детектирование ДНК в ИК области собственного поглощения света. Мы предприняли попытку воспроизвести и зарегистрировать два этапа из гибридационного анализа ДНК: функционализацию поверхности носителя и наложение в нем немеченой нуклеиновой кислоты.

Для этой работы была использована мембрана кремниевой МКМ в монолитном обрамлении толщиной 260 мкм, остальные характеристики приведены на рис. 1. ИК спектры просвечивающего матрицу света записывались на отечественном Фурье-спектрометре Инфралюм ФТ-801, оснащенный ИК микроскопом. К помощи ИК микроскопа, определяющего засвечиваемый участок матрицы, пришлось прибегнуть после того, как было установлено, что ИК спектры, полученные в разных местах объекта, различались. Последнее, по-видимому, обусловлено тем, что кремниевая МКМ является фотонным кристаллом, спектры пропускания которого имеют сильную структурную и ориентационную зависимости в ИК диапазоне света [20]. По этой причине запись исходного опорного сигнала от чистой матрицы и все последующие проводились при постоянной ориентации "свет—матрица" в строго выбранных местах, фиксируемых ИК микроскопом. Получаемые сигналы нормировались на опорный спектр и в таком виде строились на рисунках. Следует отметить, что эффекты поглощения и рассеяния света на использованной Si-MKM отнимали более 90 % интенсивности излучения источника.

Обработка микроканального носителя и запись ИК спектров осуществлялись следующим образом. Пластина Si-MKM предварительно проходила тщательную химическую очистку, после которой в заранее выбранном месте снимался спектр на пропускание — опорный сигнал для последующей нормировки. Затем поверхность носителя функционализировалась аminosодержащим силаном (3-аминопропилтриметоксисилан) и сушилась. Последующая запись ИК спектра проводилась на том же участке и при сохраненной ориентации объекта. Удаление растворов из микроканалов было необходимой процедурой для того, чтобы избежать полного поглощения света капиллярной жидкостью. Далее носитель заливался раствором ДНК тимуса теленка, фрагментированной ультразвуком с концентрацией 1 мг/мл, при периодическом встряхивании выдерживался не менее 8 ч, затем промывался в бидистиллированной воде и сушился. Повторялась запись ИК спектра. ДНК фиксировалась на поверхности Si-MKM посредством электростатического взаимодействия между отрицательно заряженным рибозофосфатным остовом биополимера и положительно заряженной поверхностью носителя. Эталонные спектры аminosиланов и ДНК тимуса теленка были получены методом двойного прохождения света через пленки этих веществ, осажденных/осушенных и раскатанных, соответственно, на поверхности плоского золотого зеркала. Эти сигналы нормировались на спектр отражения от чистого зеркала.

Результаты спектрального анализа демонстрирует рис. 4. ИК спектры аminosиланов выделены отдельно на рис. 4, а в виде двух эталонных и одной "микроканальной" кривых. Эталонный спектр аminosилана на плоской поверхности носителя нам удалось получить только после выполнения трех циклов "осаждение/сушка", в то время как Si-MKM позволила записать спектральную характеристику с первого раза. Видно, что это идентичные спектры, однако "микроканальная" кривая имела более выраженный эффект поглощения во всем регистрируемом диапазоне 3500...600 см^{-1} .

Эталонный спектр ДНК, в котором отсутствовала аminosилановая составляющая поглощения, и спектр поглощения Si-MKM, содержащей ДНК и аminosиланы, приведены на рис. 4, б. Представлен наиболее характерный для поглощения ДНК диапазон 1800...800 см^{-1} .

В чистом спектре ДНК можно выделить хорошо просматриваемые интенсивные полосы поглощения 1705...1636 см^{-1} (1) и линии поглощения 1531 см^{-1} (2), 1485 см^{-1} (3), 1415 см^{-1} (4), 1369 см^{-1} (5), которые связывают с колебаниями связей C—H и C—N в азотистых основаниях ДНК [21—23]. Аналогичные полосы и линии поглощения только с меньшей модуляцией сигнала присутствовали и в спектре веществ, иммобилизованных в Si-MKM, что неопровержимо доказывало наличие молекул ДНК в 3-мерном носителе.

В спектрах пропускания Si-MKM в ИК диапазоне линии поглощения, обусловленные возбуждением колебаний фосфатной группы ДНК 1242...1238 см^{-1} (6) и 1107...1064 см^{-1} (7) [21, 23], либо заметно теряли в интенсивности сигнала, как это видно по линии 1242...1238 см^{-1} (6), либо попадали в область поглощения аminosиланов (полоса 1150...1000 см^{-1}) и

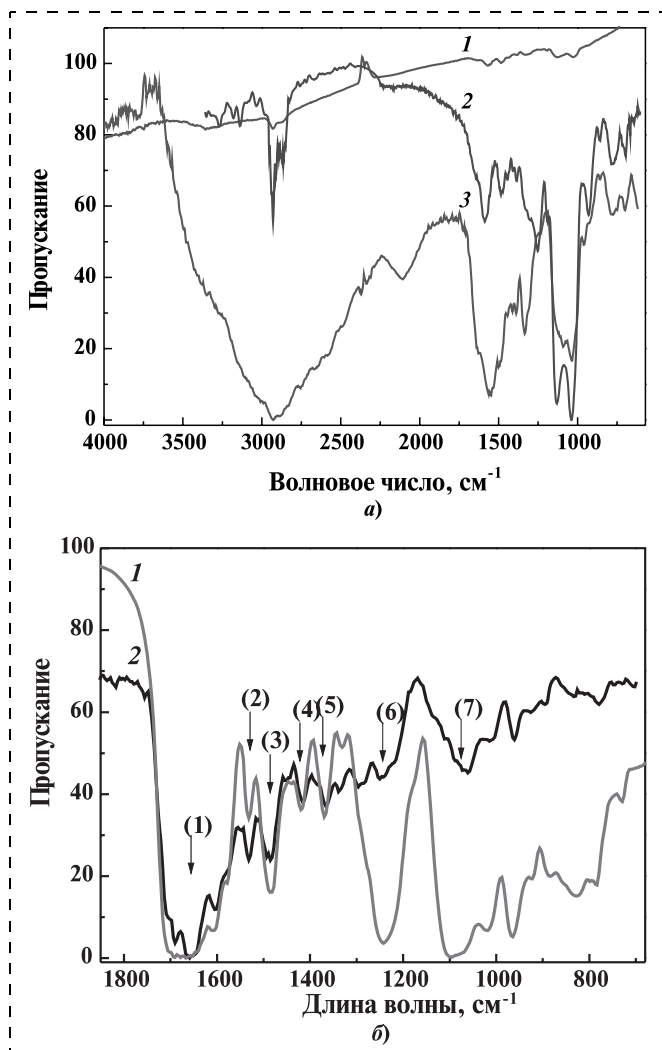


Рис. 4. ИК спектры пропускания:

a — пленки аминоксодержащего силана, адсорбированного на плоском носителе после одного (кривая 1) и трех (кривая 2) циклов "осаждение/сушка" и в Si-MKM после одного цикла (кривая 3); *б* — пленки ДНК, раскатанной на плоском носителе (эталонный спектр) (кривая 1); пленок аминоксиданов и ДНК, адсорбированных в Si-MKM (кривая 2)

становились малоинформативными. Последнее было характерно и для поглощения дезоксирибозного остатка ДНК в области $1018...960\text{ см}^{-1}$.

Полученные результаты по инфракрасному поглощению эталонной и анализируемой с помощью микроканальной матрицы ДНК, а также литературные источники с кратким указанием природы полос и линий поглощения были систематизированы и приведены в табл. 2.

Из представленных выше материалов следует, что с помощью Si-MKM мы можем осуществить прямой спектральный анализ ДНК в инфракрасном диапазоне света при соблюдении условий, установленных в ходе настоящих исследований. В частности, при проведении гибридационного анализа ДНК надо учитывать наложение спектров поглощения молекул, принадлежащих разным адсорбированным веществам, которые помимо целевой ДНК и олигонуклеотидных зондов модифицируют/функционализируют поверхность носителя. Конкретно в нашем

случае регистрация ИК спектров в диапазоне волнового числа $1800...1400\text{ см}^{-1}$ позволила уверенно выявить в микроканалах как наличие аминоксидановых остатков по их сильному поглощению в области $1650...1500\text{ см}^{-1}$, обусловленному деформационными колебаниями молекул [24] (рис. 4, *a*), так и появление ДНК по интенсивной полосе поглощения азотистых оснований $1705...1655\text{ см}^{-1}$ (рис. 4, *б*) [21–23].

4. Кремниевая МКМ — двумерная дифракционная решетка

Строго упорядоченное расположение микроканалов в матрице создает эффективную двумерную дифракционную решетку для света, имеющего достаточно высокий коэффициент поглощения в кремнии, т. е. для длин волн $\lambda < 1100\text{ нм}$. Падающая световая волна дифрагирует на входной апертуре кремниевой МКМ, трансформируется и поглощается в микроканалах [25, 26] и, наконец, рассеивается на выходной апертуре решетки с определенной угловой дисперсией. В частности, при дифракции на матрице монохроматического когерентного пучка света формируется четкая интерференционная картина на экране в виде двумерной решетки (см. рис. 1). Таким образом, кремниевая МКМ создает пространственное спектральное распределение интенсивности света на приемном устройстве. В этом спектре содержится информация как о процессах, произошедших с электромагнитным излучением внутри микроканалов (поглощение, люминесценция, комбинационное рассеяние), так и о среде, находящейся между матрицей-носителем и приемником (ПЗС-камерой, фотодиодной матрицей и т. д.). Последнее представляет определенный интерес, поскольку появляется возможность контролировать растворы, прокачиваемые через проточный Si-MKM-реактор, например, по показателю преломления.

Высказанное предположение было проверено в исследовании интерференционных спектров, образующихся при прохождении света через кремниевую МКМ, закрепленную в специальном держателе и погруженную в различные среды: бидистиллированную воду, органические растворители — метанол, ацетонитрил, этанол с показателем преломления n , равным, соответственно, 1,3341; 1,3286; 1,3441, 1,3616. Микроканальная мембрана имела толщину $\sim 80\text{ мкм}$ и каналы, нормальные к поверхности. Измерения оптической плотности объекта осуществлялись с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-2100 в диапазоне длин волн $200...800\text{ нм}$.

Полученные при строго контролируемой юстировке "прибор—объект" интерференционные спектры оптической плотности приведены на рис. 5, *a*. Характерной особенностью представленных кривых является их постоянное спектральное смещение, коррелированное со сменой среды. Зависимость длины волны $\lambda_{\text{макс}}$, отвечающей максимальной оптической плотности объекта в области $440...520\text{ нм}$, от показателя преломления n жидкостей представлена на рис. 6. Видно, что удается уверенно различать среды, отличающиеся по показателю преломления на $\Delta n = 0,0055$ (метанол и вода).

Таким образом, полученные результаты убедительно показали, что при использовании кремниевой МКМ в качестве дифракционной решетки оптическое детекти-

Линии и полосы инфракрасного поглощения света эталонной и иммобилизованной в Si-MKM ДНК с указанием их природы (литературные источники)

Линии и полосы поглощения ДНК, см ⁻¹		Природа полос поглощения согласно литературным источникам
эталонная	"микроканальная"	
1705—1636	1705—1655	Г, Т, Ц, А [21, 22]
1604—1605	1601	C=N в Ц, N—H в А [23], 1609 см ⁻¹ растяжение C7=N в А [21]
Плечо 1578	Плечо 1574	Растяжение пурина N7 [21]
1531	1531	Вибрации Г и Ц [21, 22]
1485	1485	C8—N, связанная с колебаниями кольца Г [23], плечо 1483 см ⁻¹ А, Г [22]
1419—1416	1415	деформация C—N, N—H, растяжение C—N [23]
1369	1369	1370 см ⁻¹ растяжение C—N в Ц и Г [23]
1331	1338	1328 см ⁻¹ растяжение C—N в Т и А [23]
—	1296	1294 см ⁻¹ Ц, А [21]
1242—1238	—	1238 см ⁻¹ несимметричное растяжение PO ₂ ⁻ -группы [23], 1222 см ⁻¹ несимметричное растяжение PO ₂ ⁻ -группы [21]
1107—1064	1091—1057	1094 см ⁻¹ симметричное растяжение PO ₂ ⁻ -группы [23], 1088 см ⁻¹ симметричное растяжение PO ₂ ⁻ -группы [21]
1018	1010	1016 см ⁻¹ C—O дезоксирибоза [22], 1011 см ⁻¹ растяжение C—O дезоксирибозы [23]
964	960	C—O дезоксирибоза, C—C [23]

* Азотистые основания: Г — гуанин, Т — тимин, Ц — цитозин, А — аденин.

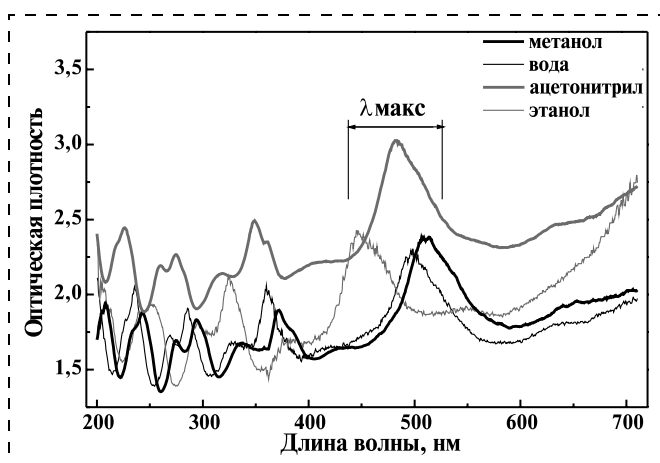


Рис. 5. Интерференционные спектры света при дифракции на Si-MKM, заполненной метанолом ($n = 1,3286$); водой ($n = 1,3341$); ацетонитрилом ($n = 1,3441$) и этанолом ($n = 1,3616$)

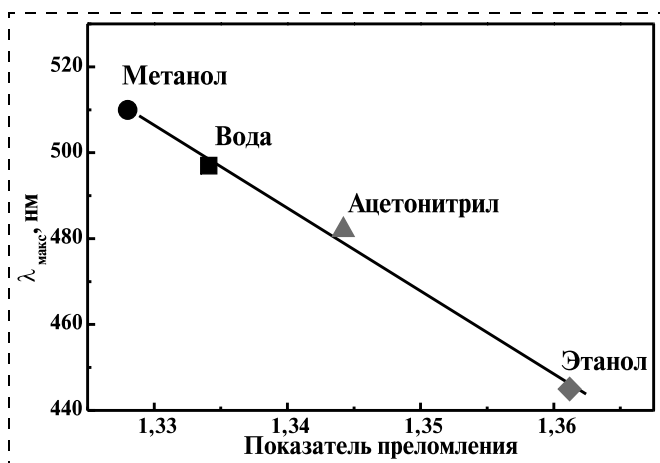


Рис. 6. Зависимость $\lambda_{\text{макс}}$ оптической плотности от показателя преломления среды в диапазоне длин волн 440...520 нм

рование продуктов биохимических реакций в микроакторах на их основе может быть дополнено спектральным анализом дифрагированных пучков света.

Заключение

В настоящей работе впервые представлены результаты исследований, убедительно показывающие возможность применения кремниевых микроканальных матриц для создания высокочувствительных ДНК-сенсоров и впоследствии оптических биочипов посредством мультиплицирования измерительных ячеек. Основным преимуществом кремниевых МКМ, помимо развитой поверхности с упорядоченной структурой, является перспектива разработки биометрических систем, обеспечивающих спектральный анализ адсорбированных биоматериалов в широком диапазоне длин волн (от УФ до ИК) различными оптическими методами (поглощение, комбинационное рассеяние, интерференция дифрагированных пучков света, люминесценция).

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН в рамках междисциплинарных интеграционных проектов № 55, № 73 и частично грантов Программы Президиума РАН "Молекулярная и клеточная биология" № 10.6 и РФФИ № 06-04-49263-а.

Список литературы

1. Черч Дж. Каждому — по геному! // В мире науки. 2006. № 4. С. 30—39.
2. Heller M. J. DNA microarray technology: device, systems, and applications // Annu. Rev. Biomed. Eng. 2002. № 4. P. 129—153.
3. Marcotter E. R., Srivastava L. K., Quirion R. DNA microarrays in neuropsychopharmacology // Trends Pharmacol. Sci. 2001. 22. 426—436.
4. Лысов Ю., Флорентьев В., Хорлин А. и др. Определение нуклеотидной последовательности ДНК гибридизацией с олигонуклеотидами. Новый метод // ДАН СССР. 1988. № 303. С. 1508—1511.

5. Drmanac R., Labat I., Brunker I., Crkvenjakov R. Sequencing of megabase plus DNA by hybridization: Theory of the method // Genomics. 1989. 4 Issue 2. P. 114–128.
6. Benoit V., Steel A., Torres M., Yu Y.-Y., Yang Y., Cooper J. Evaluation of Three-Dimensional Glass Biochip for Multiplexed Nucleic Acid Fluorescence Hybridization Assays // Analytical Chemistry. 2001. N 73. P. 2412–2420.
7. Хомякова Е. Б., Лифшиц М. А., Шаронов А. Ю. и др. Анализ совершенных и мисматчевых ДНК-дуплексов с помощью полного гексануклеотидного микрочипа // Молекулярная биология. 2003. № 37. С. 726–741.
8. Заседателев А. С. Биологические микрочипы для медицинской диагностики (нанобиотехнология) // Высокие технологии. Российский вестник. 2005. № № 1, 2, 3/2005. С. 36–37.
9. Fredrickson H. L., Perkins E. J., Bridges T. S., Tonucci R. J., Fleming J. K., Nagel A., Diedrich K., Mendez-Tenorio A., Doktycz M. J., Beattie K. L. Towards environmental toxicogenomics — development of a flow-through, high-density DNA hybridization array and its application to ecotoxicity assessment // The Science of the Total Environment. 2001. N 274. P. 137–149.
10. Cheek B. J., Steel A. B., Torres M. P., Yu Y.-Y., Yang H. Chemiluminescence Detection for Hybridization Assays on the Flow-Thru Chip, a Three-Dimensional Microchannel Biochip // Analytical Chemistry. 2001. N 73. P. 5777–5783.
11. Matsumoto F., Nishio K., Masuda H. Flow-through Type DNA Array Using Ideally Ordered Anodic Porous Alumina. Abs. 745.205th Meeting, 2004, The Electrochemical Society, Inc.
12. Vlassioulis I., Krasnoslobodtsev A., Smirnov S., Germann M. "Direct" Detection and Separation of DNA Using Nanoporous Alumina Filters // Langmuir. 2004. N 20. P. 9913–9915.
13. Tonucci R. J., Justus B. L., Campillo A. J., Ford C. E. Microchannel array glass // Science. 1992. N 258. P. 783–785.
14. Masuda H., Yamada H., Satoh M., Asoh H., Nakao M., Tamamura T. Highly ordered nanochannel-array architecture in anodic alumina // Applied Physics Letters. 1997. N 71. P. 2770.
15. Lehmann V., Grüning U. The limits of macropore array fabrication // Thin Solid Films. 1997. N 297. P. 13–17.
16. Lehmann V., Rönnebeck S. The Physics of Macropore Formation in Low-Doped p-Type Silicon // J. Electrochem. Society. 1999. 146. P. 2968–2975.
17. Астрова Е. В., Боровинская Т. Н., Толмачев В. А. и др. Технология создания рисунка в макропористом кремнии и получение полос двумерных фотонных кристаллов // ФТП. 2004. 38. С. 1125–1128.
18. Старков В. В., Гаврилин Е. Ю., Вяткин А. Ф. Исследование нуклеационной стадии процесса анодного травления кремния // Микросистемная техника. 2004. № 12. С. 23–26.
19. Siegmund O. H. W., Tremsin A. S., Vallerger J. V., Beetz C. P., Boerstler R. W., Yang J., Winn D. Progress in the development of silicon microchannel plates // Proc. of SPIE. 2002. 4497. P. 139–148.
20. Bettotti P., Dal Negro L., Gaburro Z., Pavesi L., Lui A., Galli M., Patrini M., Marabelli F. P-type macroporous silicon for two-dimensional photonic crystals // J. Appl. Phys. 2002. 92 (12). P. 6966.
21. Ouameur A. A., Tajmir-Riahi H.-A. Structural Analysis of DNA Interactions with Biogenic Polyamines and Cobalt(III)hexamine Studied by Fourier Transform Infrared and Capillary Electrophoresis // The J. Biol. Chem., 2004. 279 (40).
22. Alex S., Dupuis P. FT-IR and Raman investigation of cadmium binding by DNA // Inorganica Chimica Acta. 1989. 157. P. 271–281.
23. Dovbeshko G. I., Gridina N. Ya., Kruglova E. B. et al. FTIR spectroscopy studies of nucleic acid damage // Talanta. 2000. N 53. P. 233–246.
24. Казыцина Л. А., Куплетская Н. Б. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектроскопии в органической химии, М.: Изд-во МГУ, 1979.
25. Lehmann V., Stengl R., Reisinger H., Detemple R., Theiss W. Optical shortpass filters based on macroporous silicon // Appl. Phys. Lett. 2001. N 78 (5). P. 589.
26. Avrutsky I., Kochergin V. Optical filtering by leaky guided modes in macroporous silicon // Appl. Phys. Lett. 2003. N 82 (21). P. 3590.

УДК 531.383

Р. В. Алалуев, канд. техн. наук,
Ю. В. Иванов, д-р техн. наук,
В. В. Матвеев, канд. техн. наук,
В. А. Орлов, В. Я. Распопов, д-р техн. наук, проф.
 ГОУ ВПО "Тулский государственный университет"

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ МИКРОСИСТЕМНОЙ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Приведено описание и результаты лабораторных исследований измерительного модуля бесплатформенной инерциальной навигационной системы, выполненного на микросистемной элементной базе.

Измерительный модуль (ИМ) бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) выполняет задачу определения угловых скоростей и линейных ускорений подвижного объекта в связанной с ним системе координат. В результате алгоритмической обработки сигналов, вырабатываемых ИМ, формируются сигналы БИНС, в которых содержится информация о па-

раметрах ориентации и навигационных параметрах подвижного объекта. Применительно к летательному аппарату (ЛА) такими параметрами являются углы курса, крена, тангажа ЛА, скорость и пройденный путь.

Точность выработки навигационных параметров зависит, в первую очередь, от точности работы датчиков угловых скоростей (ДУС) и акселерометров. Вследствие присущих им погрешностей и операций интегрирования, выполняемых электроникой БИНС, происходит накопление ошибок в определении параметров ориентации и навигационных параметров.

Перспективным направлением в развитии БИНС является применение в качестве чувствительных элементов ИМ микромеханических гироскопов (МГ) в качестве ДУС, микромеханических акселерометров (МА) и микросистемной сервисной электроники. Несмотря на самые худшие в настоящее время точностные характеристики МГ и МА среди всех известных типов ДУС и акселерометров, преимущества их в массе, размерах и стоимости настолько очевидны, что интерес к их применению возрастает. Кроме того, их точностные характеристики постоянно улучшаются, а конструктивное исполнение в виде микрочипов переводит их в разряд компонентов электронных схем с характерными для последних технологиями проектирования и изготовления.

В настоящее время отечественные и зарубежные разработчики активно занимаются созданием ИМ на основе микросистемной техники, используя различную элементную базу. В известных публикациях, например [1, 2, 4], приведены интегральные оценки точности ИМ, которые представляют интерес для потребителя, но являются малоинформативными для разработчиков в микросистемных ИМ и БИНС.

При проектировании микросистемных ИМ и БИНС принципиальными являются вопросы об адекватности моделей погрешностей МГ и МА, вероятностной максимальной оценке погрешностей и возможности улучшения точностных характеристик ИМ и БИНС с помощью калмановской фильтрации. Использование дополнительной неинерциальной информации для улучшения точности БИНС является отдельной задачей.

Для ответа на поставленные вопросы был изготовлен измерительный модуль, в котором применены МГ типа ADXRS 150, МА типа ADXL 203. Макет этого модуля и структурная схема приведены на рис. 1 и рис. 2. Данный модуль состоит из трех гироскопов ADXRS 150 и двух акселерометров ADXL 203. Масса, габаритные размеры, потребляемая мощность ИМ без вычислителя составляют соответственно 100 г, $80 \times 80 \times 60$ мм и 0,125 Вт.

Как показано на структурной схеме (рис. 2), сигналы с гироскопов 1 и акселерометров 2 поступают на вход переключателя каналов 4, управляемого вычислителем по шине данных 5. Далее один из выбранных сигналов преобразуется в цифровой код АЦП 3 и поступает на шину данных 5 к вычислителю.

В результате серии испытаний ИМ были получены корреляционная функция и спектральная плотность шума гироскопов, работающих на неподвижном основании (рис. 3, 4).

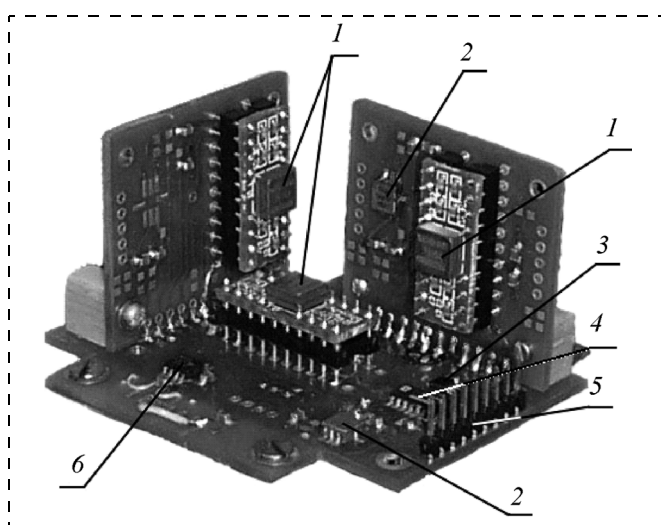


Рис. 1. Макет микросистемного измерительного модуля:
1 — микромеханические гироскопы ADXRS 150; 2 — микромеханические акселерометры ADXL 203; 3 — 16-разрядная АЦП; 4 — переключатель каналов; 5 — разъем для шины данных; 6 — прецизионный линейный стабилизатор напряжения

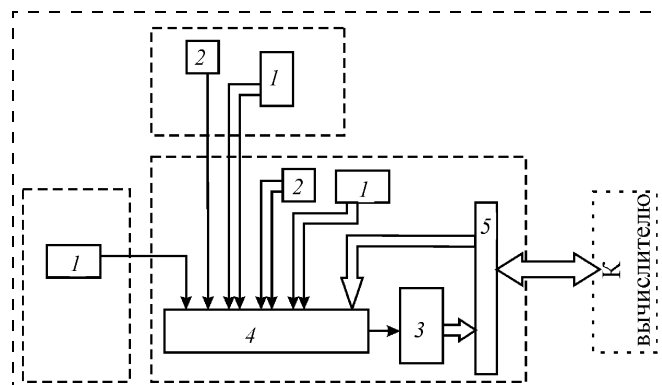


Рис. 2. Структурная схема микросистемного измерительного модуля:
1 — микромеханические гироскопы ADXRS 150; 2 — микромеханические акселерометры ADXL 203; 3 — 16-разрядный АЦП; 4 — переключатель каналов; 5 — шина данных

Из графиков видно, что корреляционную функцию $R_{\dot{\varphi}}(\tau)$ и спектральную плотность $S_{\dot{\varphi}}(\omega)$ шума ДУС можно аппроксимировать зависимостью вида

$$R_{\dot{\varphi}}(\tau) = D_{\dot{\varphi}} e^{-\alpha_{\dot{\varphi}}|\tau|};$$

$$S_{\dot{\varphi}}(\omega) = \frac{2D_{\dot{\varphi}}\alpha_{\dot{\varphi}}}{\omega^2 + \alpha_{\dot{\varphi}}^2} + S_{\text{БШ}\dot{\varphi}}(\omega),$$

где $D_{\dot{\varphi}}$ — дисперсия сигнала ДУС; $S_{\text{БШ}\dot{\varphi}}(\omega)$ — спектральная плотность белого шума ДУС; $R_{\dot{\varphi}}(\tau)$ — корреляционная функция сигнала ДУС; $S_{\dot{\varphi}}(\omega)$ — спектральная плотность шума ДУС.

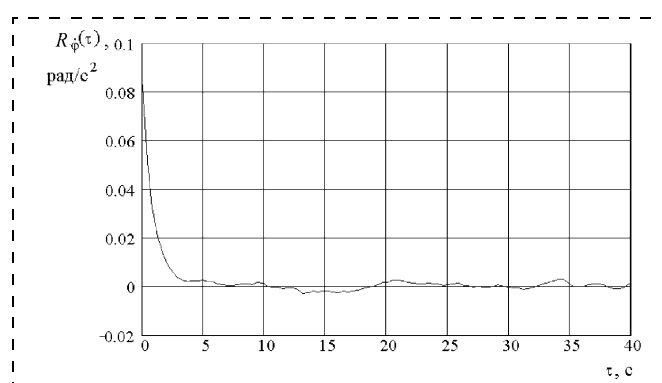


Рис. 3. Корреляционная функция шума МГ

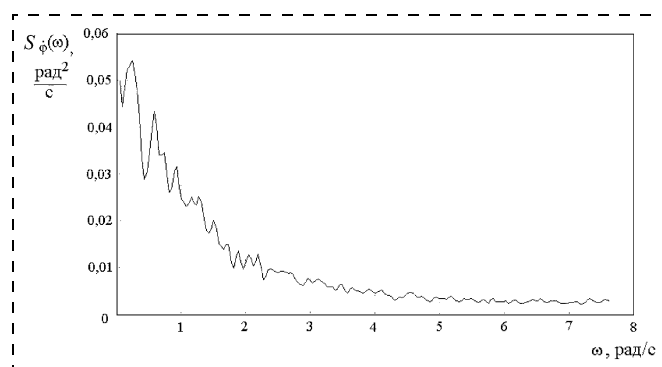


Рис. 4. Спектральная плотность шума МГ

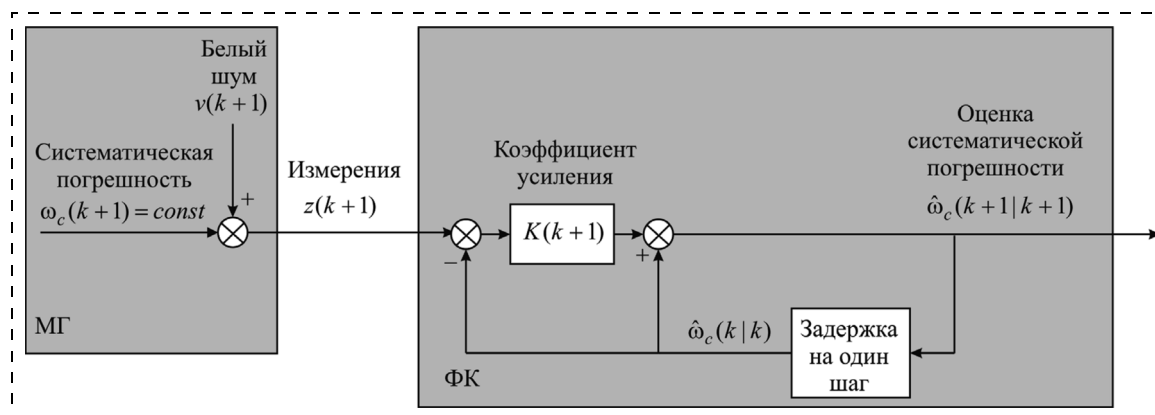


Рис. 5. Структурная схема ФК для калибровки МГ

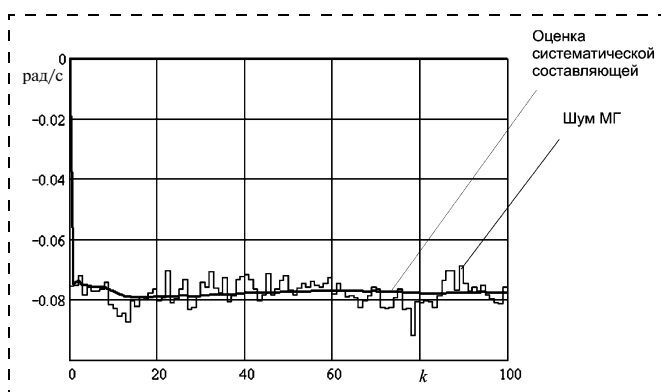


Рис. 6. Оценка систематической составляющей погрешности МГ с помощью ФК

В результате анализа графиков получены следующие значения $D_{\dot{\varphi}}$ и $\alpha_{\dot{\varphi}}$:

$$\alpha_{\dot{\varphi}} = 2,880 \text{ 1/с};$$

$$D_{\dot{\varphi}} = 2,530 \cdot 10^{-5} \text{ (рад/с}^2\text{)}^2.$$

Экспериментальные исследования подтверждают возможность аппроксимации корреляционной

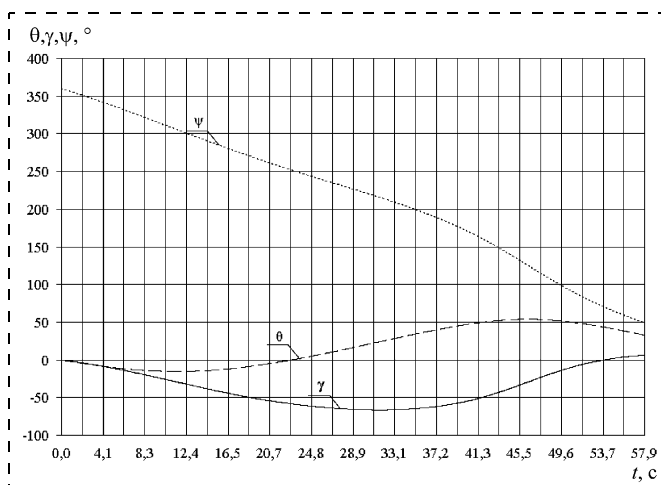


Рис. 7. Уходы ИМ на неподвижном основании, полученные экспериментально без использования фильтра Калмана: γ — угол крена; θ — угол тангажа; ψ — угол курса

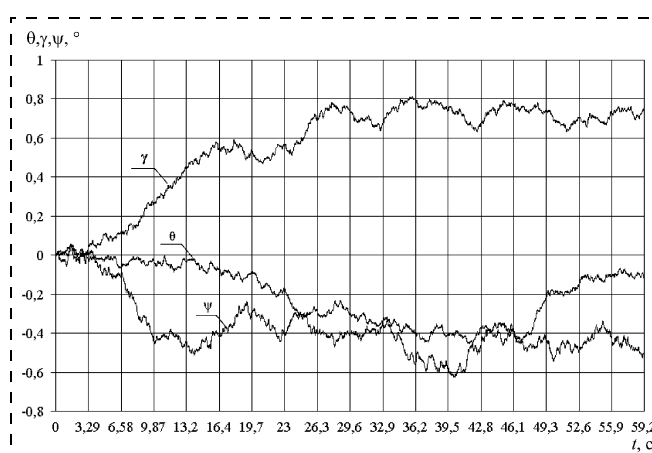


Рис. 8. Уходы ИМ на неподвижном основании, полученные экспериментально с использованием фильтра Калмана:

γ — угол крена; θ — угол тангажа; ψ — угол курса

функции шума микромеханических чувствительных элементов экспоненциальной зависимостью [3].

Помимо случайной погрешности в сигнале МГ присутствует систематическая составляющая. Смещение нуля на выходе МГ приводит после интегрирования при вычислении углов ориентации ЛА к появлению дрейфа.

Для повышения точности автономной работы БИМС обычно осуществляют ее калибровку, под которой понимается процесс уточнения различного рода систематических составляющих погрешностей инерциальных чувствительных элементов [4]. Если пренебречь экспоненциально-коррелированной составляющей шума МГ, то выходной сигнал МГ при отсутствии вращения можно представить как сумму систематической $\omega_c(k+1)$ и белозумной $v(k+1)$ составляющих (здесь и далее k дискретное время). Тогда задачу калибровки можно сформулировать как оценку систематической составляющей по измерениям "засоренным" белым шумом. Достаточно часто калибровку осуществляют с помощью фильтра Калмана (ФК). Преимуществом ФК является то, что измерения $z(k+1)$ можно обрабатывать по мере их поступления и не требуется хранить какие-либо измерительные данные, при этом ФК вырабатывает оптимальную оценку систематической составляющей

$\omega_c(k+1|k+1)$ с точки зрения минимума ошибки оценивания [5]. Структурная схема фильтра Калмана для калибровки МГ представлена на рис. 5.

Коэффициент усиления $K(k+1)$ "взвешивает" невязку измерения и изменяется в пределах от 1 (на ранних тактах) до 0 (на поздних тактах).

На рис. 6 представлен процесс калибровки с помощью ФК.

На рис. 7 и рис. 8 показаны графики уходов ИМ на неподвижном основании, полученные экспериментально без использования фильтра Калмана и с использованием фильтра соответственно.

Использование ФК позволило значительно уменьшить систематическую составляющую дрейфа ИМ.

Выводы

Предложенный измерительный модуль позволяет получать первичную информацию о параметрах движения летательного аппарата, необходимую для реализации алгоритмов БИНС.

Экспериментально показано, что погрешность микроскопа можно представить в виде аддитивной суммы трех составляющих: экспоненциально-коррелированного случайного процесса, белого шума и систематической составляющей. Экспоненциально-

коррелированный случайный процесс может быть оценен при использовании в алгоритмах БИНС дополнительной информации, например, от спутниковой навигационной системы. Эта оценка может быть использована для компенсации случайной погрешности МГ в процессе полета.

Предварительная оценка систематической составляющей погрешности МГ с помощью фильтра Калмана позволила уменьшить уход измерительного модуля по курсу до 360 раз, а по крену и тангажу до 60 раз.

Список литературы

1. Лукашева Э. П., Чистяков Н. В. "Новые" или мини-ДПЛА. ДПЛА.ру. <http://dpla.ru/Articles/NewMiniUAV.htm>
2. Мир "Беспилотников". Тематический сайт. <http://bespilotka.narod.ru/index.htm>
3. Челпанов И. Б., Несенюк Л. П., Брагинский М. В. Расчет характеристик навигационных гироскопов. Л.: Судостроение, 1978.
4. Степанов О. А. Особенности построения и перспективы развития навигационных инерциально-спутниковых систем // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. Сб. статей. С.-Пб. 2001.
5. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1973. 440 с.

СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

УДК 802.0(075.8)

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, доц.,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники (г. Минск),
Е. В. Лацапнёв,
ОАО "Банковский процессинговый центр"
(г. Минск)

АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Даны термины, наиболее употребляемые словосочетания и аббревиатуры по микро- и наносистемной технике, а также технологии их изготовления.

Т

Tactile sensor — тактильный сенсор. Устройство, составленное из нескольких интегрированных сенсоров давления или силовых сенсоров, которые обеспечивают чувство осязания. В тактильных сенсорах в основном используют пьезоэлектрический эффект либо изменение емкости. Для создания современных тактильных сенсоров исследуются

иные, новые методы, использующие изменение сопротивления, напряжения, магнитной силы, интенсивности света и т. д.

Taper — конусность (подложки). Другими словами — клин травления подложки или просто клин. Для использования полупроводниковых подложек в технологии с проекционной фотолитографией они проходят строгий контроль и отбор. Пример контроля: толщина, клин, прогиб подложки и др.

Tape Automated Bonding (TAB) — автоматизированное присоединение кристаллов к выводам. Технология автоматизированной сборки микроизделий на ленточном носителе. Имеется в виду ленточный носитель с выводными рамками (монтажная лента). Технология представляет собой процесс, при котором заранее изготовленные химическим вытравливанием медные лепестки ленты одновременно присоединяют термокомпрессионной сваркой или пайкой эвтектикой на основе золота и олова к каждому столбику прибора на кремниевом кристалле. Столбики формируют путем осаждения золота на контактные площадки чипов; при этом необходимо обеспечить качественную поверхность столбиков для надежного последующего термокомпрессионного соединения. Основные параметры термокомпрессионной сварки: давление, температура и время. Различают че-

тыре типа лент. 1. *Однослойная лента*. Изготавливается путем нанесения рисунка с одной стороны ленты и последующего травления. В качестве материала ленты обычно используют прокатанную отожженную медь толщиной 30—35 мкм. Для улучшения качества соединения медную ленту обычно покрывают тонким слоем золота. 2. *Двухслойная лента*. Может быть изготовлена либо электролитическим осаждением меди на полиимидную пленку, либо литьем полиимидной пленки на медь, либо нанесением полиимида методом трафаретной печати на медную основу. Полиимидная составляющая в двухслойной ленте делает эту ленту более жесткой по сравнению с однослойной лентой. 3. *Трехслойная лента*. Ее формируют из предварительно перфорированной полиимидной пленки толщиной 75—125 мкм, наклеенной эпоксидным клеем на медную основу. 4. *Утолщенная однослойная лента*. Такую ленту обычно изготавливают путем нанесения рисунка методом фотолитографии и вытравливания заданной конфигурации с обеих сторон медной ленты толщиной 65—70 мкм. Ее преимуществом является повышенная жесткость по сравнению с однослойной лентой толщиной 30—35 мкм.

Taq DNA polymerase — ДНК-полимераза Taq. Термостабильная ДНК-полимераза. Сохраняет активность при 95 °С. Часто применяется в методе полимеразной цепной реакции и при секвенировании ДНК по методу Сэнджера. Метод Сэнджера состоит из следующих этапов. Сначала двуспиральную ДНК разделяют на нити, затем на матрице одонитиевой ДНК с помощью фермента ДНК-полимеразы начинают вновь воссоздавать вторую цепь. При этом некоторым специальным способом подается команда прекратить синтез, как только он дойдет до определенного нуклеотида (аденина, скажем, или тимина). Длина недостроенных фрагментов (указывающая, в какой позиции прервана реакция и, следовательно, находится соответствующий нуклеотид) определяется с помощью электрофореза.

Target — мишень. Источник металла для процесса напыления металла. Мишени, в основном, — это круглые, толстые металлические куски большего диаметра, чем пластина, на которую металл осаждается. Мишень имеет особую форму для оптимизации однородности осаждения. Ионное распыление состоит из следующих процессов: ускорения ионов с помощью разности электрических потенциалов; бомбардировки этими ионами мишени. Энергия бомбардирующих ионов достаточна для того, чтобы оторвать атомы мишени от ее поверхности. Атомы металлической мишени отрываются от поверхности мишени и в виде газа долетают до полупроводниковой подложки. Так на поверхности подложки с микроизделиями формируется металлическая пленка (металлизация). При использовании нескольких мишеней происходит процесс

совместного напыления нескольких металлов. Формируется металлическая пленка сложных составов (типа сплавов).

Taxonomy — таксономия. Теория классификации и систематизации сложноорганизованных областей действительности, имеющих обычно иерархическое строение. Например, таксономия МЭМС, предложенная Р. McWhorter (Sandia National Laboratory, США), классифицирует области применения МЭМС в соответствии со следующими четырьмя категориями: неподвижные компоненты; подвижные компоненты, которые не соприкасаются друг с другом; компоненты, которые двигаются и воздействуют друг на друга; компоненты, которые двигаются и имеют трение друг относительно друга.

Temperature Coefficient of Resistance (TCR) — температурный коэффициент сопротивления. В общем случае $TCR = (\Delta R/R)/\Delta T$. Величина, равная отношению относительного изменения сопротивления участка электрической цепи ($\Delta R/R$) к температуре ΔT , вызвавшей изменение сопротивления. Температурный коэффициент сопротивления характеризует зависимость электрического сопротивления от температуры. Измеряется величиной, обратной температуре ($^{\circ}C^{-1}$).

Tensile strength — прочность на разрыв. Способность материала сопротивляться разрушению (разрыву) при действии внешних нагрузок. Прочность на разрыв зависит не только от самого материала, но и от вида напряженного состояния (растяжение, изгиб и др.), а также от условий эксплуатации (температуры, скорости нагружения, длительности и числа циклов нагружения, воздействия окружающей среды и т. д.).

Terminal — терминал. Точка, к которой может быть присоединен проводник. Например, контактная площадка, переходное отверстие, *T*-образное соединение (*T-junction*), псевдовывод (*pseudo-pin*).

Tertiary structure of protein — третичная структура белка. Высшая пространственная структура, образующаяся в результате самоукладки отдельной полипептидной цепи. Третичная структура формируется в результате нековалентных взаимодействий (электростатические, ионные, силы Ван-дер-Ваальса и др.) боковых радикалов, обрамляющих α -спирали и β -складки, и неперриодических фрагментов полипептидной цепи. Среди связей, удерживающих третичную структуру, следует отметить: а) дисульфидный мостик ($-S-S-$); б) сложноэфирный мостик (между карбоксильной группой и гидроксильной группой); в) солевой мостик (между карбоксильной группой и аминогруппой); г) водородные связи. В соответствии с формой белковой молекулы, обусловленной третичной структурой, выделяют следующие группы белков: глобулярные белки и фибриллярные белки. Пространственная структура глобулярных белков в грубом приближении может быть представлена в

виде шара или не слишком вытянутого эллипсоида — глобулы. Фибриллярные белки имеют вытянутую нитевидную форму, они выполняют в организме структурную функцию.

Tesla — тэсла. Обозначение: Тл. Единица измерения магнитной индукции в системе СИ: $1 \text{ Тл} = \text{Вб/м}^2 = 10^4 \text{ Гс}$. Единица названа в честь изобретателя Николы Тесла (США). Максимальная теоретически возможная магнитная индукция нейтронной звезды, а следовательно, любого известного тела — 10^{13} Тл .

Tetra Ethyl Ortho Silane (TEOS) — тетраэтоксилан. Химическое вещество, которое используется в процессе химического осаждения из газовой фазы диоксида кремния SiO_2 . Химическая формула $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$. Используется для того, чтобы получаемые пленки были конформные (см. также *Con-formal*).

Tetra Methyl Ammonium Hydroxide (ТМАН) — тетраметилгидроксид аммония. Химическое вещество, которое используется для обработки фоторезиста, после того как подложка, покрытая фоторезистом, была подвержена экспонированию.

Thermal actuator — тепловой актюатор. Тепловые исполнительные микроустройства (тепловые актюаторы) используют как линейное или объемное расширение жидкости или газа, так и деформацию формы вследствие биметаллического эффекта, которые возникают вследствие изменения температуры. Преимущества тепловых микроактюаторов: простая конструкция, рабочими элементами являются резистор нагрева, а также (для использования биметаллического эффекта) пленочная структура; подходящий размер, лежащий в микродиапазоне, согласно формуле Фурье; быстрое действие при уменьшении размеров возрастает квадратично; в качестве активных элементов применимы почти любые материалы, которые кроме различных коэффициентов расширения должны обладать достаточной прочностью. Обычно в качестве нагревателя используются резисторы извилистой формы, которые можно легко изготовить с использованием тонко- или толстопленочной технологии. Недостатки: в настоящее время нагревательный элемент потребляет очень много энергии для того, чтобы тепловой актюатор смог развить относительно большое усилие, т. е. невысокий КПД; нагревательный элемент необходимо охлаждать, чтобы вернуть актюатор в исходное положение, а значит, теплота должна быть рассеяна в окружающую среду. Это, естественно, занимает некоторое количество времени и ограничивает быстрое действие.

Thermal conductivity — теплопроводность. Теплопроводность — это способность вещества переносить тепловую энергию, а также количественная оценка этой способности (также называется коэффициентом теплопроводности). Явление теплопроводности заключается в том, что кинетическая энергия атомов и молекул, которая определяет

температуру тела, передается другому телу при их взаимодействии или передается из более нагретых областей тела к менее нагретым областям. Единица измерения $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Thermal expansion coefficient — коэффициент теплового расширения. Изменение размеров тела при его нагревании. Характеризуется коэффициентом объемного расширения, а для твердых тел — и коэффициентом линейного расширения. Температурный коэффициент линейного расширения — физическая величина, равная отношению изменению линейного размера тела при изменении температуры на 1 К. Температурный коэффициент объемного расширения — физическая величина, равная отношению изменению объема тела при изменении температуры на 1 К. Например, вода имеет коэффициент объемного расширения около 10^{-3} . Для железа коэффициент линейного расширения равен 10^{-5} .

Thermistor — термистор. Другое название — терморезистор (от греч. *therme* — тепло, жар; от лат. *resisto* — сопротивляюсь). Полупроводниковый резистор, электрическое сопротивление которого существенно убывает или возрастает с ростом температуры. Для терморезистора характерны: большой температурный коэффициент сопротивления (в десятки раз превышающий эту величину у металлов); простота устройства; способность работать в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках; стабильность характеристик во времени. Терморезистор изготавливают в виде стержней, трубок, дисков, шайб, бусинок и тонких пластинок преимущественно методами порошковой металлургии; их размеры варьируют в пределах от 1–10 мкм до 1–2 см. Основными параметрами терморезистора являются: номинальное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, интервал рабочих температур, максимально допустимая мощность рассеяния. Термистор был изобретен Самюэлем Рубеном (Samuel Ruben, США) в 1930 г.

Thermocompression bonding — соединение методом термокомпрессии. Метод, заключающийся в расплавлении промежуточного слоя (это обычно поликремний, стекло или золото) между двумя подложками, прижатыми давлением друг к другу. При сборке микросистем иногда используют защитные подложки. После установки защитной подложки микроустройства могут подвергаться любым технологическим процедурам, необходимым для изготовления микроизделий, включая создание проводных соединений и посадку в пластмассовые корпуса. При соединении подложек из кремния и стекла применяют поликремний, легированный фосфором. Основные этапы процесса. Сначала подложки выравниваются друг относительно друга. После этого выровненные подложки фиксируются в зажимном устройстве. Между ними устанавливается определенный зазор. Зажимное

устройство с подложками помещается в вакуумную камеру, где происходит процесс их соединения. Он длится несколько минут и обеспечивается методами локального нагрева и давления. Для соединения кремниевых и стеклянных подложек с использованием метода эвтектического плавления вместо поликремния может применяться золото (в качестве соединяющего материала). Соединение алюминиевых и стеклянных подложек также проводится с участием метода эвтектического плавления. Выполняется это следующим образом. На поверхность одной из подложек напыляются резистивные нагревательные элементы из золота, которое также используется как соединительный материал. Температура таких микронагревателей растет пропорционально силе тока, протекающего по ним. Посредством силы тока можно управлять процессом соединения подложек. (*Примечание.* Стеклянные подложки — когда речь идет о структурах кремний-на-изоляторе (типа Si-SiO₂)). Подложки кремний—кремний тоже могут скрепляться методом плавления с использованием поликремния в качестве нагревательного и соединяющего материала.

Thermocouple — термопара. Термочувствительный элемент в измерительных и преобразовательных устройствах. Термопара состоит из двух последовательно соединенных разнородных проводников. Принцип действия термопары основан на измерении термоЭДС, возникающей в месте контакта проводников при наличии разности температур. Пример: платино-родиевая термопара.

Thermoplastic polymer — термопластичный полимер. Полимеры считаются термопластичными, если под действием нагрузки, обычно при высокой температуре, они сжимаются или растягиваются, т.е. являются мягкими (текучими), а при охлаждении затвердевают. Примерами являются: полиэтилен с высокой плотностью, поливинилхлорид и др.

Thermoset polymer — термоотверждающийся (термореактивный) полимер. Полимеры, которые не текут при нагреве, поскольку они соединены вместе как сеть. Их используют в производстве автомобилей, мебели, лыжных ботинках и т. д. Также используются в электрической изоляции, в покрытии стекловолокон, микроволновых контейнерах. Термоотверждающийся полимер имеет ковалентные связи, соединяющие полимерные цепи в трех измерениях. Эти связи предотвращают цепи от сдвига одной части относительно другой, приводя к более высокому модулю упругости и более лучшему сопротивлению ползучести. Обычно данный полимер более хрупкий, чем термопластики. Термоотверждающийся полимер формируют из цепей термопластичного полимера, которые в дальнейшем связывают ковалентной связью одну цепь с другой в ходе процесса под названием сшивание (*crosslinking*). Сшивание можно вызвать нагреванием, освещением, некоторыми химически-

ми реагентами. Этот процесс необратим, в результате получают вещества, которые не могут быть повторно переработаны.

Thermosonic bonding — ультразвуковое соединение с подогревом. Технология подобна термокомпрессионному соединению (см. также *Thermocompression bonding*), за исключением использования добавки в виде высокочастотного ультразвукового колебания на наконечнике в ходе процесса соединения. Температура поверхности контактного взаимодействия около 100—150 °С и это позволяет избегать высокотемпературных эффектов термокомпрессионного соединения, при котором температура превышает 300 °С.

Thick film technology — технология толстых пленок. Технология формирования толстых пленок на подложке. Эти пленки применяются для разработки новых типов пьезоэлектрических и магнитных микроактуаторов.

Thin film technology — технология тонких пленок, тонкопленочная технология. Технология формирования тонких пленок на подложке. Тонкая пленка — это пленка, формируемая на подложке с помощью вакуумного осаждения или ионного распыления и других технологий. Диапазон толщин тонких пленок варьируется от слоя из отдельных молекул или атомов и до 1 мкм. Тонкие пленки могут изменять свойства, такие как цвет, отражательная способность, коэффициент трения подложки, в то время как форма подложки остается практически неизменной. Явления, такие как оптическая интерференция и поверхностная диффузия, значительно влияют на формирование тонких пленок. Формирование тонких пленок проходит через неравновесный, гетерогенный атомный этап формирования, который порождает структурные свойства, отличные от тех, что получаются при обычных состояниях равновесия. Например, технологию тонких пленок вкупе с травлением используют для повышения уровня интеграции головки теплового принтера.

Threshold — порог, пороговая величина. Минимальный входной сигнал, который будет причиной считываемого изменения в выходном сигнале. Минимальный уровень для изменения эффекта.

Time-consuming — затратный по времени, трудоемкий. Примеры трудоемких процессов: производство высококачественных кремниевых подложек для изготовления микроизделий; подготовка графитовых подложкодержателей для эпитаксиального наращивания слоев кремния; изготовление фотошаблонов и т. д. Наиболее часто термин используется в моделировании для обозначения этапов, которые требуют высокой вычислительной мощности и достаточно продолжительны по времени. Например, расчет тепловых характеристик микросистемы методом конечных элементов.

Titanium nitride — нитрид титана. Соединение титана и азота состава TiN_x ($x = 0,58 \div 1,00$). Пред-

ставляет собой фазу внедрения с широкой областью гомогенности. Кристаллы с кубической решеткой. Нитрид титана очень инертен и хорошо служит как барьерный металл. Нитрид титана очень твердый материал (~85 твердость по шкале Роквелла и ~2500 твердость по Виккерсу), его плотность 5,43 г/см³, температура плавления 2930 °С. Обладает хорошим сцеплением с диэлектриками, имеет низкую способность соединения с проволокой. Легко травится и в нем легко формируется требуемое изображение. Часто используется как покрытие для сплавов титана, стали, карбида и алюминиевых компонентов для улучшения свойств поверхности подложек. Применяется в биомедицинских устройствах, биоимплантатах, аэрокосмической области и в военных целях.

Titatium silicide — силицид титана. Химическая формула TiSi₂. Соединение кремния с титаном, которое получается химическим осаждением из газовой фазы. Используется для уменьшения сопротивления металлических контактов на кремнии.

Torque — вращающий момент, крутящий момент. Мера внешнего воздействия, изменяющего угловую скорость вращающегося тела. Вращающий момент равен алгебраической сумме моментов всех действующих на вращающееся тело сил относительно оси вращения.

Torr — торр. внесистемная единица давления. 1 Торр = 133,322 Па. Названа в честь Э. Торричелли (Италия). В научной литературе на русском языке чаще применяется равная ей единица — миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.).

Torsional micromirror — вращательное (крутильное) микрозеркало. Микрозеркало, которое изменяет свое положение при приложении к нему электрического потенциала. Увеличение управляющего напряжения приводит к увеличению частоты вращения. Применяются микроустройства в цифровых проекционных дисплеях, принтерах и оптическом коммуникационном оборудовании.

Total Thickness Variation (TTV) — полный разброс по толщине. В полупроводниковой технологии это разница между максимальной и минимальной толщиной пластины.

Toughness — прочность. Свойство материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, возникающих от внешних нагрузок. Существует несколько теорий прочности: теории Галилея, Мариотта, Кулона, Губера, Мора. Галилей предположил, что нарушение прочности в общем случае напряженного состояния наступает, когда наибольшее нормальное напряжение достигает своего критического значения. По теории Мариотта нарушение прочности достигается, когда наибольшая линейная деформация достигает своей критической величины. По теории наибольших касательных напряжений, предложенной Кулоном, нарушение прочности в общем случае напряженного состояния наступает, когда наибольшее касатель-

ное напряжение достигает своего критического значения. По энергетической теории формы измерения, предложенной Губером, опасное состояние (текучесть) в общем случае напряженного состояния наступает, когда удельная потенциальная энергия формы измерения достигает своего критического значения. По теории прочности предельных напряженных состояний (теория Мора) оценка прочностных характеристик исследуемых изделий основывается на учете значения и знака наибольшего и наименьшего главных напряжений.

Transcription — транскрипция. Биосинтез РНК на матрице ДНК, осуществляющийся в клетках организма. Транскрипция — первый этап реализации генетического кода, в ходе которого последовательность нуклеотидов ДНК переписывается в нуклеотидную последовательность РНК.

Transducer — трансдюсер. Это устройство, обычно электрическое, электронное, электромеханическое, которое преобразует одну форму энергии в другую для достижения неких измерительных задач, а также информационного преобразования. В более широком смысле под трансдюсером понимают устройство, конвертирующее одну форму сигнала в другую. Например, в электромагнетике антенна преобразует электромагнитные волны в электрический ток и наоборот; люминесцентная лампа — электрическую энергию в видимый свет; сенсор на эффекте Холла — магнитное поле в электрическую форму. В электроакустике микрофон преобразует изменения давления воздуха в электрический сигнал, пьезоэлектрический кристалл — изменения давления в электрическую форму. В фотоэлектронике лазерный диод преобразует электрическую энергию в форму света, фотодиод — изменение уровня света в электричество. В электромеханике примерами трансдюсеров являются: микроактюаторы, гальванометры, акселерометры, переключатели, тензодатчики.

Transduction mode (direct or indirect) — режим преобразования (прямой и непрямой). Так сенсор воспринимает заданную информацию от материала. В общем этот параметр — индикация способности сигнала сенсора обеспечить информацию в соответствии со свойством материала или интересующим состоянием.

TRNA (Transfer RNA) — транспортная РНК, тРНК. Используются для транспорта аминокислот к рибосомам. Их более 30 видов, длина тРНК от 76 до 85 нуклеотидных остатков, они имеют третичную структуру за счет спаривания комплементарных нуклеотидов и по форме напоминают лист клевера. В тРНК различают антикодоновую петлю и акцепторный участок. На верхушке антикодоновой петли каждая тРНК имеет антикодон, комплементарный кодовому триплету определенной аминокислоты, а акцепторный участок способен с помощью фермента аминоксил-тРНК-синтетазы

присоединить именно эту аминокислоту (с затратой АТФ).

Transient analysis — анализ переходных процессов. Алгоритм анализа переходных процессов раскрывает мгновенное состояние микросистемы как функцию времени.

Transient response — переходная характеристика. Переходной характеристикой некоторой системы $\eta(t)$ называют отклик этой системы на воздействие в виде единичной ступеньки (так называемой σ -функции, функции включения, функции Хевисайда (Англия)). Функция Хевисайда, единичная функция, ступенька положения — специальная математическая функция, значение которой равно нулю для отрицательных аргументов и единице для положительных аргументов:

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1/2, & x = 0; \\ 1, & x > 0. \end{cases}$$

Transistor — транзистор. От англ. *transfer* — переносить и *resistor* — сопротивление. Полупроводниковый прибор для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов, выполненный на основе монокристаллического полупроводника (преимущественно Si или Ge), содержащего не менее трех областей с различной — электронной (n) и дырочной (p) — проводимостью. Например, интегральная микросхема может содержать миллионы транзисторов на одном кристалле полупроводника (в основном кремния). Изобретен в 1948 г. американцами У. Шокли, У. Браттейном и Дж. Бардином. По физической структуре и механизму управления током различают транзисторы биполярные и униполярные. Биполярные транзисторы (их чаще называют просто транзисторами) содержат два или более электронно-дырочных перехода, носителями заряда здесь служат как электроны, так и дырки. В отличие от биполярных, в униполярных транзисторах (их чаще называют полевыми транзисторами) носителями заряда служат либо электроны, либо дырки (см. также *Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET)*, *Junction Field Effect Transistor (JFET)*).

Translation — трансляция. Процесс образования полипептидной цепи на матрице иРНК (информационные РНК), или преобразование информации, закодированной в виде последовательности нуклеотидов иРНК, в последовательность аминокислот в полипептиде (см. также *RiboNucleic Acid*). Другими словами — биосинтез белков в живой клетке на рибосомах. Это второй этап реализации генетической информации, в процессе которого последовательность нуклеотидов информационной РНК "переводится" в аминокислотную последовательность синтезирующегося белка. Протекает с участием транспортных РНК и соответствующих ферментов. Кроме того, трансляция: перенос физического или математического объекта в про-

странстве на некоторое расстояние параллельно самому себе; перевод описания математической программы с одного языка программирования на другой; процесс приема электрических сигналов и последующей их передачи в направлении от источника к приемнику, осуществляемый в промежуточных пунктах тракта связи; передача местной станцией сигналов, поступающих из других мест.

Transmission Electron Microscope (TEM) — просвечивающий электронный микроскоп. Тип микроскопа, в котором электронный луч фокусируют на образец и изображение формируется транспортировкой электронного луча с помощью геометрической оптики. Поскольку длина волны электронного луча короткая, ТЕМ может достичь: высокого коэффициента увеличения; высокого разрешения изображений, которого нельзя получить на обычном оптическом микроскопе; высокую контрастность изображения, сформированного исходя из интенсивности рассеивания электронов каждого отдельного участка образца. Разрешение современных ТЕМ достигает от 0,2 до 0,3 нм, что очень близко к теоретическому разрешению.

Trench — тренч, канавка. Протравленная область, заполненная оксидом или легированным кремнием, которая выполняет функцию изоляционной области между соседними устройствами. Также используется для производства емкостей.

Tribology — трибология. Наука о трении и износе. Раздел физики, изучающий процессы взаимодействия твердых тел при их относительном перемещении (см. также *Microtribology*).

Trigger — триггер. Спусковое устройство (спусковая схема), которое может сколь угодно долго находиться в одном из двух (реже многих) состояний устойчивого равновесия и скачкообразно переключаться из одного состояния в другое под действием внешнего сигнала. Триггер имеет два выхода: основной и инверсный. Каждому состоянию триггера соответствуют определенные сигналы на его выходах, различающиеся своим уровнем. В одном состоянии на основном выходе триггера формируется сигнал высокого уровня, а на инверсном — низкого; в другом состоянии, наоборот, сигналы высокого и низкого уровней формируются соответственно на инверсном и основном выходах. Триггер характеризуется следующими важнейшими параметрами: быстродействием, временем срабатывания, уровнями входных и выходных сигналов.

Twinning — двойникование. Закономерное срастание в едином кристаллическом образовании (двойнике) макроскопических областей с различной ориентацией одной кристаллической структуры, которые связаны между собой операцией точечной симметрии (операцией двойникования). Двойникование может происходить при кристаллизации, механической деформации, фазовом переходе.

Twin well — двойной карман. Процесс, при котором получают два разных типа карманов, сформированных таким образом, что в них можно изготовить разные типы микроустройств. Обычно один карман *n*-типа, в нем можно сформировать *p*-канальный МОП-прибор, а другой карман *p*-типа, в нем можно сформировать *n*-канальный МОП-прибор.

Tungsten Hexafluoride — гексафторид вольфрама. Токсичная жидкость, используемая в химическом осаждении из газовой фазы вольфрамовых межсоединений. Химическая формула — WF_6 .

Tungsten Inert Gas (TIG) — сварка неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде инертных

защитных газов. Например, так называемая аргоно-дуговая сварка.

Turbulent flow — турбулентный, вихревой поток. Турбулентность — явление, наблюдаемое во многих течениях жидкостей и газов и заключающееся в том, что в этих течениях образуются многочисленные вихри различных размеров, вследствие чего их гидродинамические и термодинамические характеристики (скорость, температура, давление, плотность) испытывают хаотические флуктуации и потому изменяются от точки к точке и во времени нерегулярно (см. также *Reynolds number*).

Type — тип. Подложки *n*-типа имеют отрицательные носители заряда, а *p*-типа — положительные носители заряда.

СЛОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Клетка осталась живой после наноинъекции

Ученым из США удалось впервые проткнуть живую клетку нанотрубкой без ее гибели и доставить в клеточную цитоплазму "полезный груз".

Как сообщает PhysOrg, для того, чтобы изучить процессы, проходящие внутри клеточной цитоплазмы или в органеллах, необходим специальный инструмент, позволяющий проникать внутрь клеток без существенного повреждения мембраны. Наиболее подходящими на роль "иголки" в наноразмерном диапазоне являются углеродные нанотрубки. Они имеют характерную игловидную форму и достаточно гибки и жестки, чтобы проткнуть мембрану. Однако самое главное — с их помощью можно доставлять внутрь клетки лекарства и фрагменты ДНК.

Ученые Синг Чен (*Xing Chen*), Андракс Кис (*Andrax Kis*), Алекс Зеттл (*Alex Zettl*) и Каролина Бертоцци (*Carolyn Bertozzi*) из Калифорнийского Уни-

верситета (*University of California*) и Национальной Лаборатории Беркли (*Berkeley National Laboratory*) представили "микроиглоку" на основе углеродной нанотрубки, способную протыкать клеточную мембрану без ее повреждения даже при повторной "инъекции" через полчаса. Предыдущие методы "протыкания" мембраны углеродными нанотрубками приводили к гибели клетки через несколько секунд после проникновения нанотрубки внутрь клетки (рис. 1).

Как говорят ученые, им впервые удалось создать инструмент с точным пространственным позиционированием, способный доставлять внутрь клетки дозированные порции различных молекул и отрезков ДНК.

Нанотрубки безболезненно проникают внутрь клеточной мембраны благодаря малому диаметру. Так, например, отверстие в клеточной мембране, оставленное нанотрубкой диаметром 1 нм, достаточно быстро затягивается благодаря липидной диффузии — пассивного перемещения молекул мембраны.

Установка исследователей состоит из зонда атомно-силового микроскопа, к которому прикреплена многослойная углеродная нанотрубка. Сам же атомно-силовой микроскоп управляет иглой с нанометровым разрешением. В эксперименте, продемонстрированном учеными, груз, который нанотрубка-игла должна была доставить внутрь клетки, состоял из флуоресцентных квантовых точек. Целью наноиглы была культура HeLa — раковых клеток эпителия человека. После успешного позиционирования иглы (на это ушло около 30 мин) и последующей инъекции квантовых точек, ученые могли наблюдать кластеры квантовых точек размером от 50 до 100 нм внутри клетки.

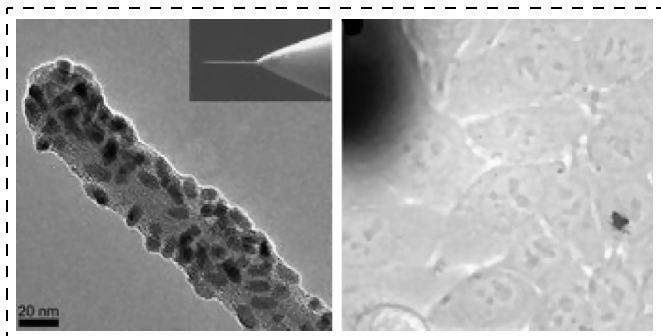


Рис. 1. Наноигла, с нанесенными квантовыми точками, покрытыми стрептавидином. Флуоресценция квантовых точек внутри клетки

Как говорят ученые, доставка генов и молекул РНК внутрь клетки — одно из потенциальных применений нового инструмента. Наноигла также позволит больше узнать о внутриклеточных процессах.

Источник: *PhysOrg: Carbon nanotube injectors probe living cells without damage* (<http://www.physorg.com/news/101567872.html>)

Гибкий кремний — новое слово в электронике

Ученым удалось создать особый класс кремния, который способен "тянуться". Заставить полупроводник растягиваться ученым необходимо было для того, чтобы дать зеленый свет гибким микроэлектронным устройствам нового поколения, которые в настоящее время востребованы на рынке (рис. 2).

Как говорит ученый-материаловед Джон Роджерс (*John Rogers*) из Университета Иллинойса в Урбана-Шампейн (*University of Illinois at Urbana-Champaign*), заставить кремний тянуться — это часть проблемы, гораздо труднее добиться его возвращения в первоначальное состояние без потери полупроводниковых свойств.

Роджерс и его коллеги из Университета Аризоны (*University of Arizona*) создали ультратонкую полупроводниковую кремниевую мембрану, которую затем совместили с пластиной полимера на основе кремния. Как сообщает *PhysOrg*, процесс совмещения был разделен на несколько производственных этапов: во-первых, перед процессом необходимо было подготовить полимер, растянув его специальным образом так, чтобы он образовал структуру с шаблоном, похожим на "елочку" (это можно увидеть на рис. 2). Только после этого ученые смогли создать гибридный наноматериал.

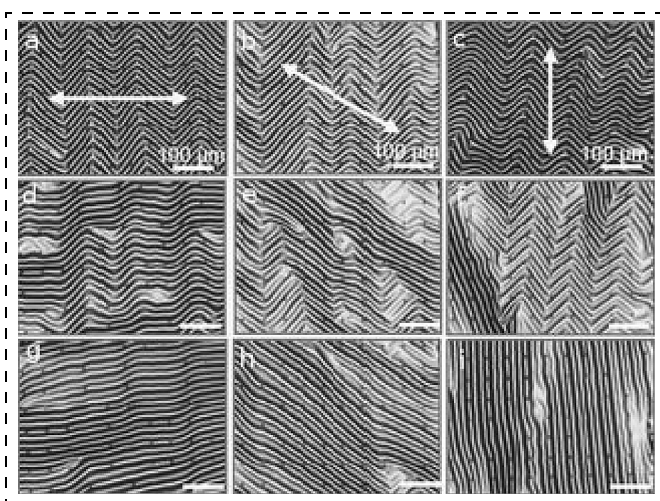


Рис. 2. Вот так "гибкий" кремний растягивается под микроскопом

Благодаря "елочной" структуре полимера наноматериал может растягиваться как в длину, так и в ширину. Толщина слоя "гибкого" кремния составила 100 нм.

Ранее Роджерс и его коллеги уже представляли различные гибкие наноструктуры, однако эти наноматериалы могли растягиваться только в одном направлении. Для нового материала уже есть ряд применений: это и специальные "умные" хирургические перчатки, и средства персонального мониторинга здоровья, и гибкие дисплеи.

Источник: *PhysOrg: Stretchable Silicon May Inspire a New Wave of Electronics* (<http://www.physorg.com/news/100966375.html>)

Создан гибридный чип памяти на основе нанонитей

Ученые из Национального Института Стандартов и Технологий (*Institute of Standards and Technology*), США, и их коллеги из Кореи (*Kwangjuon University*) сконструировали чип, который использует кремниевые нанонити в составе традиционных устройств памяти. Как сообщает *PhysOrg*, энергонезависимая память на основе кремниевых нанонитей подобна обычной *flash*-памяти, распространенной в настоящее время в большинстве цифровых видеокамер, фотоаппаратов и мобильных телефонов.

Ученые разработали новый метод производства подобных наноструктур, благодаря которому они добились параллельного расположения нанонитей на многослойной подложке полупроводник—оксид—нитрид—оксид—полупроводник (SONOS).

Благодаря нововведениям в производстве, исследователи уверены, что конечная стоимость чипов будет невысокой, так как для производства современной *flash*-памяти требуется большее число производственных операций.

Кремниевые нанонити изначально выращивались учеными на подложке оксид—нитрид—оксид. Принцип хранения памяти в устройстве сравнительно прост: при подаче положительного потенциала на нанонить электроны туннелируются в подложку, заряжая ее. Отрицательный потенциал, наоборот, способствует возвращению электронов назад в нанонить. Таким образом реализованы два логических состояния — "1" и "0". Как позже показали тесты, устройство находится в состояниях "1" и "0" устойчиво, без промежуточных состояний. Также устройство отличается достаточно высокой стабильностью работы при повышенных температурах и простой интеграцией в технологический процесс по производству чипов памяти.

Источник: *PhysOrg: Silicon nanowires upgrade data-storage technology* (<http://www.physorg.com/news/100587217.html>)

Новый метод производства 45-нанометровых чипов от Fujitsu продлит время ожидания электронных устройств

Компания *Fujitsu* объявила о разработке новой производственной платформы для изготовления 45-нанометровых чипов LSI, которая позволит конструировать чипы с низким энергопотреблением и в то же время быстродействующими соединениями между элементами.

Как сообщает *PhysOrg*, по сравнению с традиционными технологиями производства 45-нанометровых чипов новая платформа позволяет сократить ток утечки почти в 5 раз в режиме ожидания устройства. Также произошло увеличение быстродействия чипа на 14 % благодаря изменению длины затвора транзисторов и сглаживанию соединительных проводников.

Инновация компании заключается в изменении медного слоя, входящего в состав структуры соединительного модуля 9Cu + 1Al (рис. 3).

Как говорят представители компании, полученные результаты по быстродействию чипов превышают стандарты, определенные для 45-нанометрового техпроцесса картой *International Technology Roadmap for Semiconductors*.

В итоге, распространение технологии новых LSI-чипов позволит пятикратно повысить время ожидания различных мобильных устройств. Это касается и мобильных телефонов, и коммуникаторов, и цифровых фотокамер.

Согласно прогнозам новая технология будет реализоваться в промышленных масштабах с 2008 г.

Источник: *PhysOrg: Fujitsu Develops Technology for Low-Power, High-Performance 45nm Logic Chips* (<http://www.physorg.com/news101402245.html>)

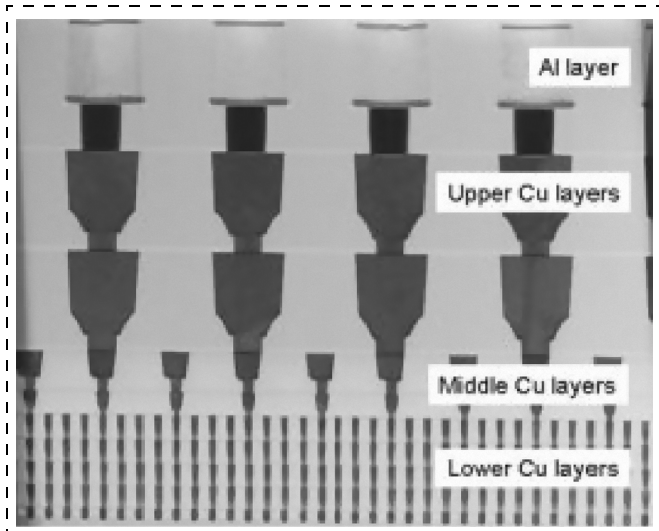


Рис. 3. Поперечное сечение модуля 9Cu + 1Al

Нанокластеры с конвейера

Российские, украинские и ученые из США, используя наработки 70-х годов прошлого века в области материаловедения, смогли разработать новую методику массового производства отдельных нанокластеров. Как говорят ученые, их открытие будет востребовано в химической промышленности, а в частности, в области нанокатализа.

Наноразмерные кластеры вещества характеризуются совершенно другими химическими и физическими свойствами, чем тот же материал на макроуровне (*bulk material*). Так, например, уникальные магнитные и каталитические свойства нанокластеров делают этот наноматериал востребованным в различных областях производства. Однако до сих пор получить нанокластеры в больших количествах было достаточно тяжело. Как сообщает *Nanotechweb*, международная команда исследователей, включающая Валерия Кирюхина из Университета Ратгерса (*Rutgers University*) в Нью-Джерси, его коллег из Корнельского Университета (*Cornell University*), ученых из Российской Академии Наук и Национальной Академии Наук Украины, применила "старую" инъекционную технологию для массового производства нанокластеров (рис. 4).

Как говорит Валерий Кирюхин, новый метод основан на впрыскивании гелия, содержащего определенное количество примесей, в жидкий гелий. Нанокластеры же обособливались в жидком гелии



Рис. 4. Инъекционная установка ученых

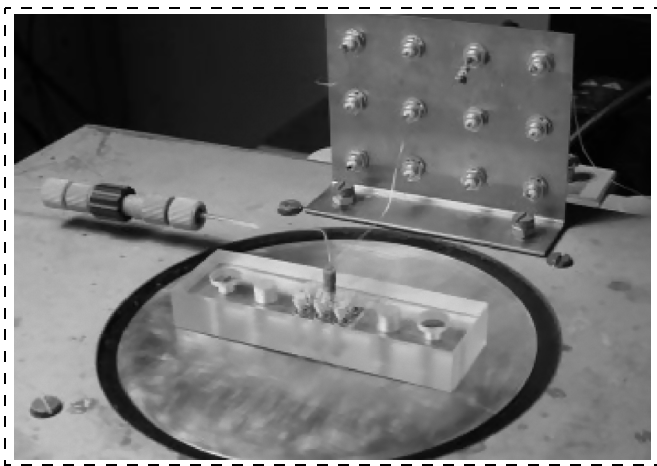


Рис. 5. Наногенератор в действии

благодаря покрытию из инертного гелия, полученному благодаря инъекционной струе.

Как потом показала рентгеновская дифракционная микроскопия, отдельные нанокластеры были отделены один от другого и содержались в жидкости в больших количествах, поэтому можно говорить об их "массовом производстве". Как далее поясняет Кирюхин, разработанная исследователями технология может оперировать практически любыми нанокластерами, стоит только их добавить в инъекционную струю.

Полученные нанокластеры также помогут ученым узнать больше о структурных и магнитных свойствах наночастиц. На сегодняшний день ученые планируют изучить свойства нанокластеров при повышении температуры среды, в которой они находятся.

Источник: Nanotechweb: Nanoclusters go bulk (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/6/1/1>)

Учеными создан гидронаногенератор

Мельчайшие каналы, создаваемые на субстрате, всегда ассоциировались с "лабораториями на чипе". Однако наноразмерная геометрия может использоваться и иначе — для выработки электричества.

Команда исследователей из Нидерландов продемонстрировала эффективность преобразования энергии с КПД 3,25 % при течении солевого раствора через канал глубиной 75 нм, шириной 50 мкм и длиной 4,5 мм.

Как сообщает *PhysOrg*, в перспективе группа из Технологического Университета Дельфта (*Delft University of Technology*) рассчитывает добиться эффективности до 10 %. Ученые считают, что этот метод может обеспечить микро- и наноробототехнику и другие наножидкостные устройства "встроенными" источниками энергии.

Известный из классической электротехники принцип электрокинетической генерации электроэнергии основан на разности давлений вдоль наноразмерного канала, по которому протекает водный раствор KCl или LiCl от одного конца к другому. Движение жидкости индуцирует ток, пропускаемый через внешнее сопротивление, что наглядно демонстрирует работу устройства (рис. 5).

Возле стенки канала, на поверхности раздела жидкость—субстрат, зарядовая нейтральность жидкости нарушается, что и делает возможной выработку электрической энергии. А поскольку наноразмерные каналы имеют высокое отношение поверхности к объему, в них этот эффект особенно силен. Сама идея получения электроэнергии с помощью жидкости, текущей через узкий канал, не нова, но теперь достижения нанотехнологий позволяют создавать и испытывать реальные наноразмерные устройства.

Ученые наносили каналы непосредственно на поверхность плавленного кварца. Как оказалось, плотность поверхностного заряда этого материала практически оптимальна для таких экспериментов. Как считают ученые, дальнейшее повышение эффективности метода требует поисков материала или покрытия с такой же плотностью поверхностного заряда, но меньшей штерновской проводимостью — за счет этого эффекта сам материал действует, как параллельно включенный проводник, через который идет утечка электрической энергии.

Применение наногенератора не заставит себя ждать — это многочисленные импланты и системы "лаборатория на чипе".

О своей работе ученые сообщили в текущем выпуске журнала *Nano Letters*.

Источник: Nanotechweb: Nanochannels generate electricity from fluid flow (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/5/24/1>)

Создан новый тип нанокристалла для лазерной техники

Ученые из США создали новый тип нанокристалла, который может быть использован в качестве материала для производства лазеров.

Как сообщает *PhysOrg*, открытый учеными нанокристалл — "мягкий" оптический материал, который можно обрабатывать в растворе, что обеспечивает гибкость технологического процесса при изготовлении лазеров для систем "лаборатория на чипе" и квантовых устройств хранения данных.

Полупроводниковые нанокристаллы характеризуются отличными светоизлучающими характеристиками, что делает их идеальными кандидатами для построения лазеров на их основе. Однако до сегодняшнего времени на основе нанокристаллов было проблематично достичь высоких показателей важнейшей для лазерной техники характеристики — оптического усиления.

Обычно в нанокристаллах содержатся два экситона (пара дырка-электрон), которые вследствие маленьких размеров кристалла успевают аннигилировать до того, как произойдет оптическое усиление.

В настоящем исследовании, проведенном Виктором Климовым и его коллегами в Аламосской Национальной лаборатории (*Alamos National Laboratory*), ученым удалось синтезировать нанокристалл с ядрами и оболочками из различных полупроводников, в котором электроны и дырки разделены физически друг от друга, и поэтому оптическое усиление соответствует необходимому для производства лазерной техники.

Кроме того, новый нанокристалл достаточно легко обрабатывать и использовать в составе "лабораторий на чипе".

Источник: *PhysOrg: Scientists create new type of nanocrystal* (<http://www.physorg.com/news99237487.html>)

Нanomатериалы защитят от космической радиации

Как известно, электроника космических кораблей и спутников подвергается постоянному воздействию ионизирующей радиации и высокоэнергетических космических лучей. Как следствие — изготовить ее довольно трудно, и стоит это недешево. Однако недавнее открытие, сделанное международной командой ученых, позволит существенно снизить стоимость "космической электроники", повысив ее защищенность от космических лучей.

Нитрид галлия (GaN) — многообещающий полупроводниковый наноматериал для электроники, так как полупроводниковые структуры на его основе устойчивы к ионизирующей радиации. Как установили ученые из Молдовы, России и США,

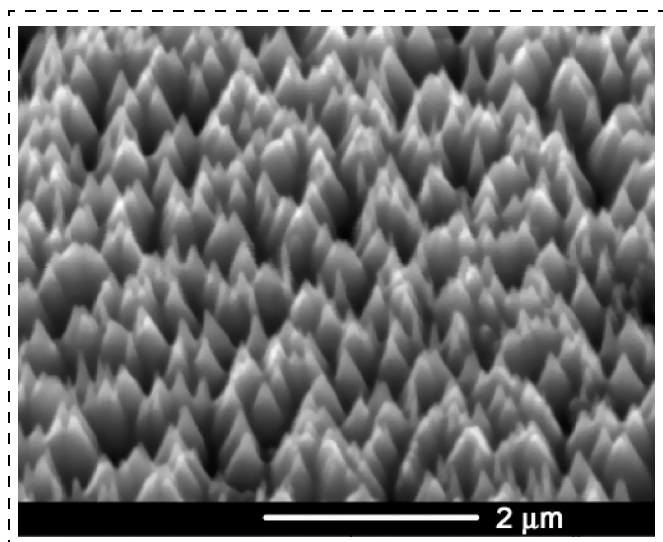


Рис. 6. Нанопирамидки на поверхности GaN (СТМ-фотография)

нанотехнологически модифицированный нитрид галлия может похвастаться еще более высокой устойчивостью к ионизирующему излучению.

Как сообщает *Nanotechweb*, Йон Тигиняну из Академии Наук Молдовы и его коллеги из Института ядерных исследований России обработали пластину GaN мощным ультрафиолетовым излучением в среде гидроксида калия. В результате на поверхности образовалась матрица нанопирамидок (рис. 6), которая позволила GaN-наноструктуре выдерживать вдесятеро большую ионизирующую радиацию!

Эксперименты ученые проводили с 85- и 130 МэВ ионами на циклотроне в Лаборатории ядерных реакций г. Дубны.

Как полагает Йон и его коллеги, новый материал позволит делать различные электронные приборы для их использования в экстремальных условиях, например, датчики и электронику спутников и приборы другой аэрокосмической техники.

Источник: *Nanotechweb: Gallium nitride nanopyramids resist radiation* (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/5/19/1>)

Созданы новые высокоэффективные УФ-светодиоды

Ученым из Национального Института Стандартов и Технологий США (NIST) в сотрудничестве с их коллегами из Университета Мэриленда (*University of Maryland*) и Университета Говарда (*Howard University*), удалось разработать технологию создания микроскопических высокоэффективных светодиодов (LED) на основе нанонитей.

Как сообщает *PhysOrg*, светодиоды излучают, в основном, в ультрафиолетовом диапазоне частот, что очень важно для целого ряда наноустройств — от биосенсоров до средств хранения и записи данных. Как говорят ученые, открытые ими УФ-светодиоды могут существенно сократить срок появления на коммерческом рынке микроэлектроники устройств хранения данных большой емкости, использующих наноразмерные элементы.

Как было сказано выше, устройство преимущественно излучает в УФ-диапазоне, однако часть излучения все же приходится на видимый диапазон, что и наблюдали ученые.

Для создания этих светодиодов ученые из NIST использовали фотолитографию, мокрое травление и нанесение слоя металла на подложку. Затем на образец с помощью электромагнитного поля были нанесены полупроводниковые нанонити различного состава (AlN, GaN, InN). При этом нити укладывали так, чтобы в местах пересечения их друг с другом образовались светодиоды (рис. 7, 8).

Размеры отдельных нанонитей в устройстве не превышали 110 нм, всего же ученым удалось создать около 40 светодиодов, излучающих на длине

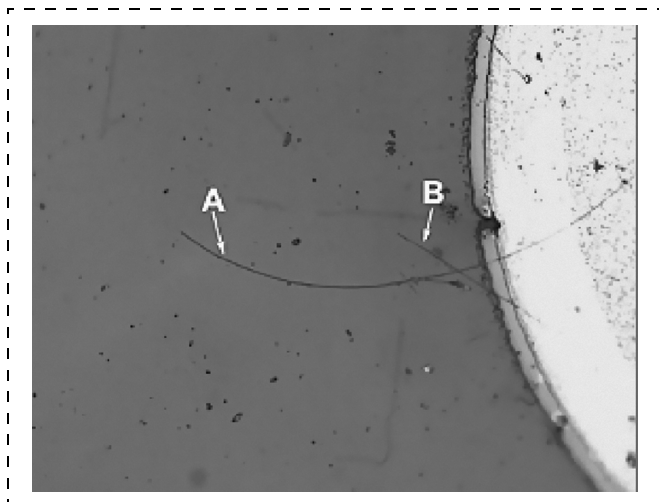


Рис. 7. Нанонить-светодиод

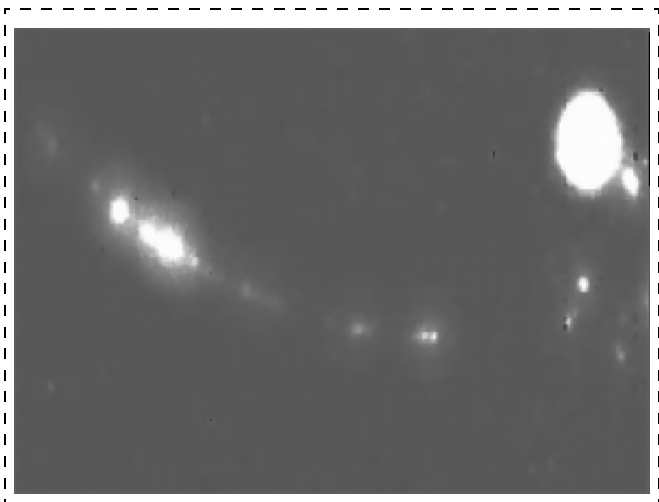


Рис. 8. Свечение светодиодов под микроскопом

волны 365 нм. Кроме этого, наноустройство выдерживало значительный перегрев. В экспериментах ученых светодиоды работали даже при температуре 750 °С.

Как говорит один из исследователей, метод электромагнитного нанесения нанонитей на подложку значительно автоматизирует и сокращает

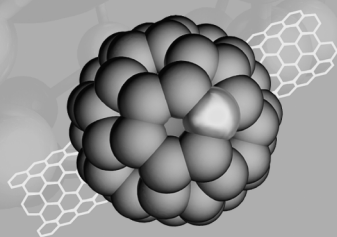
время производства, что, естественно, положительно скажется на массовом производстве подобных светодиодов и устройств на их основе.

Источник: *PhysOrg: New Fabrication Technique Yields Nano-scale UV LEDs* (<http://www.physorg.com/news99324585.html>)

Составил **Свидиненко Ю. Г.**, главный аналитик компании Nanotechnology News Network

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА НАНО- ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ

5-7 декабря 2007 года



NTMEH - 2007

Москва, Новый Арбат, 36
здание Правительства Москвы

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ:

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НАНОМАТЕРИАЛОВ

Производство порошков;
Производство пленок и нанесение покрытий;
Производство объемных наноструктурных материалов;
Технологии производства микросхем и их компонентов на основе наноматериалов и нанотехнологий;
Применение наноматериалов и нанотехнологий в контрольно-измерительной и испытательной аппаратуре и технике

МОДУЛИ И ОРИГИНАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Микроробототехника;
Датчики;
Микромеханика;
Волоконная оптика;
Интегральная оптика;
Лазерная техника;
Микроструйная техника;
Микропозиционеры и микроманипуляторы;
Другие микромеханические компоненты;
Элементы конструкции

НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ И МИКРОСИСТЕМ

Полимерные материалы;
Функциональная керамика;
Наноструктурные пленки

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Физика и химия процессов нанотехнологий;
Компоненты нанотехнологий;
Классификация по типу (порошки, пленки, покрытия, объемные наноструктурные материалы);
Основные служебные характеристики наноматериалов и их преимущества;
Сферы использования наноматериалов и нанотехнологий

УСЛУГИ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Консультационные услуги;
Передача технологий;
Инновационное применение нанотехнологий;
Специальная литература в области наноматериалов и нанотехнологий

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТЯХ ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Здравоохранение;
Правопорядок и безопасность;
Строительство и строительная индустрия;
Топливо-энергетическое хозяйство;
Охрана окружающей среды;
Транспорт;
Жилищное хозяйство

ДИРЕКЦИЯ ВЫСТАВКИ:

ООО "Компания МКМ ПРОФ"
107140, г. Москва, ул. В. Красносельская, д.2/1, стр.1

Тел./факс: (495) 502-19-38, 775-17-20, 502-19-37
E-mail: mkmprof@mail.ru www.mkmexpo.ru

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ // СМИ 2007-07-23

В. Путин подписал закон о создании корпорации нанотехнологий

Президент России Владимир Путин подписал федеральный закон "О Российской корпорации нанотехнологий", сообщает пресс-служба главы Российского государства. Закон был принят Государственной думой 4 июля 2007 г. и одобрен Советом Федерации 6 июля 2007 г.

В соответствии с документом корпорация создается в целях реализации государственной политики в научно-технической и инновационной сферах, содействия перехода российской экономики на инновационный путь развития, реализации проектов создания перспективных нанотехнологий и наноиндустрии. Имущество корпорации формируется за счет имущественного взноса РФ, средств федерального бюджета, доходов, получаемых от деятельности корпорации, добровольных имущественных взносов и пожертвований, а также за счет других законных поступлений.

Российская корпорация нанотехнологий будет осуществлять инвестиционную и внешнеэкономическую деятельность по реализации проектов в области нанотехнологий в России и за рубежом, в том числе с участием иностранного капитала. Предусматривается также право корпорации осуществлять предпринимательскую деятельность и распределять полученную прибыль исключительно в этих целях.

Органами управления корпорации являются наблюдательный совет, правление и генеральный директор. При этом устанавливается, что члены наблюдательного совета должны назначаться правительством РФ (в том числе три — по представлению президента РФ, по одному — по представлению палат парламента и три — по представлению правительства) на срок не более четырех лет. Два члена совета, предложенные президентом, и два, предложенные Правительством, не должны являться государственными служащими. Кроме того, предполагается создание органа внутреннего финансового контроля корпорации — ревизионной комиссии, консультативного органа — научно-технического совета.

Отметим также, что в настоящее время при Правительстве РФ действует совет по нанотехнологиям, который возглавляет первый вице-премьер Сергей Иванов. Ведомство было образовано для обеспечения взаимодействия властей с представителями предпринимательского сообщества и научной общественностью по выработке предложений по реализации государственной политики в области нанотехнологий и наноиндустрии в соответствии с президентской инициативой "Стратегия развития наноиндустрии".

Основными задачами совета являются предварительное рассмотрение, проведение экспертной оценки и подготовка предложений, носящих рекомендательный характер, связанных с разработкой и практическим использованием достижений науки в области нанотехнологий, развитием наноиндустрии, а также с формированием рынка нанопродукции и нанослужб "с целью реализации интеллектуального, организационного и финансового потенциала страны".

Добавим также, что 12 июля Правительство одобрило на своем заседании вложение в 2008—2010 гг. через федеральную целевую программу 24,9 млрд руб. на развитие в России наноиндустрии — отрасли промышленности, которая должна внедрять в производство нанотехнологии. Как заявил С. Иванов, в первом квартале 2008 г. Правительство определится с тем, что должна производить эта отрасль. Пока деньги ФЦП будут тратиться на "стандартизацию", "метрологию" и создание "национальной нанотехнологической сети".

По логике Белого дома, инвестиции в наноиндустрию в размере 24,9 млрд руб. должны подготовить промышленность к внедрению нанотехнологий. Они будут развиваться при координации совета по развитию наноиндустрии при Правительстве, которым руководит С. Иванов, и госкорпорации "Роснанотех" — в ее капитал государство намерено направить в 2007—2008 гг. 130 млрд руб.

Государственные, а также частные (около 2,8 млрд руб.) деньги по ФЦП направляются на развитие "инфраструктуры наноиндустрии". С. Иванов и глава Минобрнауки Андрей Фурсенко, представлявший ФЦП на заседании, сообщили, что именно предполагается сделать на эти деньги за три года.

По словам А. Фурсенко средства пойдут на оснащение специальным экспериментальным, диагностическим и научно-технологическим оборудованием элементов национальной нанотехнологической сети, формируемых на базе госорганов. По мнению министра, на эти деньги также необходимо создать системы "обмена информацией" и "методического обеспечения механизмов регулирования развития наноиндустрии, гармонизирующей российские и иностранные нормативно-методические документы". Для этого будет организовано десять научно-образовательных центров в вузах.

С. Иванов пояснил, что "конечная цель — выйти на рынок с коммерческим продуктом, а первая — заняться стандартизацией и метрологией". Какие именно коммерческие продукты будет производить наноиндустрия, определит госпрограмма ее развития до 2015 г. Впрочем, эта программа будет рассмотрена Правительством только в первом квартале 2008 г. — "когда выстроится вся оргструктура".

Правительство России одобрило программу по созданию инфраструктуры наноиндустрии

12 июля на заседании Правительства Российской Федерации был одобрен проект Федеральной целевой программы "Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008—2010 гг.". Общий объем расходов на реализацию ФЦП составит 27,7 млрд руб., в том числе около 25 млрд будет выделено из федерального бюджета.

В своем докладе Министр образования и науки Российской Федерации Андрей Фурсенко отметил, что целями программы являются создание современной инфраструктуры для российской индустрии нанотехнологий, обеспечение ее современным технологическим и производственным оборудованием и научно-исследовательскими приборами, формирование системы методического обеспечения нанотехнологий, коммерциализация результатов деятельности исследовательских организаций, решение вопросов метрологии и стандартизации.

Как подчеркнул Андрей Фурсенко, благодаря Федеральной целевой программе будет создана национальная нанотехнологическая сеть, состоящая из головной исследовательской организации (она будет осуществлять координацию всех нанотехнологических проектов) и нескольких образовательных центров, выбранных на конкурсной основе. Элементом финансовой поддержки нанотехнологий должна стать Российская корпорация нанотехнологий, которая будет осуществлять адресную поддержку программ развития нанотехнологий, одобренных также на конкурсной основе.

В числе перспективных направлений развития наноиндустрии (нанотехнологий и наноматериалов) в России можно выделить, в частности, разработку наносистемной техники, создание наноматериалов, разработку нанобиотехнологии, подготовку и переподготовку кадров для наноиндустрии. Министр особо отметил, что конечным результатом данной программы станет вывод на рынок нанотехнологической продукции в массовом масштабе.

**Российская академия наук
ПРЕЗИДИУМ
ПОСТАНОВЛЕНИЕ
О Комиссии РАН по нанотехнологиям**

Президиум Российской академии наук
ПОСТАНОВЛЯЕТ:

1. С целью усиления и координации работ в области нанотехнологий создать при Президиуме РАН Комиссию РАН по нанотехнологиям в следующем составе:

Алферов Ж. И. — академик, председатель Комиссии

Ковальчук М. В. — член-корреспондент РАН, заместитель председателя Комиссии

Сибельдин Н. Н. — доктор физико-математических наук, ученый секретарь Комиссии

Андреев А. Ф. — академик

Асеев А. Л. — академик

Алфимов М. В. — академик

Бетелин В. Б. — академик

Валиев К. А. — академик

Гапонов С. В. — член-корреспондент РАН

Горынин И. В. — академик

Гуляев Ю. В. — академик

Дынкин А. А. — академик

Еременко И. Л. — академик

Желудева С. И. — доктор физико-математических наук

Жижченко А. Б. — член-корреспондент РАН

Каблов Е. Н. — академик

Келдыш Л. В. — академик

Копаев Ю. В. — член-корреспондент РАН

Котов Ю. А. — член-корреспондент РАН

Кузнецов Ф. А. — академик

Кулипанов Г. Н. — академик

Кульчин Ю. Н. — член-корреспондент РАН

Лебедев В. В. — член-корреспондент РАН

Лисицын-Светланов А. Г. — доктор юридических наук

Макаров А. А. — член-корреспондент РАН

Месяц Г. А. — академик

Осико В. В. — академик

Осипьян Ю. А. — академик

Островский М. А. — академик

Пармой В. Н. — академик

Петров Р. В. — академик

Пустовойт В. И. — академик

Разумов В. Ф. — член-корреспондент РАН

Сагдеев Р. З. — академик

Садовничий В. А. — академик

Свердлов Е. Д. — академик

Скрябин К. Г. — академик РАСХН

Терешенко Г. Ф. — академик

Устинов В. В. — член-корреспондент РАН

Устинов В. М. — член-корреспондент РАН

Цветков Ю. В. — академик

2. Председателю Комиссии академику Алферову Ж. И. представить Президиуму РАН в октябре 2007 г. общеакадемическую программу работ в области нанотехнологий.

Президент Российской академии наук академик Ю. С. Осипов

И. о. главного ученого секретаря Президиума РАН академик Б. Ф. Мясоедов

№ 165 от 26.06.2007

**Российская академия наук
ПРЕЗИДИУМ
ПОСТАНОВЛЕНИЕ
Об исполнении обязанностей
вице-президента РАН**

Президиум Российской академии наук
ПОСТАНОВЛЯЕТ:

Возложить на заместителя председателя Комиссии РАН по нанотехнологиям члена-корреспондента РАН Ковальчука Михаила Валентиновича исполнение обязанностей вице-президента РАН.

Президент Российской академии наук академик Ю. С. Осипов

И. о. главного ученого секретаря Президиума РАН академик Б. Ф. Мясоедов

№ 164 от 26.06.2007

**Российская академия наук
ПРЕЗИДИУМ
ПОСТАНОВЛЕНИЕ
Об исполнении обязанностей
вице-президента РАН**

Президиум Российской академии наук
ПОСТАНОВЛЯЕТ:

Возложить на академика-секретаря Отделения биологических наук РАН академика Григорьева Анатолия Ивановича исполнение обязанностей вице-президента РАН.

Президент Российской академии наук академик Ю. С. Осипов

И. о. главного ученого секретаря Президиума РАН академик Б. Ф. Мясоедов

Поздравляем юбиляра!

Главному редактору журнала "Нано- и микросистемная техника", заведующему кафедрой "Микросистемная техника" Московского государственного института радиотехники, электроники, автоматики (ТУ), члену Секции прикладных проблем РАН, члену Экспертного совета ВАК РФ, лауреату премии Правительства, доктору технических наук, профессору, известному ученому в области электроники, информатики и вычислительной техники

Петру Павловичу МАЛЬЦЕВУ,

исполняется 60 лет.



Научная и практическая деятельность П. П. Мальцева изначально была связана с развитием новых научных направлений в области полупроводниковых материалов, микроэлектроники и надежностных испытаний микроэлектронной техники.

Знания, образованность, интеллект и мудрость открыли у Петра Павловича удивительный дар научного предвидения и позволили ему на несколько лет предвосхитить провозглашенную в России эволюцию микросистемной техники и нанотехнологий в ключевое направление развития современной промышленности и науки и организовать еще в 1999 г. первое отечественное периодическое научно-техническое издание в этой области — журнал "Микросистемная техника" (с 2005 г. — "Нано- и микросистемная техника").

Талантливый ученый и блестящий организатор П. П. Мальцев по праву является одним из основателей нового критического направления в отечественной науке и технике, одним из авторов современной концепции развития высоких технологий — индустрии наносистем.

Вся жизнь П. П. Мальцева — это образец высокого служения науке, стране и народу. Высокие человеческие качества и, прежде всего, патриотизм, честность ученого и человека, скромность, доброжелательность, чуткость и отзывчивость в сочетании с широким кругозором, высоким профессионализмом, принципиальностью и ответственностью снискали ему большое уважение учеников, коллег и товарищей.

Дорогой Петр Павлович!

Сердечно поздравляем Вас с юбилеем и желаем Вам крепкого здоровья, большого счастья, новых творческих успехов в Вашей многогранной деятельности!

Редколлегия и редакция журнала

CONTENTS

Tarnavsky G. A., Aliev A. V., Tarnavsky A. G. <i>Creation of Special Nanostructures of Donor and Acceptor Dopings in Silicon Base for Designing of New Semiconductor Materials</i>	2
Mironov V. L., Udalov O. G., Gribkov B. A., Fraerman A. A. <i>Atomic-Force Microscopy and x-Ray Reflectometry of the Surfaces with Non-Gaussian Roughness</i>	8
Leychenko A. S., Luparev N. V., Starikov P. A., Chadaev N. N., Sheshin E. P. <i>Nanostructured Carbon Materials Application in Promising Light Sources</i>	15
Zhukova S. A., Obizhaev D. Yu., Zhukov A. A., Babayevsky P. G. <i>Features of Plasma Chemical Etching of Polyimide "Sacrificial" Layers in Micro- and Nanodimensional Gaps</i>	20
Myasnikova T. P., Alyoshin V. A., Gakh S. G., Zakharchenko I. N., Tolstousov S. V., Myasnikov E. N. <i>Optical Spectra of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ Thin Films on MgO and Si at Phase Transitions</i>	25
Leonov E. S., Pahomov L. G., Luchnikov A. P., Pahomov G. L. <i>Doped Unmetal Phtalocianin Composite Nanosized Films</i>	28
Timoshenkov S. P., Zotov S. A., Morozova E. S., Balychev V. N., Prokop'ev E. P. <i>Sensor's Transfer Functions of LL-type Micromechanics Vibration Gyroscope</i>	32
Kashtankin I. A., Gurin N. T. <i>Photosensitive Semiconductor N-devices with Symmetric I—V Characteristics</i>	35
Vorob'eva A. I., Shulitsky B. G., Prudnikova E. L. <i>Matrix Forming from Anode Oxide of Aluminium for Deposition of Carbon Nanotube</i>	39
Galoushkov A. I., Godovitsyn I. V., Krasnoborodiko S. Yu., Tihomirov A. A. <i>A Post-Fabrication Study of Parameters of Surface-Micromachined Pressure Transducer</i>	44
Koleshko V. M., Gulay A. V., Gulay V. A. <i>Tunnel Mim-Nanosensors: Simulation Strategies and Technologies</i>	46
Loktev D. V., Andreev V. M., Zinovyev D. V., Tuzovsky K. A. <i>The Effect of Thermophoresis in Heat MEMS</i>	52
Malyshev V. A. <i>The Quantum Synthesis Processes as a Possible Foundation of Biotechnology</i>	53
Romanov S. I., Pyshnyi D. V., Vandysheva N. V., Lomzoy A. A., Bublirov A. V. <i>Silicon Microchannel Array for Biochip echnologies</i>	55
Alaluev R. V., Ivanov Yu. V., Matvejev V. V., Orlov V. A., Raspopov V. Ya. <i>Measuring Module of Micro System Platformless Inertial Navigation System</i>	61

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(495) 269-5510.

E-mail: nmst@zknet.ru; http://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (495) 269-5510. E-mail: nmst@zknet.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 19.07.2007. Подписано в печать 23.08.2007. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,92. Заказ 141. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15

«5» 07 2007 г.
№ 460-1-404

Москва

Уважаемые коллеги!

С 23 по 26 октября 2007 года, в Москве, на территории Всероссийского Выставочного Центра (ВВЦ) пройдет VI Всероссийская (Федеральная) промышленная ярмарка, которая станет одним из крупнейших выставочно-ярмарочных мероприятий России в этом году.

Наряду с традиционными выставками, которые пользуются популярностью среди участников и гостей Ярмарки («Интердрайв», «Эталон», «Энерготех», «Интертехсалон»), организаторы включили в тематику новые, отвечающие современным требованиям, разделы: «АтомЭкспо» (атомная энергетика) и «НаноТехЭкспо» (нанотехнологии и наноматериалы).

Особое внимание Президент Российской Федерации уделяет развитию высоких технологий, в частности, нанотехнологий. Во исполнение поручения Президента России В.В.Путина Правительством Российской Федерации принято постановление по вопросам координации работ в области нанотехнологий и nanoиндустрии. Главная задача - рационально использовать финансовые средства, выделенные на эти цели, создать необходимые условия для реализации богатейшего научного потенциала наших ученых, преодолеть отставание от США, Японии, Китая и других государств Запада в этом направлении.

Российская наука продемонстрировала всему миру свои возможности в космонавтике и военных технологиях. Для реализации поставленных В.В.Путиным задач в сфере нанотехнологий финансирование в текущем году увеличилось более чем на 30 млрд рублей.

Нет оснований не верить в то, что такая финансовая поддержка даст возможность внедрить нанотехнологии во многие сферы деятельности, особенно в такие отрасли, как космос, военно-промышленный комплекс, медицина, сельское хозяйство и пр.

Необходимо определить приоритетные направления, где уже имеются обнадеживающие результаты, проанализировать потребности российских отраслей в использовании конкретных нанотехнологий, оказать реальную поддержку внедрению инноваций, созданию региональных, вузовских центров по примеру Китая, США, Японии.

Уверен, что Ярмарка станет достойной площадкой для проведения научных диспутов, конференций, деловых встреч, переговоров, заключения партнерских соглашений.

Искренне желаю всем участникам Ярмарки незабываемых исторических успехов, новых открытий и практических шагов в достижении лидерства России в сфере нанотехнологий.

С уважением,
Профессор



Аслаханов А. А.