# Nº 11(160) **◆** 2013

48

### ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

#### Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в систему Российского индекса научного цитирования

### Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н, проф. Зам. гл. редактора Лучинин В. В., д.т.н, проф.

### Шур М., д.ф.-м.н. (США) Редакционный совет:

Аристов В. В., чл.-кор. РАН Аристов В. В., ЧЛ.-кор. ГАН Асеев А. Л., акад. РАН Гапонов С. В., акад. РАН Каляев И. А., чл.-кор. РАН Квардаков В. В., чл.-кор. РАН Климов Д. М., акад. РАН Ковальчук М. В., чл.-кор. РАН Нарайкин О. С., чл.-кор. РАН Никитов С. А., чл.-кор. РАН Рыжий В. И., чл.-кор. РАН (Япония) (Упония) Сауров А. Н., чл.-кор. РАН Сигов А. С., акад. РАН Чаплыгин Ю. А., чл.-кор. РАН Шевченко В. Я., акад. РАН Редакционная коллегия:

### Абрамов И. И., д.ф.-м.н. (Белоруссия) Андреев А., к.ф.-м.н., University of Cambridge (Великобритания) Андриевский Р. А., д.х.н., проф. Антонов Б. И. Астахов М. В., д.х.н., проф. Быков В. А., д.т.н., проф. Волчихин В. И., д.т.н., проф. Горнев Е. С., д.т.н., проф. Градецкий В. Г., д.т.н., проф. Гурович Б. А., д.ф.-м.н., проф. Захаревич В. Г., д.т.н., проф. Кальнов В. А., к.т.н. Кальнов Б. А., К.Т.н. Карякин А. А., д.х.н., проф. Колобов Ю. Р., д.т.н., проф. Кузин А. Ю., д.т.н., проф. Мокров Е. А., д.т.н., проф. Панфилов Ю. В., д.т.н., проф. Петросянц К. О., д.т.н., проф. Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф. Пожела К. д. ф. -м. H. (Питва) Потрунин Б. Ф., д.ф.-м.н. (Литва) Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва) Путилов А. В., д.т.н., проф. Пятышев Е. Н., к.ф.-м.н. Серебрянников С. В., д.т.н., проф. Стриханов М. Н., д.ф.-м.н., проф Телец В. А., д.т.н., проф. Тимошенков С. П. Тодуа П. А., д.т.н., проф. Шубарев В. А., д.т.н., проф. Отв. секретарь Лысенко А. В. Редакция: Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В.

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Издается с 1999 СОЛЕРЖАНИЕ	г.
НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ Карташев В. А., Карташев В. В. Учет геометрии острия иглы для коррекции измере- ний туннельного микроскопа	25
МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ Васильев В. А., Орехов Д. О., Чернов П. С. Современные методы моделирования нано- и микроразмерных систем	10 14
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Белянин А. Ф., Кемпа М., Нужный Д., Клещева С. М., Савинов М. Оптические и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей эвлитином	
(B1 <sub>4</sub> (S1O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	19 26 30 33 35
ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавый С. П. Электростатические микрокоммутаторы. Часть 2. Торсионные включающие микрокоммутаторы	39 43

### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Беспалов В. А., Дюжев Н. А., Юров А. С., Чиненков М. Ю., Мазуркин Н. С. Особенности применения магниторезистивных наноструктур в датчиках автомо-

Contents 55 Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (http://novtex.ru/nmst/) и научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2011 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА: Адрес для переписки: 107076 Москва, Стромынский пер., д. 4 по каталогу Роспечати (индекс 79493); e-mail: nmst@novtex.ru по каталогу "Пресса России" (индекс 27849) в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2013

## Чанотехнологии и зондовая микроскопия

УДК 51.007.57

**В. А. Карташев**, канд. физ.-мат. наук, проф., e-mail: vakart@list.ru, **В. В. Карташев**, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., Институт прикладной математики РАН

### УЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ОСТРИЯ ИГЛЫ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

### Поступила в редакцию 08.05.2013

Ошибки измерений нанорельефа поверхности туннельным микроскопом обусловлены особенностями работы пьезоприводов и системы управления движением зонда. В результате на изображении измеренной поверхности возможно появление объектов, которые в реальности отсутствуют. Учет геометрии острия иглы при интерпретации измерений позволяет существенно уменьшить вклад указанных ошибок. Рассмотрено действие этого фильтра на примере искажений, возникающих при сканировании элементов рельефа с большими изменениями наклона поверхности.

**Ключевые слова:** зондовая микроскопия, туннельный микроскоп, интерпретация измерений СТМ, форма острия иглы

В зондовом микроскопе рельеф поверхности измеряется с помощью зонда — иглы, острие которой имеет достаточно малые размеры. Например, в туннельном микроскопе диаметр острия не превышает нескольких нанометров.

При сканировании зонд не касается поверхности. В туннельной микроскопии о размере зазора судят по силе туннельного тока, который возникает при приложении постоянного напряжения между иглой и поверхностью. Система управления движением зонда поддерживает постоянной величину туннельного тока. Это обеспечивает постоянство зазора между иглой и поверхностью, если условия прохождения туннельного тока не изменяются.

На рис. 1 приведен пример взаимодействия иглы с измеряемой поверхностью. В случае *1* ток проходит только через нижнюю часть острия. В случае *2* он также проходит через боковую поверхность. В случае *3* — только через боковую поверхность. Самая большая площадь имеет место в случае *2*, самая маленькая — в случае *1*. В случае *2* площадь также сущест-

венно больше, чем в случае *1*, в силу меньшей кривизны поверхности.

Соблюдение постоянства туннельного тока приводит к тому, что в случае 2 игла начинает интенсивный подъем. Скорость вертикального перемещения на вершине быстро увеличивается, так как игла приближается к препятствию с постоянной скоростью. В верхней точке стенки игла приобретает достаточно большую вертикальную составляющую скорости. Задержки в контуре следящей системы управления движением зонда и крип (гистерезис) пьезопривода приводят к тому, что на вершине стенки теряется контакт с поверхностью, и траектория движения приобретает вид петли.

Наиболее часто ошибки такого рода возникают при сканировании зондом элемента поверхности типа "ступенька" [1] (рис. 2). Ширина и высота изгиба траектории зависят от высоты и крутизны "ступеньки". В туннельной микроскопии обычно они составляют несколько десятых долей нанометра.

Коррекцию ошибок измерений выполняют с помощью различных математических преобразова-



Рис. 1. Положение области, через которую протекает туннельный ток



ний, которые называются фильтрами. Для уменьшения вклада высокочастотных составляющих шумов используют фильтр Фурье [1]. Недостатком этого способа коррекции является исчезновение на изображении мелких элементов нанорельефа. Таким образом, фильтры, которые не учитывают физические особенности измерений и работы системы управления, могут существенно искажать результаты измерений.

В настоящей работе графическую интерпретацию изображений предлагается осуществлять с учетом формы и размеров острия зонда. Следует заметить, что в атомно-силовой микроскопии учет геометрии иглы при интерпретации измерений выполняется давно [2, 3]. Для его применения достаточно знать форму и размеры острия зонда. Эта информация указывается на упаковках игл производителем. В туннельной микроскопии до последнего времени этот способ не получил распространения, так как ввиду малости острия (доли нанометра) измерить его геометрию с субнанометровой точностью технологически сложно.

Учет геометрии острия позволяет рассчитывать на десятикратное увеличение точности измерения мелких деталей поверхности в силу того, что разрешающая способность пьезосканера на порядок меньше диаметра иглы.

Иглы для туннельного микроскопа изготавливаются пользователями самостоятельно по одной из двух достаточно простых технологий [4]. Каждая из них обеспечивает получение острия размером не более нескольких нанометров. Однако истинные размеры получившегося острия и его форма остаются неизвестными. Способы определения геометрии острия, применяемые в атомно-силовой микроскопии, основаны на использовании тестовой поверхности, рельеф которой заранее известен. Попытки обойти это ограничение, предпринимавшиеся разработчиками методики для атомно-силовой микроскопии [3], по признанию самих авторов, успеха не имели. Авторами предложен способ определения геометрии острия [5], с описанием которого можно ознакомиться также в работе [6]. Способ позволяет определять форму и размеры острия по результатам сканирования произвольной поверхности. Ошибка будет минимальной при сканировании развитых поверхностей, т. е. поверхностей, которые содержат элементы различных размеров.

Учет геометрических параметров острия при интерпретации измерений позволяет получать изображения, в которых заметно уменьшены шумы и исключены многие артефакты, в том числе искажения, возникающие при сканировании элемента рельефа "ступенька".



Рис. 3. Сканируемая поверхность (1); траектория движения иглы (2) при сканировании; модель рельефа поверхности (3);  $P_1 - P_4 -$  положение туннельной оболочки острия в процессе сканирования

При сканировании "ступеньки" происходит отскок иглы от сканируемой поверхности. Если перепад высот достаточно мал, то высота отскока окажется также малой. В результате контакт с поверхностью вернется до того, как основание иглы достигнет вершины ступеньки. Рис. 3 иллюстрирует этот случай. После отскока контакт восстанавливается с правой стороной поверхности иглы. При этом в траектории движения иглы возникает участок, который можно охарактеризовать как "провал" (точка *K*). Его появление связано с тем, что в точке контакта основание иглы расположено ниже уровня "ступеньки", и в дальнейшем оно поднимается вверх.

Участки А\*Е и ЕС\* модели поверхности отстоят от траектории движения иглы АВ и КС на радиус закругления острия. Вершина "ступеньки", как и вся ее вертикальная стенка, не входит в модель поверхности (т. е. поверхности, которая получается в результате интерпретации измерений с учетом геометрии острия), так как модель строится в предположении постоянства туннельного зазора. Однако в реальности по мере приближения к вертикальной стенке туннельный зазор уменьшается. При небольшом перепаде высот "ступеньки" отрезок между вершиной ступеньки и точкой Е достаточно мал ввиду того, что скорость вертикального перемещения иглы намного больше скорости сканирования. Непосредственно из рисунка видно, что при небольшом перепаде высот "ступеньки" ее горизонтальная поверхность восстанавливается без искажений.

Если высота "ступеньки" велика (рис. 4), то после отскока игла окажется в контакте с поверхностью в нижней своей точке. В рассматриваемом случае модель поверхности будет содержать артефакт — несуществующий выступ. На рис. 4 его вершина обозначена *B*.



Рис. 4. Сканируемая поверхность (1); траектория движения иглы (2) при сканировании; модель рельефа поверхности (3). Пунктиром показано положение туннельной оболочки острия в процессе сканирования

Обозначим  $B^*$  точку пересечения модели поверхности с горизонтальной частью "ступеньки". Принимая во внимание, что траектория движения иглы в окрестности стенки близка к вертикальной с достаточной для последующих вычислений точностью, длина отрезка  $BB^*$  может быть принята в качестве оценки высоты точки B над поверхностью.

Высота артефакта зависит от второй степени проекции отрезка  $BC^*$  ( $C^*$  — точка контакта туннельной оболочки с поверхностью) на горизонтальную ось. Непосредственно из рисунка следует, что чем ближе точка  $C^*$  к вершине ступеньки (точка K), тем меньше проекция отрезка  $BC^*$ . Оценим высоту точки B в случае, изображенном на рис. 4, в котором точка  $C^*$  удалена на расстояние, равное радиусу туннельной оболочки.

Пусть радиус закругления острия иглы равен 0,5 нм. С учетом того, что туннельный зазор равен 0,5 нм, радиус туннельной оболочки R составляет 1 нм. Отрезок  $KB^*$  между вершиной "ступеньки" и точкой пересечения модели поверхности с верхней частью ступеньки не может превышать туннельного зазора (в противном случае игла зацепится за выступ).

При оценке длины отрезка  $KB^*$  снизу следует принять во внимание, что для достаточно высоких "ступенек" она соизмерима с размером зазора. Это дает основание принять  $KB^* = 0$ , 25 нм (половине туннельного зазора). В итоге получаем неравенство

 $\Pi p(BC^*) < B^*C^* = R - KB^* = 0.75$  нм.

Здесь  $\Pi p(BC^*)$  — проекция отрезка  $BC^*$  на горизонталь.

При радиусе закругления туннельной оболочки R = 1 нм высота точки *B* не превышает  $R B^* C^{*2}/2 \approx \approx 0,25$  нм. При полученной оценке высоты выступа *B* следует принимать во внимание, что диаметр атома равен 0,2 нм.

Вблизи вертикальной стенки "ступеньки" вертикальная составляющая скорости иглы многократно превосходит горизонтальную составляющую. По этой причине высота отскока иглы DEпревышает его ширину  $DC^*$ , где D — пересечение продолжения поверхности "ступеньки" с траекторией движения иглы. Непосредственно из рис. 4 находим, что

$$DC^* = DB^* + B^*C^*.$$

С учетом того, что отрезок  $DB^*$  равен радиусу туннельной оболочки (1 нм),  $DC^* = 1,75$  нм и, следовательно, для высоты отскока имеем оценку

$$DE > 1,75 \text{ HM} \gg BB^*$$
.

Это неравенство позволяет сделать вывод о том, что учет формы и размеров острия иглы позволяет почти на порядок уменьшить погрешности измерений объекта нанорельефа типа "ступенька".

\* \* \*

При коррекции измерений учет особенностей процесса сканирования позволяет существенно уменьшить вклад таких ошибок, которые не являются случайными. В работе показано, что учет физических размеров острия иглы существенно уменьшает искажения, возникающие при сканировании участков нанорельефа с большим перепадом высот.

### Список литературы

1. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004.

2. Bukharaev A. A., Berdunov N. V., Ovchinnikov D. V., Salikhov K. M. Three-dimensional probe and surface reconstruction for atomy force microscopy using deconvolution algorithm // Scanning microscopy. 1998. Vol. 12, N 1. P. 225–234.

3. **Неволин В. К.** Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2006.

4. Колесов Д. В., Яминский И. В. Кантилеверы для сканирующей зондовой микроскопии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 11. С. 5–11.

5. **Карташев В. А., Карташев В. В.** Способ определения формы и размеров острия иглы зондового микроскопа. Пат. РФ № 210122619 от 2010 г.

6. **Карташев В. А., Карташев В. В.** Определение формы и размера острия иглы туннельного микроскопа // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 10. С. 7—10.

УДК 538.9

И. В. Уваров, мл. науч. сотр.,

В. В. Наумов, канд. физ.-мат. наук, ученый секретарь,

**И. И. Амиров**, д-р физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, зав. лаб., e-mail: amirov@yf-ftian.ru,

Ярославский филиал Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института РАН

### ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАНТИЛЕВЕРОВ НАНОРАЗМЕРНОЙ ТОЛШИНЫ

### Поступила в редакцию 11.07.2013

Представлена методика изготовления металлических нанокантилеверов. Кантилеверы имели трехслойную структуру и изготавливались в двух вариантах: Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti. Толщина кантилеверов составляла 40, 80 и 120 нм. Отношение длины кантилеверов составляла 40, 80 и 120 нм. Отношение длины кантилеверов выполнялось путем травления жертвенного слоя в плазме SF<sub>6</sub>. При изготовлении кантилеверов Cr/Al/Cr применялся вакуумный термический отжиг. Для кантилеверов Ti/Al/Ti важным моментом являлся подбор режима освобождения.

**Ключевые слова:** наноэлектромеханические системы, нанокантилевер, изготовление, плазменное травление, остаточные напряжения, термический отжиг, поверхность

### Введение

Нанокантилевер — наноразмерная балка, один конец которой закреплен, — является наиболее распространенным подвижным элементом наноэлектромеханических систем (НЭМС). Важный класс таких систем составляют наноэлектромеханические переключатели [1], среди которых наиболее распространены устройства с электростатическим исполнительным механизмом [2]. В работах [3–7] представлены нанопереключатели, кантилеверы которых имеют толщину 30...200 нм и длину порядка нескольких микрометров. При этом напряжение срабатывания данных ключей слишком велико для того, чтобы их можно было широко использовать в современных электронных схемах. В перечисленных выше работах отношение длины кантилевера к толщине не превышает 50. Уменьшить напряжение срабатывания можно, увеличив данное отношение, тем самым уменьшив жесткость кантилевера. Важно, чтобы кантилевер при этом был проводящим.

Другая интенсивно развивающаяся область применения кантилеверов — химические и биологические сенсоры [8]. Данные устройства регистрируют изменения, происходящие на поверхности кантилевера, по сдвигу его резонансной частоты [9] либо по статическому изгибу [10]. Нанокантилеверы, толщина которых много меньше длины и ширины, имеют большое отношение площади поверхности к объему и поэтому очень чувствительны к изменениям состояния поверхности. Это дает возможность изготавливать на их основе чрезвычайно эффективные НЭМС-сенсоры. Чувствительность нанокантилеверов также широко используются в научных целях, в том числе для исследования различных поверхностных эффектов [11].

При изготовлении нанокантилеверов возникает ряд проблем, приводящих к неправильной работе или выходу устройств из строя. Трудности связаны, как правило, с нежелательным изгибом кантилеверов под действием остаточных напряжений, существующих в материале кантилевера [12], а также с прилипанием кантилеверов к находящимся рядом поверхностям под действием адгезионых сил [13]. С увеличением отношения длины и ширины к толщине кантилевера данные проблемы приобретают все большее значение. В данной работе представлена методика изготовления трехслойных металлических нанокантилеверов, имеющих толщину от 40 до 120 нм. Отношение длины кантилеверов к толщине достигает 2500, ширины к толщине — 250, площади поверхности к объему — 0.05 нм<sup>-1</sup>. Описаны конструктивные особенности кантилеверов и методы решения проблем, возникающих при их изготовлении.

### Технология изготовления нанокантилеверов

Процесс изготовления кантилеверов показан на рис. 1. Кремниевая пластина КДБ-0,01 термически окислялась во влажном кислороде (4 ч при температуре 1080 °C). После окисления толщина слоя SiO<sub>2</sub> на пластине составляла 0,9 мкм. Диоксид кремния служил изолятором между кантилеверами и кремниевой подложкой. На окисленную пласти-





ну магнетронным методом наносился жертвенный слой аморфного кремния a-Si толщиной 2 мкм (давление аргона p = 0,2 Па, скорость нанесения v = 0.6 нм/с). Затем пластина покрывалась слоем позитивного фоторезиста S1813SP15 (толщина 1,5 мкм), в котором методом контактной обратной фотолитографии с помощью фотошаблона выполнялся рисунок кантилеверов (рис. 1, а). Кантилеверы имели длину от 10 до 100 мкм и ширину от 2 до 10 мкм. Далее магнетронным методом наносились структурные слои металла (рис. 1, б). В качестве материала кантилеверов был выбран алюминий, заключенный между слоями хрома или титана. Таким образом, кантилеверы были трехслойными и изготавливались в двух вариантах: Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti. Толщины наносимых слоев находились в соотношении 1/6/1, суммарная толщина слоев составляла 40 (слои 5/30/5), 80 (10/60/10) и 120 (15/90/15) нм. Толщина кантилеверов измерялась с помощью СЭМ Zeiss Supra-40, а также с помощью профилометра TALYSTEP фирмы Taylor-Hobson. Нанесение слоев Сг осуществлялось при p = 0.5 Па, v = 0.5 нм/с, слоев Ті при p = 0.2 Па, v = 0.25 нм/с, слоя Al — при  $p = 0.5 \Pi a$ , v = 1 нм/с. Слои Сг и Ті были введены для того, чтобы скомпенсировать градиент напряжений, всегда существующий в слое алюминия и приводящий к скручиванию его при освобождении металлической пленки. Также они предохраняли слой Al от окисления. Кроме того, нижние слои Cr и Ті являлись адгезионными слоями для Al. После нанесения слоев металла оставшийся фоторезист удаляли ("взрывная" литография, ДМФА с механической доработкой, рис. 1, в). Далее пластина снова покрывалась слоем позитивного фоторезиста, в котором методом обратной фотолитографии с помощью фотошаблона выполнялся рисунок контактной площадки (рис. 1, г). Через окно в слое фоторезиста выполнялось травление слоя а-Si в плазме SF<sub>6</sub> (мощность индукционного разряда 700 Вт, расход  $SF_6$  70 нсм<sup>3</sup>/мин, время травления 60 с) и травление слоя SiO<sub>2</sub> в растворе HF/NH<sub>4</sub>F (время травления 21 мин, рис. 1, д). Затем на пластину магнетронным методом наносился слой Al толщиной 100 нм и осуществлялся "взрыв" (рис. 1, е, ж). Таким образом, непосредственно на кремниевой подложке

была сформирована алюминиевая контактная площадка, необходимая лля исследования резонансных свойств нанокантилеверов. Заключительным этапом изготовления являлось удаление жертвенного слоя а-Si из-под кантилеверов (освобождение кантилеверов) методом травления в плазме SF<sub>6</sub> ВЧ-индукционного разряда (рис. 1, 3). При этом происходил небольшой подтрав под опорную площадку, к которой крепились кантилеверы. На рис. 2 показан один из образцов.



Рис. 2. Изготовленный образец. На выноске — СЭМ-изображение кантилеверов Ті/Аl/Ті размерами 20 мкм × 8 мкм × 120 нм

### Кантилеверы Cr/Al/Cr

Основной проблемой при изготовлении кантилеверов Cr/Al/Cr был их изгиб под действием остаточных напряжений, возникших в трехслойной металлической пленке в процессе ее нанесения. При удалении жертвенного слоя остаточные напряжения освобождались и приводили к изгибу кантилеверов вниз, к подложке. Кантилеверы при этом, как правило, касались подложки.

Для снятия остаточных напряжений в пленке Cr/Al/Cr применялся вакуумный термический отжиг образцов перед освобождением [14]. Температура отжига составляла 330 °C, время — 1 ч. На рис. 3 показаны СЭМ-изображения отожженных и неотожженных кантилеверов Cr/Al/Cr размерами 20 мкм  $\times$  8 мкм  $\times$  120 нм. Освобождение тех и других кантилеверов выполнялось одновременно, время травления a-Si составляло 30 с, скорость травления — 8 мкм/мин. Видно, что неотожженные кантилеверы после освобождения были наклонены вниз и касались подложки. Отожженные же, наоборот, были изогнуты вверх. Таким образом, вакуумный отжиг образцов до освобождения существенно повлиял на изгиб освобожденных кантилеверов Cr/Al/Cr. Для получения ровных кантилеверов, параллельных подложке, был необ-



Рис. 3. Освобожденные кантилеверы Cr/Al/Cr размерами 20 мкм × 8 мкм × 120 нм: *а* — неотожженный образец; *б* — отожженный

ходим термический отжиг образца с правильно подобранными временем и температурой.

Исследование образцов с помощью СЭМ показало, что поверхность кантилеверов Cr/Al/Cr практически не изменялась при освобождении. После удаления жертвенного слоя металлическая пленка Cr/Al/Cr сохраняла исходную зернистость и шероховатость, вне зависимости от режима, в котором происходило удаление. Поверхности освобожденного кантилевера и опорной площадки были одинаковы. Вакуумный отжиг при указанных выше параметрах также не влиял на морфологию поверхности пленки Cr/Al/Cr.

### Кантилеверы Ti/Al/Ti

В отличие от образцов Cr/Al/Cr, поверхность кантилеверов Ti/Al/Ti претерпевала изменения в процессе удаления жертвенного слоя. При наблюдении в СЭМ данное изменение выглядело как появление темных пятен или пор на поверхности пленки Ti/Al/Ti. Также наблюдалась связь изгиба освобожденных кантилеверов со степенью измененности поверхности пленки относительно исходной, не подвергавшейся плазменной обработке. Было обнаружено, что изменение поверхности зависит от времени и скорости травления a-Si. На рис. 4 показаны СЭМ-изображения поверхности образца Ti/Al/Ti (15/90/15 нм) до освобождения и образцов, различающихся временем ( $\tau$ ) и скоростью травления (v) жертвенного слоя. Время и скорость

были подобраны таким образом, чтобы у всех образцов было удалено одинаковое количество a-Si. Видно, что чем дольше происходило удаление жертвенного слоя, тем сильнее изменялась поверхность металлической пленки. Пятен, напоминающих канавки, становилось все больше. При этом освобожденные кантилеверы приобретали все больший изгиб вверх от подложки. Важно отметить, что при  $\tau = 15$  с освобожденные кантилеверы имели практически идеальную форму, т. е. были неизогнутыми и параллельными подложке (см. вставку на рис. 4,  $\delta$ ).

Чтобы выяснить, в чем заключалось изменение поверхности пленки Ti/Al/Ti при удалении жертвенного слоя, был выполнен рентгеновский энергодисперсионный микроанализ (система Oxford Instruments INCA Energy и CЭM Zeiss Supra-40) образцов, показанных на рис. 4. На полученных рентгеновских спектрах были четко различимы пики углерода, кислорода, фтора, алюминия, кремния, титана. Спектры исследуемых образцов различались высотой пиков. На рис. 5, *а* показаны зависимости высоты пиков C, O, F и Ti от времени удаления жертвенного слоя.

Пик углерода имел наибольшую высоту на образце, где жертвенный слой не удалялся. Однако на образце с  $\tau = 15$  с данный пик был значительно ниже. Вероятнее всего, в образце до освобождения содержался фоторезист, оставшийся после взрывной литографии. При помещении образца в плазму остатки резиста удалялись, с чем и был связан резкий спад высоты пика С. С дальнейшим увеличе-

нием времени удаления жертвенного слоя наблюдался рост пика С, что говорило о накоплении углерода в пленке Ti/Al/Ti. С увеличением времени удаления a-Si в металлической пленке также росло содержание О и F. При этом рост высоты пиков О и F постепенно замедлялся и выходил на насыщение (рис. 5, *a*).

Содержание Ті в металлической пленке уменьшалось с увеличением времени удаления a-Si. Это было видно по высоте пика с энергией 4,51 кэВ (рис. 5, а). Видимо, титан частично удалялся с поверхности пленки в процессе травления жертвенного слоя. Выяснить, что представляли собой пятна, появляющиеся на поверхности пленки Ti/Al/Ti (см. рис. 4, в, г), не удалось вследствие их малых размеров. Предположительно, это ямки травления в верхнем слое титана. С частичным удалением Ті с поверхности, скорее



7



Рис. 5. Зависимость высоты пиков рентгеновского спектра от времени травления a-Si (N -число зарегистрированных рентгеновских квантов):

а — образцы Ті/Аl/Ті 15/90/15 нм; б — образцы Cr/Al/Cr 15/90/15 нм

всего, был связан и изгиб освобожденных кантилеверов. Так как жесткость верхнего слоя титана падала, остаточные напряжения в верхней части алюминиевого слоя сдерживались меньше, поэтому кантилеверы изгибались вверх.

Также был выполнен рентгеновский микроанализ образцов Cr/Al/Cr, отличающихся друг от друга временем плазменного травления a-Si. На рис. 5, б показаны зависимости высоты пиков C, O, Cr и F от времени удаления жертвенного слоя. С увеличением времени травления в пленке Cr/Al/Cr, в отличие от пленки Ti/Al/Ti, не увеличивалось содержание углерода и фтора. При этом содержание фтора было очень низким. Содержание кислорода в образцах, у которых удалялся a-Si, несколько превышало содержание в исходном образце, однако оно не росло с увеличением времени травления. Содержание Cr в образце не уменьшалось. Это говорит о том, что Cr не удалялся с поверхности пленки в процессе травления a-Si. Данные результаты вполне согласуются с тем фактом, что поверхность кантилеверов Cr/Al/Cr не изменялась в результате освобождения.

Таким образом, как и в случае пленок Cr/Al/Cr, у кантилеверов Ti/Al/Ti существовала проблема изгиба при освобождении. Однако она успешно решалась путем подбора режимов удаления жертвенного слоя. Для получения кантилеверов, неизогнутых и параллельных подложке, желательно было выполнять освобождение как можно быстрее, с максимальной селективностью травления кремния по отношению к титану. При этом вышеописанные изменения пленки Ti/Al/Ti были минимальны. Применять термический отжиг образцов не было необходимости.

### Другие особенности кантилеверов

Нанокантилеверы обладали рядом конструктивных особенностей, связанных с технологией изготовления. Одна из таких особенностей — подтрав под опорную площадку кантилевера. На рис. 6 показано СЭМ-изображение освобожденного кантилевера (вид сверху). Электронный луч частично проходил через металлическую пленку, поэтому под опорной площадкой был четко различим жертвенный слой. Видно, что a-Si был удален не только изпод кантилевера, но также частично из-под опорной площадки. В работе [15] показано, что подобный подтрав изменяет эффективную длину кантилевера и влияет на его резонансные частоты. Данная особенность была связана с изотропностью плазменного травления a-Si.

Другая особенность — непрямоугольные края кантилеверов. На рис. 6 видно, что в местах крепле-

ния к опорной площадке кантилевер имел уширения, имеющие форму дуги окружности радиусом приблизительно 0,9 мкм. Данные уширения уменьшают эффективную длину кантилевера [16]. На свободном конце кантилевер имел сужения, представляющие собой дугу такого же радиуса. Оба этих дефекта формы были обусловлены процессом фотолитографии, при котором формировался рисунок кантилеверов.



Рис. 6. Кантилевер Cr/Al/Cr размерами 10 мкм × 8 мкм × 40 нм



гис. 7. кантилеверы Сг/Ај/Сг толщиной 120 нм, шириной о мкм и длиной от 90 до 100 мкм

Распространенным явлением при изготовлении было прилипание нанокантилеверов к подложке под действием адгезионных сил [17]. Несмотря на относительно большую толщину жертвенного слоя (2 мкм) и на сухой метод освобождения, изготовить ровные, параллельные подложке и при этом незалипшие кантилеверы длиной более 70 мкм, не удавалось. Избежать залипания более длинных кантилеверов было возможным лишь за счет их изгиба вверх (рис. 7). Подобный изгиб кантилеверов в исходном состоянии зачастую допускается в НЭМС-ключах [3, 5] и сенсорах [17].

### Заключение

В работе представлена методика изготовления трехслойных металлических нанокантилеверов, имеющих сверхвысокое отношение длины и ширины к толщине. Кантилеверы изготавливались в двух вариантах: Cr/Al/Cr и Ti/Al/Ti. Оба типа кантилеверов имели свои особенности и требовали индивидуального подхода при изготовлении.

Кантилеверы Cr/Al/Cr отличались стойкостью к плазменной обработке. Металлическая пленка вела себя одинаково при различных режимах удаления жертвенного слоя. Она была нанесена таким образом, что при освобождении кантилеверы изгибались вниз. Причиной тому являлись остаточные напряжения в пленке. Подбирая параметры вакуумного термического отжига, удавалось снимать остаточные напряжения и изготавливать ровные, неизогнутые кантилеверы Cr/Al/Cr.

Пленка Ti/Al/Ti, в отличие от Cr/Al/Cr, была чувствительна к плазменной обработке. В процессе удаления жертвенного слоя титан с ее поверхности частично стравливался. Скорее всего, это являлось основной причиной изгиба освобожденных кантилеверов. "Вкрапления" на поверхности металлической пленки представляли собой протравы слоя Ті. Кроме того, в процессе удаления а-Si в образце накапливались C, O и F. B конечном счете, чем сильнее пленка Ti/Al/Ti изменялась в процессе плазменного травления, тем сильнее были изогнуты освобожденные кантилеверы. Поэтому, чтобы минимизировать данные изменения и изготавливать ровные кантилеверы Ti/Al/Ti, освобождение необходимо было выполнять как можно быстрее и с максимальной селективностью травления кремния по отношению к титану. Вакуумный термический отжиг образцов при этом не требовался.

Нанокантилеверы, обладающие высоким отношением длины и ширины к толщине и, следовательно, большим отношением площади поверхности к объему, обладают рядом потенциальных достоинств, таких как малая жесткость и высокая чувствительность к изменениям состояния поверхности. Однако изготовление подобных кантилеверов представляет собой непростую задачу, и отношение длины и ширины к толщине зачастую является ограничивающим фактором.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием "Диагностика микро- и наноструктур" при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и гранта РФФИ № 10-07-00447-а.

### Список литературы

1. Loh O. Y., Espinosa H. D. Nanoelectromechanical contact switches // Nature Nanotechnology. 2012. Vol. 7. P. 283–295.

2. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера. 2004. 528 с.

3. Lee S. W., Park S. J., Campbell E. E. B. et al. A fast and low-power microelectromechanical system-based non-volatile memory device // Nature Communications. 2011. Vol. 2. DOI: 10.1038/ncomms1227.

4. Lee T.-H., Bhunia S., Mehregany M. Electromechanical computing at 500 °C with silicon carbide // Science. 2010. Vol. 329. P. 1316–1318.

5. Cetiner B. A., Biyikli N., Yildirim B. S. et al. Nanoelectromechanical switches for reconfigurable antennas // Microwave and optical technology letters. 2010. Vol. 52, N 1. P. 64–69.

6. Fruehling A., Xiao S., Qi M. et al. Nano-switch for study of gold contact behavior // Birck and NCN Publications. 2009. 554 p.

7. Jang W. W., Lee J. O., Yoon J.-B. et al. Fabrication and characterization of a nanoelectromechanical switch with 15-nm-thick suspension air gap // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92. 103110.

8. **Boisen A., Dohn S., Keller S. S.** et al. Cantilever-like micromechanical sensors // Reports on Progress in Physics. 2011. Vol. 74. 036101.

9. Eom K., Park H. S., Yoon D. S. et al. Nanomechanical resonators and their applications in biological/chemical detection: Nanomechanics principles // Physics Reports. 2011. Vol. 503. P. 115–163.

10. Fritz J., Baller M. K., Lang H. P. et al. Translating biomolecular recognition into nanomechanics // Science. 2000. Vol. 288. P. 316–318.

11. **Guo J.-G., Zhao Y.-P.** The size-dependent bending elastic properties of nanobeams with surface effects // Nanotechnology. 2007. Vol. 18. 295701. 6 p.

12. **Fang W., Wickert J. A.** Determining mean and gradient residual stresses in thin films using micromachined cantilevers // Journal of Micromechanics and Microengineering. 1996. Vol. 6. P. 301–309.

13. **Bhushan B.** Adhesion and stiction: Mechanisms, measurement techniques, and methods for reduction // Journal of Vacuum Science and Technology B. 2003. Vol. 21. P. 2262–2296.

14. Zhang X., Zhang T.-Y., Wong M. et al. Rapid thermal annealing of polysilicon thin films // Journal of Microelectromechanical Systems. 1998. Vol. 7.  $\mathbb{N}$  4. P. 356–364.

15. **Babaei Gavan K., van der Drift E. W. J. M., Venstra W. J.** et al. Effect of undercut on the resonant behaviour of silicon nitride cantilevers // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2009. Vol. 19. 035003.

16. **Guillon S., Saya D., Mazenq L.** et al. Effect of non-ideal clamping shape on the resonance frequencies of silicon nanocantilevers // Nanotechnology. 2011. Vol. 22. 245501.

17. Cimalla V., Niebelschutz F., Tonisch K. et al. Nanoelectromechanical devices for sensing applications // Sensors and Actuators B. 2007. Vol. 126. P. 24–34.

## Моделирование и конструирование МНСТ

### УДК 621.3

В. А. Васильев, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Д. О. Орехов, инж.-электроник, П. С. Чернов, канд. техн. наук, доц., Пензенский государственный университет, e-mail: opto@bk.ru

### СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАНО-И МИКРОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

### Поступила в редакцию 21.06.2013

Рассмотрены основные методы моделирования нано- и микроразмерных систем. Раскрыта суть, показаны достоинства и недостатки описанных методов, области их применения. Приведены примеры численной реализации.

**Ключевые слова:** нано- и микроструктуры, нано- и микроэлектромеханические системы, моделирование, математические методы, квантовая физика, классическая физика

Фундаментальные и прикладные исследования в области нанотехнологий сосредоточены на проектировании и производстве молекулярных структур и устройств, что в настоящее время немыслимо без использования современных методов компьютерного и имитационного моделирования [1-8]. Задачи проектирования и моделирования сложных многокомпонентных структур, таких, например, как нано- и микроэлектромеханические системы (НиМЭМС, НЭМС, МЭМС), а также их компонентов в настоящее время решаются с помощью новейших теоретических разработок и концепций моделирования [6-11]. Современные исследования таких систем сконцентрированы на создании и применении разнообразных методов моделирования, целью которых является описание механических (деформация, напряжения, вибропрочность и др.), электромагнитных (проводимость и чувствительность, диэлектрическая и магнитная проницаемость, плотность заряда и тока, распространение и излучение волн), оптических и других свойств систем. Создаваемые нано- и микроразмерные устройства находят широкое применение в различных областях науки и техники: ракетной и авиационной технике, автомобилестроении, робототехнике, атомной энергетике, системах связи, медицине (искусственные органы, введение лекарственных средств и

диагностика заболеваний), биотехнологиях (исследование генома человека) и т. д.

Перед началом дорогостоящего производства разработчик должен провести всесторонний анализ проблем и решаемых задач. С использованием средств оптимизации структуры и архитектуры подсистем, имитационного моделирования, анализа и визуализации, быстрой оценки, применения экономичных решений для снижения стоимости и времени выполнения проекта можно прийти к тому, что выпускаемые изделия будут соответствовать желаемым требованиям и техническим условиям. Широкий спектр нано- и микроразмерных устройств, таких как молекулярные диоды и транзисторы, преобразователи и механизмы, уже сейчас изготовляют с точностью, близкой к атомарной.

Для имитационного моделирования поведения и анализа различных свойств используют разнообразные методы, позволяющие инженерам всесторонне подходить к решению назревших проблем анализа и управления, оптимизации конструкций, монтажа и производства, а также внедрения и применения новых технологий.

В качестве основных численных методов моделирования можно выделить: квантово-механические расчеты из первых принципов, методы молекулярной механики, метод молекулярной динамики, методы Монте-Карло, конечно-разностные и конечно-элементные методы.

Достоинством расчетов из первых принципов является точное описание атомного взаимодействия с учетом квантовых эффектов. Недостатком является чрезвычайная требовательность к вычислительным ресурсам классических компьютеров, не позволяющая напрямую применять квантовую механику к достаточно большим и сложным системам.

Приближенные методы решений уравнений квантовой механики и квазиклассические методы, включающие в себя *метод самосогласованного поля, метод молекулярных орбиталей, метод функционала плотности*, позволяют уменьшить количество вычислений ценой снижения точности и достоверности результата.

Методы молекулярной механики представляют собой совокупность методов определения геометрического строения молекул и их энергетических уровней, не рассматривающих детальное взаимодействие каждого отдельного электрона. Методы молекулярной динамики — численные методы решения различных физических задач путем вычисления траекторий движения атомов, молекул, коллоидных и других частиц, составляющих исследуемую систему, с помощью уравнений классической физики. Методы Монте-Карло представляют собой группу численных методов, основанных на статистическом (вероятностном) моделировании процесса, который исследуется путем многократных повторений его случайных реализаций. Конечно-разностные и конечно-элементные методы позволяют находить численные решения дифференциальных уравнений математической физики.

Квантово-механические расчеты (расчеты из первых принципов) применяют тогда, когда размеры системы настолько малы, что использование методов классической физики (классическая механика, термодинамика, классическая электродинамика) не представляется возможным. В связи с трудностью применения методов квантовой механики к сложным (микро- и макроскопическим) системам, широкое распространение получили "эффективные методы", примером которых может служить метод самосогласованного поля (Хартри-Фока) [6]. Он основывается на том, что взаимодействие каждого электрона в атоме со всеми другими заменяется его взаимодействием с усредненным полем, создаваемым ядром и остальными электронами. Это позволяет упростить выражения, описывающие межэлектронное взаимодействие, при этом полная волновая функция для атома записывается в виде произведения волновых функций отдельных электронов. Другими словами, предполагается независимость движения каждого электрона в атоме от всех остальных.

Метод молекулярных орбиталей (МО) является одним из наиболее распространенных методов вычислительной квантовой химии и служит основой многих ее модельных представлений [12]. Основная идея метода МО заключается в том, чтобы рассматривать движение электрона в молекуле подобно тому, как это делается по отношению к электронам в атоме. Предполагается, что в молекуле, как и в атоме, можно построить набор разрешенных дискретных энергетических уровней и соответствующих им волновых функций (молекулярных орбиталей). В отличие от атомных орбиталей, молекулярные орбитали — многоцентровые. Для нахождения молекулярных орбиталей каждую из них представляют в виде линейной комбинации волновых функций атомных орбиталей. Кроме того, для каждой орбитали определяют соответствующую ей энергию.

Идея *метода функционала плотности* состоит в том, чтобы при описании электронной подсистемы заменить многоэлектронную волновую функцию электронной плотностью. Это позволяет существенно упростить задачи, поскольку многоэлектронная волновая функция зависит от 3*N* переменных — по три пространственных координаты на каждый из N электронов, тогда как электронная плотность — это функция всего лишь трех пространственных координат. Теорию функционала плотности обычно используют совместно с формализмом Кона — Шэма, в рамках которого задача об описании нескольких взаимодействующих электронов в статическом внешнем поле атомных ядер сводится к задаче о независимых электронах, движущихся в некотором эффективном потенциальном поле. Это поле учитывает кулоновские эффекты, в частности, обменное взаимодействие и электронную корреляцию. Метод функционала плотности часто дает весьма хорошие результаты [13].

В соответствии с методом молекулярной механики потенциальное поле аппроксимируется определенными эмпирическими функциями разной степени сложности, представляющими собой, например, суммы парных потенциалов взаимодействия атомов [14]. Параметры потенциальных функций, определяющих силовое поле молекулы, выбирают так, чтобы получить согласие рассчитанных и экспериментальных характеристик молекулы. В простейшем случае параметрами могут быть межъядерные расстояния (длины связей), валентные углы и силовые постоянные. Данный метод основан на допущении возможности переноса параметров от одной молекулы к другой, в связи с чем численные значения коэффициентов, подобранные для простых молекул, используют при прогнозировании свойств других более сложных соединений.

В основе метода молекулярной динамики (МД) лежит расчет классических (ньютоновских) траекторий движения взаимодействующих частиц в фазовом пространстве их координат и импульсов. В соответствии с заданным силовым полем рассчитывают силу, приложенную к каждой частице, и уравнения движения решают путем численного интегрирования. Данный метод позволяет моделировать детальную микроскопическую картину внутренней подвижности систем, состоящих из молекул. Важным достоинством метода молекулярной динамики является возможность вычисления коэффициентов переноса. С помощью данного метода можно проследить траекторию движения атомов и молекул в некотором конечном временном интервале, не превышающем, однако, нескольких микросекунд. В результате анализа траекторий движения можно получать данные о динамике атомов и молекул, наблюдать за реакцией, рассчитывать механические и термодинамические свойства системы [15].

Методы Монте-Карло представляют собой широкий класс вычислительных алгоритмов, в которых для работы используются случайные (псевдослучайные) числа. Эти методы включают следующие основные этапы.

1. Постановка задачи (определение исследуемой системы и исходных данных). 2. Генерация входных данных с использованием случайных чисел.

3. Вычисление реакции системы на входные данные согласно детерминированным алгоритмам.

4. Сбор и обработка результатов.

Этапы 2 и 3 составляют так называемый "шаг Монте-Карло". Усреднение результатов моделирования по множеству шагов Монте-Карло дает решение задачи, приближающееся к точному решению по мере увеличения числа шагов.

Методы Монте-Карло получили широкое распространение в решении многих математических и физических задач [16—18]. На рис. 1 показан контурный график поверхности тонкой пленки (где координаты x и y — в безразмерных единицах, h — толщина пленки в относительных единицах), полученной в результате численного моделирования процесса роста согласно модели на основе методов Монте-Карло [17, 18].

Метод конечных разностей (МКР) основан на аппроксимации входящих в исходные дифференциальные уравнения производных их дискретными (разностными) аналогами [19]. Достоинствами метода являются высокая эффективность и простота реализации, наглядность процедуры дискретизации, позволяющая строить схемы высокого порядка точности. С появлением быстродействующих компьютеров метод стал удобен для практического использования и является одним из эффективных при решении различных задач математической физики. Недостатком метода является сложность учета начальных и граничных условий задачи. По этой причине приложения метода конечных разностей ограничены случаями относительно простых по геометрии расчетных областей.

Основная идея МКР для приближенного численного решения краевой задачи двумерного дифференциального уравнения в частных производных состоит в следующем. На плоскости в области *A*,



Рис. 1. Контурный график поверхности, полученной моделированием



Рис. 2. Построение сеточной области

в которой ищется решение, строится сеточная область  $A_s$  (рис. 2), состоящая из одинаковых ячеек размером *s* (*s* — шаг сетки) и являющаяся приближением данной области *A*. Заданное дифференциальное уравнение в частных производных заменяют в узлах сетки  $A_s$  соответствующим конечно-разностным уравнением. В граничных узлах области  $A_s$  устанавливают начальные значения.

Решая систему конечно-разностных алгебраических уравнений, получают значения искомой функции в узлах сетки  $A_s$ , т. е. приближенное численное решение задачи. Выбор геометрии сеточной области  $A_s$  зависит от конкретной задачи.

Рассмотрим в качестве примера уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0, \qquad (1)$$

где p(x, y) — искомая функция; x, y — координаты. Заменим частные производные  $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$  и  $\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$  в уравнении (1) конечно-разностными отношениями:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \approx \frac{p(x+s,y) - 2p(x,y) + p(x-s,y)}{s^2},$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \approx \frac{p(x,y+s) - 2p(x,y) + p(x,y-s)}{s^2}.$$
(2)

Решая конечно-разностный аналог уравнения (1) относительно p(x, y), получим

$$p(x, y) = [p(x + s, y) + p(x - s, y) + p(x, y + s) + p(x, y - s)]/4.$$
(3)

Зная значения функции p(x, y) в граничных узлах контура сеточной области  $A_s$  в соответствии с граничными условиями и используя выражение (3), получим численное решение задачи (1) в заданной области A.

Чем больше число узлов (т. е. чем мельче сетка), тем меньше погрешность вычислений. Однако с уменьшением шага *s* возрастает время решения задачи. В связи с этим обычной практикой является выполнение пробных вычислений с достаточно крупным шагом *s*, позволяющим оценить полученную погрешность вычислений, и при необходимости перейти к более мелкой сетке во всей области или в какой-то ее части.

Метод конечных элементов широко используют в механике деформируемого тела. Математически метод конечных элементов можно представить в виде задачи минимизации определенного функционала совокупностью функций, каждая из которых определена на своей подобласти [20]. Модель исследуемой системы при использовании данного метода задается системой дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями [21]. Так, для задач механики деформируемого тела требуется найти решение дифференциального уравнения вида

$$-\nabla(c \otimes \nabla u) = k,\tag{4}$$

где k — объемная сила; c — тензор четвертого ранга, описывающий механические свойства материала; u — решение задачи;  $\nabla$  — оператор набла;  $\otimes$  — знак тензорного умножения.

Следуя схеме конечно-элементного решения уравнения (4), разложим решение по базисным функциям:

$$u(x) = \sum_{j=1}^{N_p} U_j \phi_j(x).$$
(5)

Уравнение (4) с учетом граничных условий Неймана и Дирихле сводится к системе

$$\sum_{j=1}^{N_p} \left( \int_{\Omega} (c \nabla \phi_j) \nabla \phi_i + \int_{\partial \Omega} q \phi_j \phi_i ds \right) U_j =$$
  
=  $\int_{\Omega} k \phi_i dx + \int_{\partial \Omega} g \phi_i ds, \ i = 1, ..., N_p.$  (6)

Используя обозначения

$$K_{i,j} = \int_{\Omega} (c \nabla \phi_j) \nabla \phi_i dx; \ Q_{i,j} = \int_{\partial \Omega} q \phi_j \phi_i ds;$$
(7)

$$F_i = \int_{\Omega} k \phi_i dx; \ G_i = \int_{\partial \Omega} g \phi_i ds, \tag{8}$$

систему удается переписать в следующем матричном виде:

$$(K+Q)U = F+G,$$
(9)

где K — матрица жесткости; K и Q — матрицы размером  $N_p \times N_p$ ; F и G — вектор-столбцы.

Таким образом, задача решения дифференциального уравнения (4) свелась к задаче решения системы алгебраических уравнений (9).

Пример результата решения задачи нахождения деформаций мембраны с жестким центром методом конечных элементов с использованием алгоритма и программы [22] представлен на рис. 3, *а*, *б* (см. третью сторону обложки). Разбиение на конечные элементы обычно осуществляют так, чтобы уменьшить размер элементов вблизи интересующей области и увеличить в менее важных областях, это позволяет снизить затраты времени на расчеты.

На рис. 3, *а* показано перемещение *W* мембраны при воздействии на нее сверху давления (здесь  $R/R_m$  — отношение текущего радиуса к радиусу мембраны). На рис. 3, *б* приведена установленная зависимость относительной радиальной деформации  $\varepsilon_r$  от относительного радиуса мембраны  $(R/R_m)$ .

Рассмотренные численные методы являются основой современного моделирования нано- и микроразмерных систем. С их помощью представляется возможным моделировать различные физические процессы в таких системах с достаточно высокой точностью. Применение программных продуктов, основанных на данных методах, приводит к снижению расходов на производство устройств, повышению их качества и надежности.

### Список литературы

1. **Оуэнс Ф., Пул-мл. Ч.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2010. 336 с.

2. Справочник Шпрингера по нанотехнологиям / Под ред. Бхушана Б. М.: Техносфера, 2010. 1040 с.

3. Мальцев П. П. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения — 2008. М.: Техносфера, 2008. 432 с.

4. Родунер Э. Размерные эффекты в наноматериалах. М.: Техносфера, 2010. 352 с.

5. Елисеев А. А., Лукашин А. В. Функциональные наноматериалы. М.: Физматлит, 2010. 456 с.

6. Ибрагимов И. М., Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф. Основы компьютерного моделирования наносистем. М.: Лань, 2010. 384 с.

7. Ибрагимов И. М., Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф. Основы нанотехнологии в технике. М.: Academia, 2009. 240 с.

8. Lyshevski S. E. Nano- and Micro Eelectromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering. Washington, D. C.: CRC Press 2001. 241 p.

9. Vasil'ev V. A., Chernov P. S. Study of the Influence of the Substrate Temperature and the Deposition Rate and Time on Surface Morphology // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. USA, Dover: Pleiades Publishing, Inc. 2013. Vol. 7, No. 3. P. 565–571. 10. Vasiliev V. A., Chernov P. S. Modeling and estimation of

10. Vasiliev V. A., Chernov P. S. Modeling and estimation of the parameters of the morphology of the surfaces of thin films of nano- and micro-electromechanical systems // Measurement Techniques. USA, New York: Springer, 2013. Vol. 55, Is. 12, P. 1350–1355.

11. Васильев В. А., Чернов П. С. Диффузионная модель роста и морфология поверхностей тонких пленок материалов // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 11–16.

12. Волков А. И. Метод молекулярных орбиталей. М.: Новое знание, 2006. 136 с.

13. **Sholl D., Steckel J. A.** Density Functional Theory: A Practical Introduction. Wiley-Interscience, 2009. 252 p.

14. **Ramachandran K. I., Deepa G., Krishnan Namboori P. K.** Computational Chemistry and Molecular Modeling Principles and Applications. GmbH: Springer-Verlag, 2008. 405 c.

15. Leach A. R. Molecular Modeling: Principles and Applications. GB Dorset: Dorset Press, 2001. 784 c.

16. Биндер К., Хеерман Д. В. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике. М.: Наука. Физматлит, 1995. 144 с.

17. Васильев В. А., Чернов П. С. Моделирование и анализ тонких пленок материалов // Инженерная физика. 2012. № 2. С. 25–30.

18. Васильев В. А., Чернов П. С. Моделирование и оценка параметров морфологии поверхностей тонких пленок нанои микроэлектромеханических систем // Измерительная техника. 2012. № 12. С. 13—16.

### УДК 621.383

М. М. Векшин, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: vek-shin@mail.ru, О. А. Кулиш, канд. физ.-мат. наук, преподаватель, Н. А. Яковенко, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный университет"

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СЛАБОНАПРАВЛЯЮШЕМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗОТРОПНЫХ СЛОЕВ

### Поступила в редакцию 24.06.2013

Предложен новый способ построения пассивных интегрально-оптических преобразователей плоскости поляризации оптического излучения на основе слабонаправляющих волноводов в стекле. Представлены расчеты с применением эффекта биений гибридных мод, обосновывающие принцип функционирования преобразователя поляризации, и изготовлены образцы преобразователей. Измеренная эффективность ТМ— ТЕ преобразования составляет 95%.

**Ключевые слова:** интегральная оптика, оптический волновод, поляризационный преобразователь, гибридная мода

### Введение

Использование поляризационного уплотнения каналов, поляризационно-разнесенного приема и передачи данных в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) предполагает применение таких устройств фотоники, как пространственные разделители поляризации и преобразователи (конверторы) плоскости поляризации. Исходя из целей миниатюризации и интеграции компонентов ВОЛС эти устройства изготовляют с применением техноло19. **Morton K. W., Mayers D. F.** Numerical Solution of Partial Differential Equations, An Introduction. Cambridge University Press, 2005. 278 p.

20. Eymard R., Gallouët T. R., Herbin R. The finite volume method // Handbook of Numerical Analysis. 2000. Vol. VII. P. 713–1020.

21. Белозубов Е. М., Васильев В. А., Чернов П. С. Моделирование деформаций мембран датчиков давления // Измерительная техника. 2009. № 3. С. 33—36.

22. Васильев В. А., Чернов П. С. Алгоритм и программа "Моделирование деформаций мембран с жестким центром датчиков давления" / Свид-во о рег. электронного ресурса № 15770 от 02.06.2010 г. в Объединенном фонде электронных ресурсов "Наука и образование", дата регистрации 21.05.2010 г. // Зарегистр. в гос. информационном фонде неопубликов. документов ФГНУ "Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти" (г. Москва), зарегистрировано в ОФЭРНиО ИНИМ РАО 10.06.2010 г. гос. рег. № 50201000834.

гий интегральной оптики. Если создание разделителей поляризационных компонент излучения не представляет значительной сложности, то разработка и формирование преобразователя плоскости поляризации является значительно более сложной задачей, так как собственные моды обыкновенных диэлектрических волноводов, применяемых в интегральной оптике, как правило, являются не связанными между собой линейно-поляризованными TE- и TM-модами.

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование принципа функционирования нового преобразователя плоскости поляризации, создание и экспериментальное исследование прототипа поляризационного преобразователя.

Известны различные приемы создания волноводных поляризационных преобразователей. Хорошо изучены способы электрооптического и акустооптического преобразований плоскости поляризации в интегрально-оптических волноводах, сформированных в кристалле ниобата лития [1]. Пассивные преобразователи поляризации могут быть созданы на основе волноводов в стекле с дополнительным слоем из анизотропного материала [2]. Волноводы, имеющие асимметричную форму поперечного сечения, также могут служить основой для создания поляризационных преобразователей [3]. Как правило, данные устройства требуют сложной прецизионной технологии для формирования волноводной структуры, и они очень чувствительны к технологическим допускам [4]. Таким образом, создание простого преобразователя поляризаций, совместимого с волоконными световодами, представляет собой актуальную задачу.

Недавно был предложен принцип создания пассивного поляризационного преобразователя в оптическом нановолноводе полосковой геометрии с применением эффекта биений волноводных мод [5]. Предлагалось использовать нановолноводы, полученные по технологии "кремний-на-изоляторе" ("silicon-on-insulator"). Настоящая работа представляет собой развитие этого принципа и его применение к другим конфигурациям волноводов больших линейных размеров с использованием для создания преобразователя более доступной и достаточно хорошо отработанной технологии ионного обмена в стекле.

Ранее нашей научной группой уже проводились работы в этом направлении [6—7], в которых указывалась возможность построения преобразователей поляризации с применением диэлектрических изотропных слоев и были созданы опытные образцы преобразователей, но физический механизм преобразования поляризации описан не был.

### Методика построения пассивного волноводного ТМ—ТЕ преобразователя

В работе [5] было показано, что у некоторых волноводов полосковой геометрии на основе тонкого наноразмерного слоя высокопреломляющего материала — кремния на подложке из оксида кремния с покровным слоем, показатель преломления которого должен значительно отличаться от показателя преломления подложки (использовался воздушный слой либо слой из нитрида кремния) при определенной ширине канала в области ~0,7...1 мкм существуют собственные гибридные моды. Гибридные моды обладают соразмерными по абсолютной величине поперечными компонентами магнитного поля —  $H_x$  и  $H_y$ , и электрического поля —  $E_x$  и  $E_v$ . Это дает возможность использовать такой волновод как преобразователь поляризаций оптического излучения. Линейно поляризованный свет, подаваемый на вход волновода определенной длины, будет возбуждать обе его гибридные моды, и за счет их взаимодействия направление поляризации излучения на выходе волновода изменится на 90°.

Можно развить данную теорию и предположить, что указанные поляризационные свойства высокопреломляющих пленок наноразмерной толщины каким-то образом влияют и на поляризационные свойства волноводов большего размера, в состав которых вводятся эти пленки. Был рассмотрен слабонаправляющий канальный интегрально-оптический волновод, сформированный в стекле, покрытый тонкой высокопреломляющей диэлектрической пленкой, показатель преломления которой значительно превышает показатель преломления и волноводного канала, и подложки. В качестве окружающей среды использовался воздух. Форма поперечного сечения волноводной структуры показана на рис. 1.

Параметры волновода соответствовали технологии его получения методом ионного обмена  $K^+ \leftrightarrow Na^+$  в стекле типа K-8 и были подобраны таким образом, чтобы волновод без покровной пленки был



Рис. 1. Форма поперечного сечения канального оптического волновода в стекле с дополнительной покровной пленкой

одномодовым. Показатель преломления положки  $n_1 = 1,5151$ , приращение показателя преломления в волноводном канале  $\Delta n = 0,0072$ , показатель преломления волновода  $n_2 = 1,5223$ . Для простоты расчетов использовался канал с прямоугольной формой поперечного сечения, т. е. со ступенчатым распределением показателя преломления. Ширина канала w = 3,75 мкм, толщина канала d = 2,5 мкм. Рабочая длина волны — 0,85 мкм. Выбор длины волны связан с удобством экспериментального исследования поляризационных характеристик такого волновода. В качестве высокопреломляющей пленки была использована пленка сульфида мышьяка  $As_2S_3$  с показателем преломления  $n_3$ , равным 2,4. Показатель преломления воздуха  $n_4$  равен 1.

В целях исследования возможности создания поляризационного преобразователя необходимо было провести полный векторный анализ мод волновода и определить пространственную структуру всех компонент электрического и магнитного полей. Расчет был проведен путем решения векторного волнового уравнения методом конечных разностей [8].

Сначала был проведен расчет модового состава волновода в стекле без пленки. Данный волновод поддерживает две моды ТЕ<sub>0</sub> и ТМ<sub>0</sub>, обе они являются линейно-поляризованными и ортогональными друг другу. Была построена характеристика зависимости эффективных показателей преломления мод  $N_{abb}$  (по мере их зарождения) от толщины высокопреломляющей пленки h в диапазоне толщин 0,036...0,052 мкм. График данной зависимости для различных мод приведен на рис. 2. Первые три моды волновода обозначены на графике как М1, М2 и М3. Мода М1 является линейно поляризованной во всем диапазоне расчетных толщин пленки, ее вектор напряженности электрического поля направлен вдоль оси х, вектор напряженности магнитного поля направлен вдоль оси у. Соответственно, данная мода является модой ТЕ<sub>0</sub>. Как видно из графика, для моды М2 и моды М3 существует область толщин пленки, в которой эффективные показатели преломления мод значительно сближаются. Эта часть рис. 2, а перенесена на рис. 2, б. Таким образом, из графика 2, б видно, что между мо-



Рис. 2. Зависимость эффективных показателей преломления мод волновода от толщины высокопреломляющей покровной пленки (*a*); увеличенная часть этой зависимости для мод M2 и M3 в области толщин пленки, соответствующей максимальному сближению их эффективных показателей преломления (б)



Рис. 3. Контурные графики распределения компонент магнитного поля  $H_x(a)$  и  $H_y(\delta)$  моды волновода М2



Рис. 4. Контурные графики распределения компонент магнитного поля  $H_x(a)$  и  $H_y(\delta)$  моды волновода МЗ



дой M2 и модой M3 при определенных толщинах пленки существует фазовый синхронизм. Мода М2 в диапазоне толщин пленки менее 0,045 мкм, т. е. до области сближения двух кривых на графике, является модой TM<sub>0</sub>, ее вектор напряженности электрического поля направлен вертикально вдоль оси у, а вектор магнитного поля — вдоль оси х. Однако эта же мода после прохождения области сближения кривых изменяет свою поляризацию и пространственную структуру поля и переходит в моду ТЕ<sub>1</sub>, которая поляризована так же, как мода М1, но имеет два максимума интенсивности поля в своем пространственном распределении по горизонтальной оси. Мода МЗ ведет себя аналогичным образом, до области сближения эффективных показателей преломления данная мода является линейно поляризованной модой TE<sub>1</sub>, а после этой области эта мода трансформируется в моду  $TM_0$ .

В области максимального сближения, в диапазоне толщины пленки 45...47 нм, обе моды М2 и М3 являются гибридными. и их поляризация не является линейной. На рис. 3 показаны контурные графики пространственного распределения поперечных компонент магнитного поля моды М2, а на рис. 4 моды МЗ при толщине пленки 46 нм. Поля мод практически идентичны, с той лишь разницей, что в месте максимума компоненты поля *H<sub>v</sub>* моды M2 находится минимум компоненты поля H<sub>v</sub> моды M3, и наоборот. Указанное отличие полей показано на рис. 3 и 4 с помощью знаков "+" и "-". Поляризации мод М2 и М3, представленные как векторные графики величины  $\{H_x, H_y\}$ , показаны на рис. 5. Как видно, поляризация магнитного поля моды М2 имеет круговой характер и направлена по часовой стрелке, поляризация моды МЗ имеет такой же вид, но направлена против часовой стрелки. Данная форма распределения является следствием их гибридного характера, т. е. поперечные компоненты магнитного поля соразмерны по абсолютной величине.



Рис. 6. Схема интегрального-оптического пассивного преобразователя поляризации оптического излучения

С использованием волновода, обладающего такими гибридными модами, несложно создать эффективное устройство для пассивного преобразования плоскости поляризации световой волны на 90°. Предлагаемая схема поляризационного преобразователя показана на рис. 6. Принцип работы преобразователя можно объяснить следующим образом. Предположим, что на вход волновода подается ТМ-поляризованное излучение, и вектор напряженности магнитного поля направлен горизонтально. Излучение возбуждает обе гибридные моды M2 и M3, которые при распространении интерферируют друг с другом. После прохождения определенного расстояния, равного половине длины биений мод, обе моды будут находиться в противофазе. Компоненты полей  $H_x$  обеих мод взаимно компенсируют друг друга, их суперпозиция в любой точке поперечного сечения волновода близка к нулю.

Но совсем иная ситуация складывается с компонентами магнитного поля  $H_y$  мод M2 и M3. При той же длине волновода особенности пространственного распределения компонент поля  $H_y$  этих двух мод (см. рис. 3,  $\delta$  и рис. 4,  $\delta$ ) приведут к тому, что их интерференция в любой точке поперечного сечения волновода будет конструктивной, и *y*-компонента поля от моды M2 будет усиливать *y*-компоненту поля от моды M3. Следовательно, на выходе волновода будет наблюдаться оптическое излучение от моды TE<sub>1</sub>, в котором вектор напряженности магнитного поля расположен вертикально.

Значение половины длины биений  $L_{\pi}$ , необходимое для преобразования плоскости поляризации входной световой волны на 90°, можно определить по известной общей формуле, описывающей биения волн [9]:

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{k_0 \left( N_{3 \phi \phi}^{\text{M2}} - N_{3 \phi \phi}^{\text{M3}} \right)},$$

где  $N_{3\phi\phi}^{M2}$  и  $N_{3\phi\phi}^{M3}$  — эффективные показатели преломления гибридных мод M2 и M3 соответственно;  $k_0$  — волновое число. При толщине пленки 46 нм, взятой из области максимального сближения кривых волноводной характеристики (см. рис. 2,  $\delta$ ), и при длине волны 0,85 мкм величина  $L_{\pi}$  составляет 4,37 мм.

Детальный расчет параметров поляризационного преобразователя с отслеживанием изменения состояния поляризации по сфере Пуанкаре, его оптимизация и оценка допусков на технологические параметры требуют проведения масштабных вычислений. В настоящей работе, в ее теоретической части, было решено ограничиться обоснованием предложенного принципа преобразования поляризаций. О результатах более подробных исследований преобразователя будет сообщено дополнительно.

Поворот плоскости поляризации в новом устройстве сопровождается преобразованием фундаментальной моды ТМ<sub>0</sub> в моду первого порядка ТЕ<sub>1</sub>. Для большинства практических применений необходимы преобразователи моды ТМ<sub>0</sub> в моду ТЕ<sub>0</sub>. Поэтому предлагаемый преобразователь нужно дополнить некоторым оптическим устройством, которое будет располагаться на его выходе и осуществлять конверсию моды первого порядка TE<sub>1</sub> в фундаментальную моду TE<sub>0</sub>. В самом простом случае это может быть оптический У-разветвитель, у которого входной волновод обеспечивает распространение моды ТЕ<sub>1</sub>, а выходные волноводы должны быть одномодовыми. В этом случае у преобразователя будут два выхода с модами ТЕ<sub>0</sub>. Если необходим только один выход с модой TE<sub>0</sub>, то для преобразования TE<sub>1</sub> → TE<sub>0</sub> можно использовать асимметричный волноводный интерферометр Маха-Цендера со сдвигом фаз волн между плечами, равным  $\pi$ . Для преобразования  $TE_1 \rightarrow TE_0$  возможно также использование элементов направленной связи с применением волноводов с различными параметрами.

## Экспериментальное исследование образцов ТМ-ТЕ преобразователя

Было проведено экспериментальное исследование в целях подтверждения предложенного принципа преобразования поляризаций и изготовления устройства, которое будет являться прототипом преобразователей нового типа. Основная слож-

ность при построении преобразователя заключалась в необходимости точного подбора толщины высокопреломляющей пленки, при которой обеспечивается фазовый синхронизм и взаимодействие гибридных мод. Исходя из доступной технологической базы стеклянные волноводы были изготовлены с покровной высокопреломляющей тонкой пленкой переменной толщины, которая располагалась клином вдоль волноводов. В этом случае, проводя эксперименты с различными клинообразно нанесенными на волноводы пленками, можно было ожидать, что прогнозируемый эффект преобразования поляризаций себя проявит. В пределах некоторого расстояния вдоль волновода должен существовать интервал толщин пленки, при которых происходит эффективное взаимодействие гибридных мод и поворот плоскости поляризации.

В подложках оптического стекла K-8 были сформированы канальные волноводы путем ионного обмена K<sup>+</sup>  $\leftrightarrow$  Na<sup>+</sup> из расплава соли KNO<sub>3</sub> при 380 °C. Время диффузии составляло 85 мин, при котором волноводы на длине волны 0,85 мкм были одномодовыми, т. е. поддерживали одну TE<sub>0</sub>-моду и одну TM<sub>0</sub>-моду. Ширина щели в маске фотошаблона составляла 2 мкм. На поверхность подложки клином вдоль волноводов методом термоваккуумного напыления наносилась пленка A<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. Контроль толщины пленки осуществлялся в процессе ее нанесения интерференционным методом.

Исследования поляризационных характеристик предложенных преобразователей проводили на специальном стенде, где можно было осуществлять торцевые ввод и вывод излучения из волновода. Была проведена серия исследований образцов с пленками, имеющими различную крутизну клина в целях подбора параметров последнего для поиска эффекта преобразования поляризации излучения. Было установлено, что у образцов, имеющих начальную толщину пленки 0,03 мкм на одном краю волноводов и максимальную толщину 0,055 мкм на противоположном краю, при длине пленки 20 мм наблюдается предсказанный эффект поворота плоскости поляризации. Входной отполированный торец волновода освещался ТМполяризованным излучением, а излучение выходного торца было преимущественно ТЕ-поляризованным, причем на выходе волновода присутствовала мода TE<sub>1</sub>.

Эффективность преобразования поляризаций была определена по формуле

$$\eta = \frac{I_{\rm TE}}{I_{\rm TE} + I_{\rm TM}} \cdot 100 \ \%,$$

где  $I_{\text{TE}}$  и  $I_{\text{TM}}$  — интенсивности TE- и TM-поляризованных излучений на выходе преобразователя, измеряемые с помощью фотоприемного устройства. Для образцов преобразователей с указанными параметрами эффективность преобразования поляризаций составляла 95 %.

### Заключение

Таким образом, предложена, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена методика формирования пассивного преобразователя плоскости поляризации в слабонаправляющем волноводе, сформированном в стекле, с покровной пленкой из высокопреломляющего диэлектрического изотропного материала.

### Список литературы

1. Sohler W., Hu H., Ricken R., Quiring V. Integrated optical devices in lithium niobate // Optics and Photonics News. 2008. Vol. 19, N 1. P. 24–31.

2. Wang T. J., Cheng Y. C. Integrated-optic polarization rotator with obliquely deposited columnar thin film // Optics Express. 2012. Vol. 20, N 1. P. 601-606.

3. **Tzolov V. P., Fontaine M.** A passive polarization converter free of longitudinally-periodic structure // Optics Communications. 1996. Vol. 127, N 1–3. P. 7–13.

4. Van der Tol J. J. G. M., Felicetti M., Smit M. K. Increasing tolerance in passive integrated optical polarization converters // J. Lightwave Technology. 2012. Vol. 30, N 17. P. 2884–2889.

5. **Dai D., Bowers J. E.** Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires // Optics Express. 2011. Vol. 19, N 11. P. 10940–10949.

6. Воеводин А. А., Гладкий В. П., Яковенко Н. А. Патент РФ 2046389. Волноводный управляемый преобразователь оптических мод. Заявл. 02.08.1989. Опубл. 20.10.1995.

7. Воеводин А. А., Гладкий В. П., Прохорова И. А., Яковенко Н. А. О возможности создания новых интегральнооптических поляризаторов и преобразователей волноводных мод // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 24. С. 73—77.

8. Lüsse P., Stuwe P., Schüle J., Unger H. G. Analysis of vectorial mode fields in optical waveguides by a new finite difference method // J. Lightwave Technology. 1994. Vol. 12. P. 487(494.

9. Тамир Т. Волноводная оптоэлектроника. М.: Мир, 1991. 575 с.

## Материаловедческие и технологические основы МНСТ

УДК 539.2

- **М. И. Самойлович**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб.,
- А. Б. Ринкевич<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук, зам. дир-ра,
- **В. Бовтун**<sup>3</sup>, Dr. Sc., вед. науч. сотр.,
- А. Ф. Белянин<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., зав. лаб.,
- **М. Кемпа<sup>3</sup>**, Dr. Sc., зав. лаб.,
- **Д. Нужный**<sup>3</sup>, Dr. Sc., ст. науч. сотр.,

**С. М. Клещева**<sup>1</sup>, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотр.,

**М. Савинов**<sup>3</sup>, Dr. Sc., ст. науч. сотр.,

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский технологический институт "Техномаш",

- г. Москва, e-mail: samoylovich@technomash.ru
- <sup>2</sup> Институт физики металлов УрО РАН,
- г. Екатеринбург

<sup>3</sup> Институт физики АН ЧР, г. Прага, Чешская республика

## ОПТИЧЕСКИЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ С ЗАПОЛНЕНИЕМ МЕЖСФЕРИЧЕСКИХ НАНОПОЛОСТЕЙ ЭВЛИТИНОМ (Bi<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)

### Поступила в редакцию 21.05.2013

Изучены состав, строение и свойства образцов нанокомпозитов на основе решетчатых упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> (опаловых матриц), содержащих в межсферических нанополостях кластеры кристаллической фазы эвлитина  $(Bi_4(SiO_4)_3)$ .

**Ключевые слова:** нанокомпозиты, опаловые матрицы, эвлитин, рентгенофазовый анализ, спектроскопия *КР*, диэлектрические характеристики

### Введение

Трехмерные (3D) структуры на основе решетчатых упаковок наносфер рентгеноаморфного кремнезема (SiO<sub>2</sub>) (центры наносфер образуют гранецентрированную кубическую решетку) — опаловые матрицы, межсферические нанополости которых частично заполнены различными веществами, являются одним из новых типов метаматериалов. Опаловые матрицы представляют собой упаковки близких по диаметру ( $\Delta d < 5 \%$ ) наносфер SiO<sub>2</sub>, размеры которых, в зависимости от условий формирования, могут варьироваться от 200 до 400 нм [1]. Имеются основания предполагать появление разработок различных устройств электронной техники с улучшенными эксплуатационными характеристиками с использованием подобных материалов [2].

Ранее были исследованы строение и свойства опаловых матриц, в межсферических нанополостях которых были синтезированы металлы (Ni, Co, Fe, Pd) [3]; Ni—Zn- и Mn—Zn-ферриты [4]; оксиды металлов [5]; титанаты типа  $R_2Ti_2O_7$  или  $R_2TiO_5$ , где R — Yb, Tb, Er, La, Dy, Pr, Gd и Nd [6, 7]; манганиты типа RMnO<sub>3</sub> или RMn<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, где R: — Yb, Tb, Er, La, Y, Gd, Nd и Bi [4, 8]; мультиферроики ферротороидального типа упорядочения (LiCoPO<sub>4</sub>, LiNiPO<sub>4</sub>, LiCuO<sub>2</sub>, InFeO<sub>3</sub>, InMnO<sub>3</sub>) [7, 9]; пьезо- и сегнетоэлектрические материалы (ZnO, BaTiO<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, PbTiO<sub>3</sub>) [7, 10].

В настоящей работе проведено исследование состава, оптических и диэлектрических свойств нанокомпозитов на основе опаловых матриц, в межсферических нанополостях которых синтезированы частицы кристаллического ортосиликата висмута — эвлитина (Bi<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>). Эвлитин наиболее распространенный электрооптический материал. характеризующийся способностью менять свои оптические свойства под действием электрических полей, что можно использовать при передаче или преобразовании света различных участков спектрального диапазона. Цель работы — получение и изучение взаимосвязи структурных особенностей с оптическими и электрическими свойствами нанокомпозитов на основе опаловых матриц, нанополости которых заполнены кристаллитами эвлитина. Кристаллическая структура эвлитина относится к ортосиликатам, где атомы Ві имеют зонтичную координацию с тремя концевыми атомами кремнекислородных тетраэдров. В основу структурной систематики силикатов положено строение анионных группировок — способ сочленения между собой элементарных звеньев — правильных кремнекислородных тетраэдров  $SiO_4^{4-}$  в бесконечные трехмерные группировки.

## Получение нанокомпозитов на основе опаловых матриц

Образцы опаловых матриц с диаметрами наносфер SiO<sub>2</sub> от 200 до 350 нм получали по известной методике [1]. Были изготовлены решетчатые 3Dупаковки наносфер SiO<sub>2</sub> объемом до 2...3 см<sup>3</sup> с размерами монодоменных областей до 0,1 мм<sup>3</sup> и однородностью по диаметрам наносфер не хуже 3-5 % (рис. 1, а, растровый электронный микроскоп (РЭМ) CARL ZEISS LEO 1430 VP). Применение специально разработанных методик упрочнения опаловых матриц позволило проводить их механическую обработку с получением необходимых форм и размеров, а также шероховатости поверхностей. Образующиеся в плотнейшей упаковке наносфер SiO<sub>2</sub> межсферические тетраэдрические и октаэдрические полости размером от 50 до 150 нм для указанных диаметров *d* наносфер заполняли эвлитином. Трудность создания трехмерной решетки для введенного в межсферические полости вещества связана с небольшими размерами (~0.3*d*) каналов, связывающих межсферические полости (рис. 1, б). Метод пропитки оказался наиболее эффективным для введения растворов в межсферические нанополости и последующего синтеза в них эвлитина.

Нанокомпозиты на основе опаловых матриц, содержащих Bi<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, формировали в два этапа. На первом этапе получали Ві2O3 многократной пропиткой опаловых матриц водным раствором нитратов Bi  $(Bi(NO_3)_3)$  и, в отдельных случаях, добавляли Fe (Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) с последующей термической обработкой при ~400 °C, в результате которой происходит частичное термическое разложение вводимых соединений и полностью удаляется неструктурная вода. На втором этапе проводили термообработку при 700...900 °С, при которой взаимодействие оксидов Si и Bi приводит к образованию одной Bi<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> или двух силикатных фаз висмута  $(Bi_4(SiO_4)_3 и Bi_2O_2SiO_3)$ . Межсферические полости были заполнены Ві<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> на 20...40 %, что требовало проведения до 20 циклов пропитки и отжига при ~400 °C.



Рис. 1. Строение (РЭМ) поверхности формирования опаловой матрицы — решетчатая упаковка наносфер SiO<sub>2</sub> (*a*); объемная модель вещества, заполнившего межсферические нанополости и соединяющие их каналы (наносферы SiO<sub>2</sub> удалены) (б)

Таким образом, синтез эвлитина протекает с последовательным образованием оксида висмута и его взаимодействием с SiO<sub>2</sub>. Единственный устойчивый при нагревании на воздухе сесквиоксид висмута  $Bi_2O_3$  (известны также BiO,  $BiO_2$ ,  $Bi_2O_5$ ,  $Bi_2O$ ,  $Bi_6O_7$  и  $Bi_8O_{11}$ ) имеет две стабильные ( $\alpha$ - $Bi_2O_3$ ) (ромбическая сингония, пространственная группа  $P2_1/c$ ) и  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (кубическая сингония, Pn  $\overline{3}$  m)) и две метастабильные (β-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (тетрагональная сингония, I4/mm) и γ-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (кубическая сингония, I23)) модификации. Полиморфные превращения Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сопровождаются выделением или поглощением О2 с образованием соединений δ-Bi<sub>2</sub>O<sub>3-x</sub> (нагрев до ~727 °C) или ү-Ві<sub>2</sub>О<sub>3 + х</sub> (охлаждение до ~635 °C). Наличие SiO<sub>2</sub> аналогично влиянию избытка O<sub>2</sub> и при охлаждении образуется силикосилленит (Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>) и эвлитин (Bi<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>).

### Методика исследования

Состав полученных нанокомпозитов контролировали рентгеновской дифрактометрией и спектроскопией комбинационного рассеяния (КР). Для идентификации кристаллических фаз синтезированных соединений применяли рентгеновский дифрактометр ARL X'tra (Thermo Fisher Scientific), (Cu К $\alpha$ -излучение,  $\lambda = 0,154178$  нм, энергодисперсионный твердотельный детектор с охладителем Пельтье, графитовый монохроматор, без вращения образца, с шагом 0,01°, непрерывный режим 1°/мин). Анализ рентгенограмм проведен с использованием автоматизированной базы данных ICDD PDF-2. Спектры КР регистрировали с использованием лазерного (линия 632,8 нм Не-Ne лазера) микрорамановского спектрометра LabRAM HR800 (HORIBA Jobin-Yvon). Измерения полос отражения в оптическом диапазоне проводили с использованием спектрофотометра UV-3600 (Shimadzu).

Измерения компонент диэлектрической проницаемости в диапазоне высоких частот  $(1 \cdot 10^6...1, 8 \cdot 10^9 \ \Gamma u)$  были проведены с использованием диэлектрического спектрометра с коаксиальной измерительной ячейкой Novocontrol BDS 2100 и импедансным анализатором Agilent 4291B.

Измерительное оборудование фирмы Agilent включало компоненты для измерения диэлектрической и магнитной проницаемости, включая потери, в диапазоне 10 МГц... 110 ГГц; *S*-параметров (отражения, поглощения и пропускания) материалов на двух длинах волн — 1,3 мкм и 1,5 (с шириной полосы до 60 ГГц), а также фазовой и групповой скоростей распространения электромагнитных волн в указанном диапазоне. В микроволновой области  $(2 \cdot 10^8... 2 \cdot 10^{10}$  Гц) измерения проводили методом коаксиального зонда с открытым концом (Agilent 8507E), для чего использовали сетевой анализатор Agilent E8364B, в терагерцовой области — методом трансмиссионной терагерцовой спектроскопии с использованием фемтосекундной Ti-сапфировой лазерной системы. Измерения частотных зависимостей *S*-параметров для полученных образцов проводили с использованием рупорных антенн и системы параметрического анализа N5260C (Agilent Technologies). Коаксиальные измерения  $(1 \cdot 10^6...1, 8 \cdot 10^9 \Gamma$ ц) проводили на образцах в форме

(г то ...., в то гн) проводили на ос цилиндров (диаметр 3 мм, высота 4...5 мм), все остальные измерения проведены на образцах в форме пластин размерами 10 × 10 мм и толщиной 1...3 мм. Оценку параметров микроволновой проводимости ( $\sigma'$ ), действительной ( $\varepsilon'$ ) и мнимой ( $\varepsilon''$ ) компонент диэлектрической проницаемости проводили с использованием подпрограммы superlattice0000\_04\_my.m.

### Фазовый состав и структурные особенности полученных нанокомпозитов

Одна из основных проблем получения метаматериалов на основе дисперсных сред состоит в отсутствии данных о поведении рентгеноаморфных и кристаллических фаз исследуемых веществ в нанополостях опаловых матриц при различных температурах и концентрациях. Были определены области устойчивой кристаллизации (по условиям термообработки), температурные диапазоны начала взаимодействия Ві<sub>2</sub>О<sub>3</sub> с рентгеноаморфным кремнеземом с образованием силикатов. На рис. 2 и 3 показано изменение состава полученных соединений в зависимости от температуры синтеза в области 800...900 °С. Концентрация кристаллической фазы эвлитина  $(Bi_4(SiO_4)_3, кубическая сингония,$ I 4 3d) увеличивается при температуре свыше 800 °C. Помимо  $Bi_4(SiO_4)_3$ установлено наличие δ-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; β-Ві<sub>2</sub>О<sub>3</sub> (рис. 2, кривая 1); Ві<sub>2</sub>О<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (орторомбическая сингония, Cmc2<sub>1</sub>) (рис. 2, кривая 1); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ромбоэдрическая сингония,  $\overline{R}$   $\overline{3}$  с) (рис. 2, кривая 1; рис. 4).

В ряде случаев при высокотемпературном отжиге происходит рекристаллизация в небольших объемах рентгеноаморфного кремнезема с образованием кристаллических фаз  $SiO_2$  (кубическая сингония,  $P2_13$ ) и  $SiO_2$  (кристобалит, тетрагональная сингония,  $P4_12_12$ ) (рис. 2, кривая 2; рис. 3). Присутствие  $Fe_2O_3$  повышает температуру начала кристаллизации эвлитина.

Кристаллизация  $SiO_2$  и образование силикатов металлов, таких как  $Bi_2O_2SiO_3$ , осложняет подбор концентраций пропитывающих растворов для синтеза необходимых составов. Фаза эвлитина синтезирована в образцах опаловых матриц при температуре отжига 800 °С и выше (рис. 2—4) и ее концентрация увеличивается с ростом температуры,







Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы (Си kα излучение) образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых заполнены кластерами соединений на основе Bi. Температура синтеза: 800 °C (кривая 1) и 900 °C (кривая 2)



Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма (Си  $k\alpha$ -излучение) образца опаловой матрицы, межсферические нанополости которой заполнены кластерами соединений на основе Ві и Fe. Температура синтеза 900 °С

при этом активизируется процесс рекристаллизации SiO<sub>2</sub> (см. рис. 2, кривая 2; рис. 4) и прекращается формирование фаз  $Bi_2O_3$  и  $Bi_2O_2SiO_3$  для образцов, полученных пропиткой растворами Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> и Bi(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.

Измеренный по рентгеновским дифрактограммам (отражение (211)) период решетки эвлитина изменялся в пределах a = 1,0309...1,0428 нм в зависимости от условий синтеза. Размер кристаллитов (областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения, L<sub>ОКР</sub>) эвлитина, рассчитанный по уширению на дифрактограммах отражений, изменялся в пределах 20-78 нм. Отсутствие расщепления дублетов рефлексов эвлитина указывает на механическую напряженность сформированного материала. Напряженность увеличивается с увеличением температуры синтеза, о чем свидетельствует непрерывное увеличение периода решетки с ростом температуры от 800 до 900 °С в пределах от 1,0426 до 1,0428 нм при использовании пропитывающих растворов Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> и Bi(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (L<sub>OKP</sub> при этом уменьшается от 67 до 20 нм) и от 1,0309 до 1,0318 нм при использовании только раствора  $Bi(NO_3)_3$  ( $L_{OKP}$  остается неизменным ~36 нм). Период решетки δ-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> уменьшался от 0,5340 до 0,5329 нм с увеличением температуры синтеза от 700 до 800 °С (при 900 °С кристаллического Ві<sub>2</sub>О<sub>3</sub> не обнаружено). Образующийся при 800 °С и некоторых условиях синтеза β-Ві<sub>2</sub>О<sub>3</sub> имеет параметры решетки a = 0,3814 нм, c = 1,1385 нм, существенно отличающиеся от теоретических. Взаимодействие Ві<sub>2</sub>О<sub>3</sub> с SiO<sub>2</sub> приводит к частичному изменению формы наносфер [5, 11].

Степень кристалличности (содержание кристаллической фазы в объеме синтезированного вещества) зависит от условий термообработки и в ряде случаев превышает 90 об. %. Было установлено, что  $L_{\rm OKP}$  кристаллических фаз, не зависит от сте-

пени кристалличности синтезированного вещества. Кристаллиты большинства синтезированных веществ имели форму, близкую к равноосной. Следует отметить, что рентгеновская дифрактометрия дает информацию только о кристаллических фазах ( $L_{\rm OKP} > 1$  нм), но не чувствительна к фазам с  $L_{\rm OKP} < 1$  нм, которые сохраняют функциональные свойства синтезируемых материалов. Поэтому помимо рентгенофазового анализа проводили исследование полученных материалов спектроскопией КР.

### Оптические характеристики

Спектры КР для серии нанокомпозитов, содержащих синтезированные материалы в виде смеси рентгеноаморфных и кристаллических фаз

Ві<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Ві<sub>2</sub>O<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Ві<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> (три модификации), представлены на рис. 5 и 6. При синтезе эвлитина с использованием растворов нитратов Ві и F формируется Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (полосы на частотах 235,2, 301,4 и 418,9 см<sup>-1</sup>). Вид спектров KP образцов, сформированных при различных условиях, отличается в зависимости от изменения состава и концентрации кристаллических и аморфных фаз веществ, заполняющих межсферические нанополости.



Рис. 5. Спектры КР образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых заполнены кластерами соединений на основе Ві (в основном  $Bi_4(SiO_4)_3$ ). Температура отжига образцов 800 °C (кривая 1); 900 °C (кривая 2)



Рис. 6. Спектры КР образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых заполнены кластерами соединений на основе Ві и Fe  $(a; \delta, кривая 2)$  и только Ві (в основном Ві<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) ( $\delta$ , кривая 1). Образцы получены при температуре отжига 900 °C



Рис. 7. Спектры отражения образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых заполнены кластерами соединений:

*а* — на основе Ві и Fe (температура синтеза 900 °C);  $\delta$  — только Ві (в основном Ві<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) (800 °C (кривые *1*, *2* — различные концентрации исходных растворов); 900 °C (кривые *3*, *4* — различные концентрации исходных растворов))

Интенсивность пиков на спектрах КР, сформированных при одинаковых параметрах процесса, зависела от концентрации кристаллических фаз.

Особенности спектров КР полученных образцов обусловлены различием фазового состава, выявляемого рентгеновской дифрактометрией. На стадии аморфизации происходит существенное уширение пиков и смещение максимумов в сторону низких частот, при этом полосы аморфных фаз могут уменьшаться или полностью исчезать. Спектры отражения для полученных образцов с выраженной фотонной зоной представлены на рис. 7.

### Электрофизические характеристики сформированных нанокомпозитов и особенности прохождения электромагнитных волн в диапазоне до 10 ТГц

Были проведены исследования проводимости, а также реальной ( $\varepsilon'$ ) и мнимой ( $\varepsilon''$ ) компонент диэлектрической проницаемости: для опаловых матриц с введенными в межсферические нанополости кластеров Bi<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> с размерами 20...78 нм, для которых диэлектрические спектры и спектры проводимости были изучены в широком диапазоне частот от 1 МГц до 2 ТГц. Диэлектрические характеристики в указанном диапазоне частот приведены на рис. 8.

Низкочастотные измерения (до 0,1 Гц) показали наличие диэлектрической дисперсии  $(\varepsilon = 25 \text{ на } 0, 1 \text{ Гц})$  и дисперсии проводимости во всем диапазоне частот (рис. 8, а). Потери и проводимость на высоких частотах мало отличаются от параметров незаполненных матриц (рис. 8, б). Сквозная проводимость, а следовательно, проперколированные проводящие кластеры, отсутствуют. Все образцы подобны судя по микроволновым свойствам, но несколько отличаются значениями величины ε, а именно, соответствуют комдиэлектрик-диэлекпозитам трик с релаксационной поляризацией вследствие неоднородности системы.

На высоких частотах нелинейность практически не видна, но на 1 Гц заметно снижение є' при увеличении напряжения постоянного электрического поля (рис. 9). Результаты измерения частотных зависимостей S-параметров для полуредставлены на рис. 10

ченных образцов представлены на рис. 10.

Отметим, что измерения одинаковых образцов различными методами и на различном оборудовании дают близкие (по величинам, описывающим эффекты прохождения, поглощения и отражения электромагнитных волн для соответствующих диапазонов частот) значения. Указанные данные могут служить не только подтверждением воспроизводимости условий и результатов при получении образцов, но и подтверждают целесообразность выбранных направлений экспериментальной части работы.

Введение кластеров  $Bi_4(SiO_4)_3$  приводит к повышению є' опаловых матриц на 40...200 % (1...5 единиц), но не влияет на диэлектрические потери, остающиеся низкими (є'' < 0,1) практически во всем использованном диапазоне частот. Отметим, что наблюдается небольшое повышение диэлектрических потерь в области низких (10<sup>6</sup> Гц) и их рост в диапазоне высоких (10<sup>10</sup>...10<sup>12</sup> Гц) частот. В первом случае указанное повышение можно объяснить присутствием некоторого количества



#### Рис. 8. Частотные зависимости:

a — микроволновой удельной проводимости;  $\delta$ , e — действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) компонент диэлектрической проницаемости нанокомпозитов — опаловая матрица (кривая 1) и опаловых матриц, межсферические нанополости которых частично заполнены кластерами Bi<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Температура отжига образцов: 700 °C (кривая 2); 800 °C (кривая 3); 900 °C (кривая 4)





Частоты: 1 Гц (кривая 1), 10 Гц (кривая 2), 1 кГц (кривая 3) и 100 кГц (кривая 4)

воды в нанополостях опаловой матрицы. Тогда как возрастание потерь в терагерцовой области имеет более фундаментальный характер и, очевидно, обусловлено низкочастотным крылом фононного спектра вводимых соединений.

Повышенные значения диэлектрической проницаемости опаловых матриц, заполненных кластерами  $Bi_4(SiO_4)_3$ , при обеспечении низких потерь в микроволновом диапазоне объясняют интерес к исследованным композитам. Действительно, для получения метаматериала необходимо обеспечить не только высокие значения ε', но и малое значение є" (поглощение) в заданном диапазоне частот, соответствующие измерения коэффициентов прохождения и отражения для диапазона частот 26...38 ГГц в волноводной системе при нулевом



Рис. 10. Частотные зависимости реальной S' (a) и мнимой S'' (б) компонент параметров |S| для образца опаловой матрицы, межсферические нанополости которой содержат кластеры эвлитина в пересчете на прямые потери  $|R_{21}| = |R_{12}|$  (кривая 1) и на отражение  $|R_{22}|$  (кривая 2)



Рис. 11. Частотные зависимости амплитуд коэффициентов прохождения (кривые 1, 2) и отражения (3, 4) образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых содержат кластеры:

 $a - \text{Bi}_4(\text{SiO}_4)_3 + \text{FeO}; \delta - \text{Bi}_4(\text{SiO}_4)_3$ . (Теоретические значения (кривые 1, 3), экспериментальные значения (кривые 2, 4))



Рис. 12. Частотные зависимости амплитуд коэффициентов прохождения (кривые 1, 2) и отражения (кривые 3, 4) образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых содержат кластеры  $Bi_4(SiO_4)_3$ ), (теоретические значения (кривые 1, 3) и экспериментальные значения (кривые 2, 4)). Температура отжига образцов: a - 800 °C;  $\delta - 900$  °C

магнитном поле приведены на рис. 11 и 12 (толщина образцов 1,9 мм). Образец, полученный при 800 °С (рис. 12, *a*), содержит фазы  $Bi_2O_2SiO_3$  и  $Bi_4(SiO_4)_3$ . Все измерения проведены на образцах без нанесения электродов.

Оценки параметров по соотношению  $\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon''$ 

$$= = \varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$$
 показали следующие значения:

ε' = 2,6376, ε'' = 0,0797, σ = 0,1403 Cm/m (cm. puc. 11, *a*); ε' = 2,2625, ε'' = 0,0430, σ = 0,0757 Cm/m (cm. puc. 11, *δ*); ε' = 2,3028, ε'' = 0,0173, σ = 0,0305 Cm/m (рис. 12, *a*) и ε' = 2,4115, ε'' = 0,0817, σ = 0,1438 См/м (рис. 12, *б*).

### Заключение

Были получены образцы решетчатых упаковок наносфер кремнезема с заполнением межсферических нанополостей (как упорядоченных 3D-нанорешеток) кластерами (кристаллитами) эвлитина  $(L_{OKP} = 20...78$  нм). Изучены особенности кристаллизации и фазовых превращений в межсферических нанополостях опаловых матриц для силикатов Bi, а также оптические и диэлектрические

свойства таких 3D-нанокомпозитов на основе опаловых матриц. Проведенное изучение структурных особенностей, состава и диэлектрических свойств для разрабатываемых метаматериалов на основе опаловых матриц с введением в межсферические нанополости электрически активного эвлитина позволило получить данные, необходимые для разработки физико-технических основ получения и применения некристаллических пространственно неоднородных материалов с модуляцией (дисперсией) электрических и диэлектрических параметров в нанодиапазоне.

Высокие значения диэлектрической проницаемости решетчатых упаковок наносфер кремнезема, заполненных кристаллитами  $Bi_4(SiO_4)_3$ , при сохранении низких потерь в микроволновом диапазоне объясняет повышенный интерес к исследованным композитам, поскольку для получения метаматериала необходимо обеспечить не только высокие значения  $\varepsilon'$ , но и малое значение  $\varepsilon''$  (поглощение) в заданном диапазоне частот.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 12-07-12030-офи м).

### Список литературы

1. Наноматериалы. III. Фотонные кристаллы и наноком-позиты на основе опаловых матриц / Ред. М. И. Самойлович. М.: Техномаш, 2007. 303 с.

2. Kong J. A. Electromagnetic wave interaction with stratified

 1. Конд Э. А. Electromagnetic wave interaction with strainfed negative isotropic media // Progress In Electromagnetics Research, PIER. 2002. V. 35. P. 1–52.
 3. Ринкевич А. Б., Бурханов А. М., Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Кузнецов Е. А. 3D-нано-композитные металлодиэлектрические материалы на осно-композитные металлодиэлектрические материалы на основе опаловых матриц // Российский химический журнал. 2012. Т. LVI, № 1-2. С. 26-35.

4. Ринкевич А. Б., Устинов В. В., Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Кузнецов Е. А. Нанокомпозиты на основе опаловых матриц с 3D-структурой, образованной магнитными наночастицами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 4. С. 55–63.

5. Самойлович М. И., Бовтун В., Ринкевич А. Б., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Кемпа М., Нужный Д. Пространственно-неоднородные материалы на основе решетча-тых упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> // Инженерная физика. 2010. № 6. C. 29–38.

6. Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Беля-нин А. Ф., Нужный Д., Кемпа М., Цветков М. Ю., Кле-щева С. М. Оптические, магнитные и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических

полостей титанатами редкоземельных элементов // Нано-инженерия. 2012. № 9. С. 34—39. 7. Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Беля-нин А. Ф., Кемпа М., Нужный Д., Цветков М. Ю., Кле-щева С. М. Оптические, магнитные и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей кристаллическими мультиферроиками, пьезоэлектриче-

скими и сегнетоэлектрическими материалами // Российский химический журнал. 2012. Т. LVI. № 1–2. С. 11–25. 8. Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Беля-нин А. Ф., Кемпа М., Нужный Д., Цветков М. Ю., Кле-щева С. М. Оптические, магнитные и диэлектрические спойства опарация магнитные и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей редкоземельными манганитами // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 10. С. 31—36. 9. Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Беля-нин А. Ф., Нужный Д., Кемпа М., Цветков М. Ю., Кле-

щева С. М. Оптические, магнитные и диэлектрические свойства нанокомпозитов на основе опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей кристаллическими ферротороидальными мультиферроиками // Наноинженерия. 2012. № 10. С. 18-26.

10. Самойлович М. И., Бовтун В., Белянин А. Ф., Цвет-ков М. Ю., Клещева С. М. Измерения диэлектрической проницаемости и распространение электромагнитных волн в пространственно неоднородных средах // Инженерная физика. 2011. № 9. С. 3—14.

11. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М. Фа-зовые превращения кремнезема в межсферических нанополостях опаловых матриц // Российский химический жур-нал. 2012. Т. LVI. № 3-4. С. 155-162.

### УДК 537.621.2; 538.975

**А. Ф. Вяткин**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф, зам. директора, e-mail: vyatkin@iptm.ru,

**В. Н. Матвеев**<sup>1</sup>, канд. тех. наук, зав. лаб.,

**В. Т. Волков**<sup>1</sup>, ст. науч. сотр.,

**О. В. Кононенко**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук,

ст. науч. сотр.,

**В. И. Левашов**<sup>1</sup>, ст. науч. сотр.,

**В. Г. Ерёменко**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,

**В. В. Амеличев**<sup>2</sup>, канд. тех. наук, нач. отдела,

**Д. В. Костюк**<sup>2</sup>, нач. лаб.,

**И. И. Ходос**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф, зав. лаб.,

1 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, ИПТМ РАН, Черноголовка,

<sup>2</sup> НПК "Технологический центр", Зеленоград

### МНОГОСЛОЙНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ **C ЭΦΦΕΚΤΟΜ ΓИΓΑΗΤCΚΟΓΟ** МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

### Поступила в редакцию 21.05.2013

Квантово-механический эффект гигантского магнетосопротивления (ГМС) наблюдался в целом ряде многослойных магнитных материалов. Многослойные структуры, в которых проявляется данный эффект, состоят из последовательно осажденных тонких ферромагнитных слоев, разделенных проводящим немагнитным слоем. Магнитные характеристики таких материалов зависят от структуры осажденных слоев, состояния межфазных границ между слоями и в значительной степени от немагнитного слоя, толщина которого требует высокой точности. С помощью электронно-лучевого и лазерного осаждения, просвечивающей электронной микроскопии и атомносиловой микроскопии были получены и исследованы структуры Та-NiFe-Cu-Co-FeMn-Ta. При оптимизации толщины медного разделительного слоя удалось поднять значение ГМС до 5 % в продольном поле 10...20 Э.

Ключевые слова: многослойные наноструктуры, эффект гигантского магнетосопротивления

### Введение

Квантово-механический эффект гигантского магнетосопротивления (ГМС) наблюдался в целом ряде многослойных магнитных материалов [1, 2]. Первым наиболее успешным и значительным коммерческим применением этого эффекта было его использование в спин-вентильных магниторезистивных сенсорах [3, 4], предназначенных для считывания информации, хранящейся на жестких дисках. Именно такие структуры положили начало практическому использованию нового направления исследований — спинтронике.

Многослойные пленки, в которых наблюдается эффект ГМС, состоят из последовательности ферромагнитных слоев нанометровой толщины и проводящего немагнитного слоя. Для изготовления приборов на основе эффекта ГМС с требуемыми характеристиками важно выявление зависимости этого эффекта от структуры осаждаемых слоев. Для многих применений требуются очень тонкие слои (толщиной несколько нанометров) с атомно-гладкой и химически резкой межфазной границей. Это требует исследования структуры, состава, химических связей с высоким пространственным разрешением.

Особенно важное значение имеет выявленная ранее зависимость эффекта ГМС от толщины немагнитного слоя. В данной работе, посвященной исследованию тонкопленочных структур Та-NiFe-Cu-Co-FeMn-Ta, в качестве проводящего немагнитного слоя выбрана медь. Слой меди лежит на осажденных на подложку SiO<sub>2</sub>/Si слоях Та и пермаллоя NiFe (материал с низкой коэрцитивной силой 10...20 Э), сверху осаждаются фиксирующий слой Со, антиферромагнитный слой FeMn, "замораживающий" намагниченность в направлении фиксирующего слоя, и Та. Согласно [4] зависимость эффекта ГМС от толщины слоя Си имеет осциллирующий характер с периодом для меди приблизительно 1,25 нм в структурах на основе слоев кобальта и меди вследствие осциллирующего характера взаимодействия между магнитными слоями, разделенными немагнитным слоем. Ввиду столь малого периода осцилляции исследование влияния толщины медного слоя на величину эффекта ГМС представляет собой непростую методическую задачу, требующую высокой точности осаждения очень тонкого слоя меди необходимой толщины.

## Получение и анализ многослойных наноструктур с эффектом ГМС

Слои Та, NiFe, Cu, Co напылялись в установке электронно-лучевого напыления L560 в базовом вакууме  $10^{-6}$  Торр; слои FeMn напылялись методом лазерной абляции. Слои в напыленных на подложку пленках SiO<sub>2</sub>/Si располагались в последовательности, приведенной в таблице. Дополнительный слой кобальта напылялся на нижний слой

Последовательность и толщина напыленных слоев

№ слоя	1	2	3	4	5	6	7
Материал	Ta	NiFe	Co	Cu	Co	FeMn	Ta
Толщина, нм	4,5	3,5	0,5	t	3,5	7,5	4,5
-	-		-			-	-

NiFe для предотвращения взаимодействия пермаллоя с медью; таким образом, слой меди располагался между двумя слоями кобальта.

Было сделано три серии многослойных структур с различной толщиной *t* слоя меди, но одинаковыми по толщине слоями других металлов.

Данные о кристаллической структуре, фазовом составе, природе дефектов кристаллического строения и других особенностей микроструктуры пленок получали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100. Для этих исследований эффективно использование сечений, перпендикулярных плоскости пленок (поперечных сечений). Это позволяет проследить структуру сразу всех нанесенных слоев и приграничных областей подложки. Толщина слоев измерялась кварцевым толщиномером, а также по изображениям поперечных сечений пленок в просвечивающем электронном микроскопе. Шероховатость поверхности термически окисленной кремниевой подложки и напыленного на нее слоя тантала толшиной 4.5 нм измеряли, используя атомно-силовой микроскоп.

Для измерения магнетосопротивления многослойная структура осаждалась через маску. Измерения проводились при протекании тока вдоль слоев, при магнитном поле, ориентированном либо параллельно, либо перпендикулярно направлению протекания тока.

### Экспериментальные результаты

Общий вид поперечного сечения образца с напыленной на окисленную Si-подложку многослойной металлической пленкой показан на рис. 1. На



Рис. 1. Вид поперечного сечения многослойной пленки, нанесенной на поверхность окисленной кремниевой пластины

рис. 2 приведено изображение поперечного сечения пленки с увеличением, позволяющим различить образующие ее слои.

На рис. 2 видна неоднородность слоя пермаллоя. Справа между слоями тантала и пермаллоя не видно границы, что, возможно, объясняется большей толщиной пленки справа. Отличить слои меди от слоев кобальта и пермаллоя на полученных снимках не представляется возможным.



Рис. 2. Изображение с большим увеличением поперечного сечения образца из серии 3. Толщина слоя меди 3 нм



Рис. 3. АСМ-изображение поверхности подложки SiO<sub>2</sub>/Si, среднеквадратичное значение шероховатости Sq = 0,34 нм



Рис. 4. ACM-изображение поверхности напыленного на подложку слоя Та, среднеквадратичное значение шероховатости Sq = 0,42 нм

Задававшаяся при напылении общая толщина многослойной структуры должна была равняться 27 нм, что неплохо согласуется с измеренной толщиной напыленной пленки, оказавшейся равной 28 нм.

Для обеспечения осаждения очень тонких слоев надлежащего качества необходимо иметь малую шероховатость подложки и осаждаемых на нее слоев металлов. На рис. 3 приведено изображение поверхности SiO<sub>2</sub>/Si и соответствующее значение среднеквадратичной шероховатости Sq. На рис. 4 показаны аналогичные результаты для поверхности слоя тантала, осажденного на подложку SiO<sub>2</sub>/Si. Сравнение рис. 3 и 4 показывает, что шероховатость поверхности пленки тантала (Sq = 0,42 нм) незначительно отличается от шероховатости оксида кремния (Sq = 0,34 нм).

На рис. 5 и 6 показаны примеры выполненных измерений ГМС на двух образцах, различающихся толщиной слоя меди на 0,5 нм, в магнитном поле, направленном параллельно протеканию тока. Из рисунков видно, что измеренное магнетосопротивление различается для них примерно в 5 раз. Величина магнетосопротивления (MR, %) рассчитывается по формуле

$$MR(\%) = \frac{R(H) - R(H_0)}{R(H_0)}$$

где R(H) — максимальное сопротивление наноструктуры в приложенном магнитном поле;  $R(H_0)$  — минимальное сопротивление наноструктуры без приложения внешнего магнитного поля.

Полученные результаты для двух образцов приведены на рис. 7. Рис. 7 показывает, что полученные образцы обладают относительной величиной магнетосопротивления, равной 5 % в полях 10...20 Э.

Первая серия образцов с наиболее тонким немагнитным слоем (слоем меди) была напылена, чтобы попытаться выявить первый максимум маг-



Рис. 5. Результаты измерения магнетосопротивления *MR* образца из серии 3. Толщина слоя меди равна 3 нм. Магнитное поле направлено параллельно току



Рис. 6. Результаты измерения магнетосопротивления образца из серии 2 с толщиной меди 2,5 нм. Магнитное поле направлено параллельно току

нетосопротивления, который согласно [4] должен наблюдаться при очень малой толщине слоя меди, равной всего лишь 1,25 нм. К сожалению, наблюдать его не удалось. Возможно, причина этого в том, что слой меди при такой его толщине получился не сплошным. Кроме того, период осцилляции магнетосопротивления в мультислоях магнитной гетероструктуры сильно зависит от кристаллографической ориентации зерен и напряжений в пленке спейсера, которые не измерялись и не оценивались в работе. Однако второй максимум магнетосопротивления проявился отчетливо в сериях образцов 2 и 3 при толщине слоя меди около 3 нм, его относительная величина составила 3,4 и 2 % при измерениях в магнитном поле, направленном соответственно параллельно и перпендикулярно направлению тока. Хотя этот максимум должен наблюдаться при толщине слоя 2,5 нм согласно расчетам [4], полученное расхождение следует при-



Рис. 7. Зависимость магнетосопротивления от толщины медного спейсера

знать находящимся в пределах погрешности нанесения тонкого слоя меди заданной толщины и измерения его толщины. Попытка более точно измерить толщину этого слоя на изображении поперечного сечения в электронном микроскопе не удалась ввиду слабого различия в контрасте изображения осажденных слоев металлов с близкими атомными номерами.

Полученные результаты свидетельствуют, что электронно-лучевым напылением получены пленки, позволяющие наблюдать эффект ГМС в несколько процентов. Показано также в соответствии с [4], что максимум эффекта наблюдается при толщине разделительного немагнитного слоя, которая соответствует второму максимуму эффекта ГМС в пределах экспериментальной погрешности осаждения слоя заданной толщины. Из полученных результатов следует, что толщина немагнитного слоя является определяющим фактором для получения максимального эффекта ГМС, так как ошибка в толщине слоя всего лишь в несколько десятых долей нанометра может привести к отсутствию ГМС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы", государственный контракт № 16.513.11.3140.

#### Список литературы

1. Camley R. E., Barnas J. Theory of giant magnetoresistance effects in magnetic layered structures with antiferromagnetic coupling // Physical Review Letters. 1989. V. 63, N 6. P. 664–667.

2. Levy P. M., Zhang Sh., Fert A. Electrical conductivity of magnetic multilayered structures // Physical Review Letters. 1990. V. 65, N 13. P. 1643–1646.

3. **Parkin S. S. P., Bhadra R., Roche K. P.** Oscillatory magnetic exchange coupling through thin copper layers // Physical Review Letters. 1991. V. 66, N 16. P. 2152–2155.

4. Fert A., Barthelemy A., Etienne P., Lequen S. et. al. Mangetic multilayers: occillatory interlayer exchange and giant magnetoresistance // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1992. V. 104–107, N 3. P. 1712–1716.

### УДК 621.38+533.9

Р. А. Милованов, зам. нач. отдела,
Е. А. Кельм, мл. науч. сотр.,
О. А. Косичкин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зам. директора,
Н. А. Ляпунов, мл. науч. сотр.,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (ИНМЭ РАН),

e-mail: lna-inme@mail.ru

## СЕЛЕКТИВНОЕ ТРАВЛЕНИЕ МЕДИ В ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА ОТКАЗОВ ИМС С ПРОВОДНИКАМИ НА ОСНОВЕ МЕДИ

#### Поступила в редакцию 24.05.2013

Одним из этапов анализа отказов микросхем с системой межсоединений на основе меди является удаление слоя проводников. При этом основным требованием, которое предъявляется к процедуре травления, является селективность к диффузионно-барьерному слою, обеспечивающая полное удаление слоя проводников без повреждения нижележащего слоя. В работе рассмотрены подходы по селективному травлению медных проводников на основе использования методов жидкого и сухого травления. Результаты исследований показаны на примере кристаллов ПЛИС Virtex-4 фирмы Xilinx.

**Ключевые слова:** анализ отказов, система межсоединений, медь, жидкохимическое травление, сухое травление, диффузионно-барьерный слой

### Введение

При анализе отказов современных интегральных микросхем (ИМС) во многих случаях требуется послойное препарирование кристалла, которое заключается в последовательном удалении его топологических слоев. Последовательное удаление топологических слоев подразумева-

ет селективное по отношению к нижележащим проводникам и диэлектрикам травление рассматриваемого слоя. Отдельной задачей при этом является удаление формирующих проводники слоев. Методы селективного травления проводников ИМС с системой межсоединений на основе алюминия хорошо изучены и представлены в большом числе работ (например, [1, 2]). Вместе с тем процессы селективного удаления проводников ИМС с системой межсоединений на основе меди (актуальность задачи обусловлена увеличением номенклатуры выпускаемых ИМС с системой межсоединений на основе меди, так как медь является основным материалом для проводников ИМС, выполненных с топологическими нормами менее 0,13 мкм) исследованы недостаточно, в частности, в работе [3] подчеркивается, что при удалении медных проводников жидкими и сухими методами травления возникают трудности с контролем окончания процесса.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по травлению медных проводников на примере кристалла программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) Virtex-4 фирмы Xilinx [4]. Продемонстрирована принципиальная возможность селективного удаления медных проводников методом жидкого травления с использованием аммиачного комплекса двухвалентной меди, а также смеси соляной кислоты и перекиси водорода, и методом сухого травления с использованием в качестве рабочего газа BCl<sub>3</sub>.

### Образец для исследований

В качестве образца для исследований был выбран кристалл ПЛИС Virtex-4 фирмы Xilinx. После отсоединения кристалла от переходной печатной платы (использовалась комбинация механического, химического и термического воздействий), с помощью растрового ионного микроскопа (РИМ) системы Quanta 200 3d фирмы FEI [5] были получены поперечные сечения топологии кристалла (рис. 1).

Анализ вещественного состава материалов, осуществленный методом рентгеноспектрального анализа посредством EDAX-анализатора XFlash 5010 фирмы Bruker [6], установленного на растровый электронный микроскоп (РЭМ) Nova NanoSEM 230 фирмы FEI [5], показал, что верхний слой проводников (М11) выполнен из алюминия с подслоем нитрида титана (рис. 2, см. третью сторону обложки), средние слои (М10—М1) из меди ("двойная дамасская" технология) с проводящим



Рис. 1. РИМ-изображение поперечного сечения кристалла ПЛИС Virtex-4 фирмы Xilinx



Подготовленный к экспериментальным исследованиям образец кристалла ПЛИС Virtex-4 фирмы Xilinx:

*а* – схема сечения; *б* – РЭМ-изображение фрагмента топологии

диффузионно-барьерным слоем (ДБС) из тантала и диэлектрическим ДБС из нитрида кремния (рис. 3, см. третью сторону обложки), нижний слой проводников (Р) выполнен из поликремния, а межслойные

проводники к кремнию (M1vSi и PvSi) и поликремнию (M1vP) из вольфрама (рис. 4, см. третью сторону обложки). Пассивируемые слои нитрид кремния и оксид кремния, межслойный и внутрислойный диэлектрики выполнены на основе оксида кремния. Кристалл выполнен с топологическими нормами 90 нм.

Для проведения экспериментальных исследований по селективному удалению медных проводников, пассивируемые слои, слой верхних алюминиевых проводников — М11, межслойный диэлектрик — М11vМ10 и частично внутрислойный диэлектрик dM10 были удалены (рис. 5). Пассивируемые слои и слой алюминиевых проводников были удалены методом микрошлифования с помощью системы MultiPrep фирмы Alied [7]. Haxoдящийся в межслойных (M11vM10) контактных окнах алюминий, а также межслойный (M11vM10) и частично внутрислойный диэлектрики были удалены методами плазмохимического травления (ПХТ) с помощью системы ПХТ PlasmaLab 100 фирмы Oxford Plasma Technology [8].

### Результаты экспериментальных исследований

При экспериментальных исследованиях по удалению медных проводников методами жидкого травления применяли следующие растворы:

- смесь аммиака и перекиси водорода, растворенная в гидроколлоидном геле (травление осуществлялось с использованием жилкого травления системы Omnietch2 фирмы Nisene);
- смесь аммиака и перекиси водорода;
- аммиачный комплекс двухвалентной меди:
- смесь соляной кислоты и перекиси водорода.

В результате проведенных экспериментальных исследований было определено, что селективное, относительно ДБС, травление меди возможно с использованием аммиачно-

го комплекса двухвалентной меди, а также смеси соляной кислоты и перекиси водорода. Данные подходы обеспечивают равномерное удаление медных проводников без повреждения нижележащих слоев. При



Рис. 6. Кристалл ПЛИС Virtex-4 фирмы Xilinx после травления мелных проволников методом жидкого травления аммиачным комплексом двухвалентной меди: a

РИМ-изображение фрагмента топологии; б -РИМ-изображение сечения



Рис. 7. Кристалл ПЛИС Virtex-4 фирмы Xilinx после травления медных проводников методом жидкого травления в смеси соляной кислоты и перекиси водорода: РИМ-изображение фрагмента топологии; б — РИМ-изображение сечения

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 11, 2013 -



методом сухого травления в плазме BCl<sub>3</sub>:

 РЭМ-изображение фрагмента топологии (наклон образца 0°); б — РИМ-изображение фрагмента топологии (наклон образца 52°); в — РИМ-изображение сечения

этом ДБС (тантал) выступает в качестве "стоп-слоя" при реализации метода, что снижает требования к строгому контролю времени выполнения процесса. На рис. 6 и 7 приведены изображения фрагментов топологии и сечений кристалла ПЛИС Virtex-4 ф. Xilinx после реализации методов жидкого травления.

Экспериментальные исследования по удалению медных проводников методами сухого травления проводили на системе PlasmaLab 100, были использованы следующие рабочие газы: BCl<sub>3</sub>; HBr; BCl<sub>3</sub>/HBr/Ar.

В результате проведенных экспериментальных исследований было определено, что селективное, относительно ДБС, удаление меди возможно при использовании в качестве рабочего газа — BCl<sub>3</sub>. Ключевую роль при ПХТ меди играет температура образца. При этом результаты равномерного удаления медных проводников были получены при температуре образца 280 °С. На рис. 8 показаны изображения фрагмента топологии и сечения кристалла ПЛИС Virtex-4 ф. Xilinx после реализации метода сухого травления в плазме BCl<sub>3</sub>.

### Заключение

На примере кристалла ПЛИС Virtex-4 фирмы Xilinx продемонстрирована принципиальная воз-

можность селективного травления проводников ИМС с медной системой межсоединений. Полученные результаты показывают, что селективное, относительно ДБС, удаление медных проводников возможно как методом жидкого травления с использованием аммиачного комплекса двухвалентной меди или смеси соляной кислоты и перекиси водорода, так и методом сухого травления с использованием в качестве рабочего газа BCl<sub>3</sub>. Достоинством методов жидкого травления является относительная доступность, так как для их реализации не требуется использования дорогостоящего оборудования. К недостаткам можно отнести сложность контроля окончания процесса травления, что затрудняет получение образцов с одновременно полностью удаленным слоем основных проводников и сохраненным слоем межслойных.

Использование метода сухого травления позволяет контролировать (по времени) процесс таким образом, чтобы сохранить слой межслойных проводников. Вместе с тем его реализация предусматривает использование дорогостоящего оборудования ПХТ. Проведенные

экспериментальные исследования позволили получать устойчивые результаты при температуре образца 280 °С. Дальнейшие исследования направлены на понижение данной температуры за счет изменения состава рабочего газа, что позволит уменьшить трудности, связанные с проведением высокотемпературных процессов.

Необходимо отметить, что представленные в работе результаты были получены в процессе исследований, проведенных с одним типом образцов (ПЛИС Virtex-4 ф. Xilinx). Таким образом, обобщение полученных результатов требует проведения дополнительных исследований для других типов ИМС с системой межсоединений на основе меди.

### Список литературы

1. Beck F. Integrated circuit failure analysis // John Wiley &

Sons. 1998.2. Wagner L. C. Failure analysis of integrated circuit. Tools and techniques // Kluwer academic publishers. 1999. 3. **Ross R. J.** Microelectronics failure analysis.

Desk reference. Sixth Edition // ASM International. 2011.

- 4. URL: http:// www.xilinx.com
- 5. URL: http:// www.FEI.com
- 6. URL: http:// www.bruker.com 7. URL: http:// www.alliedhightech.com
- 8. URL: http:// www.oxford-instruments.com

### УДК 621.382

**Е. В. Саврук**, аспирант, e-mail: savruk@mail.ru, **С. В. Смирнов**, д-р тех. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники", г. Томск

## ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОРАССЕИВАЮШЕГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК ИЗ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### Поступила в редакцию 28.05.2013

Приведены результаты исследований светорассеивающего микрорельефа на поверхности керамических подложек, созданные с помощью лазерной обработки. Показано, что лазерное микроструктурирование поверхности подложек позволяет повысить светоотдачу светодиодных модулей на 10...15 %.

Ключевые слова: светорассеивающий микрорельеф, лазерное микроструктурирование, светодиодный модуль

Многокристальные светодиодные модули широко применяют для получения световых потоков высокой яркости (рис. 1). Для монтажа кристаллов светодиодов используют подложки из алюмооксидной керамики с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 90...100 %. Данный материал имеет высокую механическую прочность, высокую термостойкость и теплопроводность, а также высокую технологичность, особенно при операциях тонкопленочной и толстопленочной



Рис. 1. Многокристальный светодиодный модуль на керамической подложке

металлизации. Однако при использовании его в качестве конструктивного элемента светодиодных модулей синего и белого света возникает проблема увеличения отражающей способности его поверхности в рабочей области спектра. По нашим оценкам поглощение излучаемого света подложкой снижает значение светоотдачи модуля на 15...20 %. Отражающую способность поверхности подложки можно повысить за счет нанесения на нее тонкопленочного покрытия, например слоя алюминия или меди. Но при этом необходимо предусмотреть как возможность нарушения электрической развязки между кристаллами светодиодов, так и возможность ухудшения отражающей способности покрытия во время эксплуатации ввиду высокой химической активности используемых материалов. Поэтому наиболее эффективным решением, на наш взгляд, является создание на поверхности подложки светорассеивающего микрорельефа [1-3].

Перспективным и экономически выгодным является лазерное микроструктурирование — процесс создания периодических и квазипериодических светорассеивающих структур на поверхности моно- и поликристаллических материалов с помощью мощного лазерного излучения. Эффективным способом модификации поверхности керамической подложки является ее оплавление лазерным излучением с плотностью мощности 10<sup>4</sup>...10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup> путем сканирования лазерным лучом по поверхности [4].

Для экспериментов были взяты образцы поликристаллической алюмооксидной керамики типа ВК-95 в виде пластин размером 30 × 24 × 0,5 мм.

Обработку поверхности керамики выполняли с использованием непрерывного лазера на ИАГ + Nd типа "ЛТН-102", снабженного устройством для перемещения образца на основе линейного шагового двигателя (ЛШД) на воздушной подушке разработки УП "КБТЭМ-ОМО" (Минск) [3]. ЛШД обеспечивал перемещение луча лазера по поверхности образца со скоростью 10 см/с, с шагом 50 мкм и точностью позиционирования не ниже чем ±10 мкм. Лазер работал в непрерывном режиме со средней мощностью излучения 10 Вт, при этом лазерный луч фокусировался в пятно диаметром 20 мкм, что позволило получить плотность мощности излучения порядка  $10^4...10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. При этих условиях обработку поверхности проводили в режиме теплового потока, т. е. на поверхности задавался тепловой поток, необходимый для достижения температуры плавления. В результате чего приповерхностный слой подвергался плавлению на глубину 50...100 мкм с последующей перекристаллизацией. Особенностью работы ЛШЛ является обеспечение движения индуктора с образцом с дискретностью шага 2...10 мкм и шаговой частотой 1...10 кГц. Таким образом, на поверхности ванны расплава формируются колебания с длиной волны, равной шагу перемещения ЛШД. Это позволяет получить на поверхности рельефные микроструктурные образования. На рис. 2, а представлен внешний вид керамической подложки после лазерной обработки. Как следует



с плотностью мощности 10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup> и скоростью сканирования 10 см/с

из рисунка, на поверхности подложки создается волнистая микроструктура с кажущимся периодом порядка 50 мкм. Одновременно на поверхности крупномасштабной волнистой структуры формируется мелкомасштабная микроструктура (рис. 2, *б*).

Исследование образовавшегося микрорельефа на поверхности подложек (рис. 2) проводилось на растровом электронном микроскопе Raith150<sup>TWO</sup> (Германия). Характерный размер микроструктур составил 0,2 мкм. Отсутствие правильной огранки кристаллов указывает на неустойчивость процесса кристаллизации. Это подтверждается появлением на поверхности выделений новой фазы типа  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что подтверждается ранее проведенным рентгенофазовым анализом [5].

Отражающую способность полученной рассеивающей структуры исследовали с помощью спектрального эллипсометрического комплекса "Эллипс-1891" в диапазоне длин волн 350...1050 нм. Результаты исследований приведены на рис. 3. Из полученных зависимостей следует, что в микроструктурированных подложках из керамики ВК-95 диффузная отражающая способность существенно возрастает в диапазоне длин волн 350...600 нм.

На полученных таким способом микроструктурированных подложках размером 10 × 10 мм были собраны макеты четырехэлементных светодиодных модулей. В качестве активных элементов были



Рис. 3. Диффузное отражение исходной (кривая 1) и микроструктурированной (кривая 2) подложек при угле падения излучения 30°

использованы кристаллы фирмы SemiLED типа SL-V-B24AD. После лазерной обработки подложки на ее поверхность магнетронным распылением наносили тонкопленочную металлизацию, состоящую из подслоя хрома толщиной 0,1 мкм и слоя меди толщиной 1 мкм. Топологический рисунок формировался с помощью фотолитографии. После сборки проводили сравнительные фотометрические измерения светового потока модулей, собранных на обычной и микроструктурированной подложках. Измерения показа-

ли, что при использовании лазерного микроструктурирования световой поток при прямом токе через кристаллы в 350 мА увеличился с 85...90 лм/Вт до 102...112 лм/Вт. При этом пространственное распределение интенсивности излученного модулем света близко к ламбертовскому, что обусловлено многократностью отражений излучения от боковых поверхностей микрообразований.

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. При сканировании луча лазера плотностью мощности излучения порядка  $10^5$  BT/см<sup>2</sup> по поверхности подложек из поликристаллического  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со скоростью 10 см/с и шагом 50 мкм формируется двухмасштабный волнообразный микрорельеф с характерными размерами 50 мкм и 0,2 мкм, соответственно.

2. Созданный на поверхности подложек с помощью лазерного излучения микрорельеф позволяет повысить светоотдачу светодиодных модулей в сине-зеленой области спектра в диапазоне длин волн 350...600 мкм и улучшить пространственное распределение светового потока.

3. Разработанный метод формирования микрорельефа может быть использован при создании высокоэффективных полупроводниковых источников света и дифракционных оптических приборов [1].

### Список литературы

1. Ли К. Д., Сжодин Р., Эриксон Т. Наноформовка увеличивает эффективность светодиодов // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 5. С. 22—24.

2. Саврук Е. В., Смирнов С. В., Швайцер А. Н. Структура поверхности алюмооксидной керамики после лазерной обработки // Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51. № 11/2. С. 114—117.

3. Саврук Е. В., Смирнов С. В. Исследование структуры алюмооксидной керамики после электронной и лазерной обработки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77, № 6. С. 32—35.

4. Верещагин В. И., Смирнов С. В., Швайцер А. Н. Электрофизические характеристики лазерно-глазурованных слоев на поверхности алюмооксидной керамики // Новые огнеупоры. 2003. № 7. С. 39—41.

5. Саврук Е. В., Смирнов С. В. Исследование структуры поверхности подложек ГИС СВЧ из алюмооксидной керамики после электронной и лазерной обработки // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2010. № 1–2. С. 123–127. **Д. А. Абдуллаев**<sup>1</sup>, мл. науч. сотр., e-mail: daniil0309@gmail.com

**А. А. Зайцев**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, доц., **Е. А. Кельм**<sup>2</sup>, ст. науч. сотр., **Р. А. Милованов**<sup>2</sup>, зам. нач. ФТО <sup>1</sup> Московский розучить

Московский государственный технический университет радиотехники электроники и автоматики

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологии микроэлектроники РАН

## ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ТРАВЛЕНИЕ КАК ПРОМЕЖУТОЧНАЯ СТАДИЯ ПРИ УДАЛЕНИИ ПАССИВИРУЮЩИХ СЛОЕВ МИКРОСХЕМ В РАМКАХ ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА ОТКАЗОВ

### Поступила в редакцию 13.06.2013

Представлены результаты серии экспериментов по удалению пассивации СБИС с промежуточной планаризацией субмикрометрового рельефа методами ионно-лучевого травления в рамках технологии анализа отказов. Определены оптимальные параметры планаризации микрометрового рельефа.

Ключевые слова: ионно-лучевое травление, реактивноионное плазменное травление, планаризация микрометрового рельефа СБИС, технология анализа отказов

### Введение

Интеграция электронных устройств в жизнь растет с каждым годом, в связи с этим требования к надежности и отказоустойчивости как отдельных элементов, так и электронных устройств в целом растут. Одним из важнейших элементов вычислительной системы являются интегральные микросхемы (ИМС), анализ отказов которых является наиболее важной и сложной задачей.

Одним из методов анализа отказов микросхем является послойное препарирование и дальнейшее изучение их технологических слоев. Подавляющее большинство кристаллов интегральных схем (ИС) на сегодняшний день производится по планарной технологии, т. е. после завершения каждой технологической операции восстанавливается плоская (планарная) форма поверхности ИС, что позволяет создавать достаточно сложную структуру, используя конечный набор технологических операций [1]. Эта технология значительно упрощает послойное препарирование микросхем и их дальнейший анализ. Однако пассивированная поверхность кристалла, являясь последним (верхним) топологическим слоем, не планаризуется, таким образом, возникает ряд сложностей при получении доступа к нижележащим слоям. В связи с этим был проведен ряд экспериментов по промежуточной планаризации пассивированных слоев ИС с помощью ионно-лучевого травления при различных параметрах процесса после селективного удаления нитрида кремния методом реактивно-ионного плазменного травления.

### Оборудование

Экспериментальные исследования проводили на установках ионно-лучевого травления Im 50 Oxford Applied Research (IMSO OAR) и реактивно-ионного плазменного травления PlasmaLab 100 Oxford Instruments. Система откачки Im 50 включает турбомолекулярный насос, скорость откачки которого (1000 л/c) позволяет обеспечить вакуум до  $10^{-6}$  Topp. Установка оснащена радиочастотным источником высокой частоты RF 50. Держатель образца обеспечивает вращение на 360° и наклон относительно пучка на углы до 90°. Предусмотрена блокировка попадания пучка ионов на поверхность образца. В качестве газа-источника ионов использовался Ar. Энергия ионов варьируется в пределах от 100 эВ до 1 кэВ, что обеспечивает условия для травления различных материалов. Сила тока пучка может достигать 100 мА, плотность тока до 12 мА/см<sup>2</sup>. Система травления PlasmaLab 100 состоит из трех камер одной загрузочной и двух реакционных (для травления металлов в одной и диэлектриков и полупроводников — в другой). Система откачки включает турбомолекулярный насос, позволяющий обеспечить вакуум до  $10^{-6}$  Торр. Установка оснащена источниками высокой частоты и генераторами индуктивно связанной плазмы. В системе предусмотрена возможность нагрева образца до 400 °С в камере для травления металлов и до 80 °C в камере для травления диэлектриков. Для каждой из камер существует свой набор рабочих газов.

### Экспериментальные исследования и их результаты

Определение оптимальных параметров селективного травления  $Si_3N_4$  к  $SiO_2$  на тестовых образцах и удаление нитридного пассивированного слоя с поверхности ИС. Пассивированные тестовые кристаллы состоят из двух слоев — оксида  $(SiO_2)$  и нитрида кремния  $(Si_3N_4)$  [1]. Неравномерность рельефа пассивированных слоев связана с особенностями их технологического формирования. Известно, что при ионно-лучевом травлении (ИЛТ) скорость травления  $Si_3N_4$  ниже, чем  $SiO_2$ , поэтому если пассивированную поверхность начать выравнивать сразу, то это отрицательно скажется на качестве планаризации. Для уменьшения неравномерности рельефа при удалении пассивированного слоя необходимо сначала селективно удалить нитридный слой.



Рис. 1. Изображение кросс-секции кристалла после удаления нитридного пассивированного слоя (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

Основные параметры процесса селективного травления нитрида к оксиду кремния были взяты из источника [2]. Учитывая особенности протекания процессов плазмо-химического травления в

разных системах, для *PlasmaLab100* были определены параметры процесса с максимальным показателем селективности травления:

$$25/50 \text{ см}^3/\text{мин};$$

- давление в камере . . 20 мТорр;
  мошность ВЧ
- генератора . . . . . 50 Вт;
- мощность ICP генератора . . . . . . 290 Вт.

Учитывая толщину нитридного пассивированного слоя и скорость травления время процесса составило 15 мин. После удаления нитрида кремния для получения информации о рельефе и толщине оставшегося оксидного пассивированного слоя была сделана кросс-секция<sup>1</sup> топологии кристалла ионным пучком на микроскопе Quanta 3D dualbeam (рис. 1).

Определение оптимальных параметров процесса планаризации оксидного пассивированного слоя кристаллов ИС методом ИЛТ. После удаления нитридного пассивированного слоя необходимо найти оптимальные параметры процесса планаризации оксида кремния. Только после получения максимально планаризованной поверхности ИС можно приступить к послойному препарированию и анализу микросхемы.

Поиск оптимальных параметров планаризации микросхем проводили на установке ИЛТ *IM 50 OAR* 



Рис. 2. Кросс-секции топологии кристаллов ИС после полировки при разных углах падения пучка ионов, ":  $a - 50, \delta - 100, s - 150, c - 250$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Вертикальное сечение топологии ИС.



Рис. 3. Снимки кросс-секций чипов при разных значения напряжения экранирующей и ускоряющей сетках:

 $a - V_{
m 3 kp} = 650$  В,  $V_{
m yck} = 150$  В, t = 215 мин;  $\delta - V_{
m 3 kp} = 750$  В,  $V_{
m yck} = 250$  В, t = 180 мин;  $e - V_{
m 3 kp} = 850$  В,  $V_{
m yck} = 350$  В, t = 160 мин



Рис. 4. Кросс-секции микросхем после планаризации поверхности при разных мощностях ВЧ генератора:

*a* — 100 Вт, *t* = 200 мин; *б* — 125 Вт, *t* = 180 мин; *в* — 150 Вт, *t* = 160 мин

при различных углах падения ионного пучка, напряжении на экранирующей и ускоряющей сетках, мощности ВЧ генератора.

В работе исследовали зависимость степени планаризации от угла паления ионов. эксперименты проводили при углах падения ионов относительно поверхности 5, 10, 15 и 25°. При обработке данной поверхности пучком ионов под малыми углами угол падения пучка ионов на горизонтальную поверхность образца будет отличаться от угла падения пучка на поверхность микронеровностей, образованных пассивацией проводников. Мы получаем различные значения коэффициентов распыления выступающих частей рельефа и ровной поверхности образца, в результате чего, при условии вращения или осцилляции на угол до 180° мишени, происходит планаризация [3]. Устранению неровностей на поверхности также способствует эффект самозатенения, приводящий к реализации больших скоростей распыления областей материала, не попадающих в тень от рельефа при распылении под малыми углами.

Контроль изменений рельефа поверхности проводили с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) FEI NOVA NanoSem 230 и кросс-секций, сделанных ионным пучком на микроскопе Quanta 3D dualbeam.

Анализ изображений кросс-секций (рис. 2) показал, что наилучшие результаты планаризации поверхности (наименьшие перепады толщин оксида кремния) получены при угле падения травящего пучка ионов в 5°. Далее, при выбранном угле меняли значения напряжения экранирующей ( $V_{\rm экр}$ ) и ускоряющей сеток ( $V_{\rm уск}$ ) (рис. 3).

С повышением напряжения на сетках повышается энергия падающих ионов, что приводит к повышению скорости травления. В связи с этим время травления при повышении напряжения сокращали.

Анализ изображений кросс-секций (рис. 3) показал, что изменение напряжения на сетках особого влияния на рельеф не оказало, од-



Рис. 5. Изображение кросс-секции микросхемы после планаризации при выбранных параметрах процесса



Рис. 6. Изображения вскрытого первого слоя металлизации ИС

нако стоит заметить, что при максимальном напряжении на сетках время процесса сократили до 160 мин. На основе этого можно сделать вывод о целесообразности использования наибольших значений напряжений на экранирующей и ускоряющей сетках в связи с сокращением времени процесса.

Далее исследовали влияние мощности ВЧ генератора на качество планаризации ИС (рис. 4). Стоит заметить, что с повышением мощности ВЧ генератора увеличивается доля ионизированных частиц, что в свою очередь приводит к повышению плотности пучка падающих ионов и, вследствие этого, повышению скорости процесса травления. Как и в случае с повышением напряжения на сетках, при увеличении мощности ВЧ генератора время травления уменьшали.

Анализ изображений кросс-секций (рис. 4) показал, что после травления при мощности ВЧ генератора в 100 Вт в течение 200 мин, открытие металла не произошло, а при мощности 150 Вт после травления в течение 160 мин наблюдается деградация алюминиевых шин, однако разброс толщин оставшегося пассивированного слоя минимален именно при этих параметрах травления. На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что наиболее приемлемо использовать мощность ВЧ генератора в 150 Вт, однако время травления необходимо сократить.

На основе проведенных серий экспериментов были выбраны оптимальные параметры процесса планаризации оксидной пассивации ИС:

•	угол падения пучка ионов	5°;
•	сетке	850 B;
•	ускоряющее напряжение	350 B;
•	мощность ВЧ генератора	150 Вт;
•	время процесса	120 мин.

Как видно из изображений кросссекции (рис. 5), после процесса травления пассивированного слоя на широких шинах остался слой оксида кремния, но его толщина меньше толщины, которую необходимо удалить для полного вскрытия металлизации. Вскрытие первого слоя металлизации. Для вскрытия первого слоя металлизации необходимо удалить оставшийся оксидный пассивированный слой. Удаление остаточного пассивированного слоя проводилось методом реактивно-ионного плазменного травления оксида кремния на установке *PlasmaLab 100 Oxford Instrument* при следующих параметрах процесса:

• используемые газы и их расход . . CF<sub>4</sub>/Ar/O<sub>2</sub>,

36/40/9 см<sup>3</sup>/мин;

Время травления варьировалось от 10 до 13 мин. Стоит отметить, что в случае перетрава возможно отслаивание шин металлизации, что, в свою очередь, приведет к невозможности проведения анализа отказов микросхемы.

После окончания процесса травления весь первый слой металлизации открывается (рис. 6) и можно приступать к анализу ИС.



### УДК 621.382.049.77 + 531:546.621-31

Н. И. Мухуров, д-р техн. наук, зав. лаб., e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by, Г. И. Ефремов, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., С. П. Жвавый, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., Государственное научное учреждение "Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси", г. Минск

### ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ МИКРОКОММУТАТОРЫ. ЧАСТЬ 2. ТОРСИОННЫЕ ВКЛЮЧАЮЩИЕ МИКРОКОММУТАТОРЫ\*

#### Поступила в редакцию 29.04.2013

Проведены расчеты параметров включающих микрокоммутаторов торсионной конструкции. Предложены механоэлектрические актюаторы, показаны их особенности и преимущества. Получены формулы оперативного вычисления основных параметров. **Ключевые слова:** электростатические включающие микрокоммутаторы, торсионная конструкция, механоэлектрические актюаторы, формулы расчета основных параметров

Применение ионно-лучевого травления как

промежуточной стадии при удалении пассивиро-

ванных слоев кристалла ИС значительно снижает

вероятность перетрава межслойного диэлектрика и

повышает качество препарируемой поверхности

после процесса. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при увеличении угла па-

дения пучка ионов скорость травления увеличивает-

ся, но степень планаризации уменьшается и наблю-

дается сильный протрав в межслойную изоляцию.

При увеличении напряжения на экранирующей и

ускоряющей сетках и мощности ВЧ генератора зна-

Список литературы

1. Bakshi U. A., Godse A. P. Linear Integrated Circuits. Pune:

2. Beck F. Integrated circuit failure analysis: A guide to

3. Hansen H. et al. Step Edge Sputtering Yield at Grazing

preparation techniques. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.,

Incidence Ion Bombardment // Phys Rev. Lett. 2004. Vol. 92,

чительно увеличивается скорость травления.

Technical Pablications, 2010. 876 p.

### Введение

1998. 174 p.

N 24. P. 2008.

Заключение

Конструктивной особенностью торсионных включающих микрокоммутаторов (ТВК) является закрепление плоского жесткого якоря упругими торсионами, расположенными на его короткой оси симметрии, в выступах основания (рис. 1) [1—3]. Схема ТВК содержит основание 1, над которым расположен якорь 2, упругими элементами 3 опирающийся на основание. На последнем размещены неподвижные тянущий (НТЭ) 4 и отталкивающий (НОЭ) 5 электроды, а также неподвижные контакты (НК) 6. На якоре сформированы подвижные электрод (ПЭ) 7 и контакты (ПК) 8.

В исходном состоянии электроды параллельны, межэлектродное расстояние равно *t*. Контакты *4* и *8* нормально разомкнуты (НРК). При подаче электрического напряжения *U* на электроды и увеличении его значения якорь под действием активной электростатической силы *F* деформирует упругие элементы, создавая в них реактивную механиче-

<sup>\*</sup> Часть 1 см. в № 10. 2013 г.



скую силу Р, и поворачивает якорь, сближая и замыкая НРК. На внутренних сторонах якоря нанесен единый подвижный электрод (ПЭ), на основании — два изолированных один от другого неподвижных электрода (НЭ). В исходном состоянии НЭ и ПЭ параллельны. При включении ТВК на ПЭ постоянно подается заряд одного знака, на НЭ поочередно заряды противоположных знаков, так что в электрическом поле с одной стороны оси якоря создаются притягивающие, а с другой — отталкивающие электростатические активные силы *F*, суммарный момент которых  $M_{2}$  поворачивает якорь, деформируя торсионы, и замыкает НРК. В торсионах возникает реактивный механический момент  $M_{M}$ . Межэлектродное расстояние изменяется линейно, принимая трапецеидальную форму, так как якорь жесткий. При смене управляющей цепью знаков зарядов на НЭ якорь поворачивается в обратном направлении. Таким образом, в ТВК осуществляется замыкание и размыкание НРК.

В основу методики равновесного расчета положено соотношение

$$M_{\mathfrak{H}} = M_{\mathfrak{H}} + M_{\mathfrak{H}} = M_{\mathfrak{M}},$$

где  $M_{\ni 1}, M_{\ni 2}$  — электрические моменты притягивающих  $F_1$  и отталкивающих  $F_2$  сил.

### Расчет рабочего цикла торсионных включающих микрокоммутаторов

Активная электростатическая сила [4]

$$F_{\rm T} = \frac{\varepsilon_0 S U^2}{2(t-y)^2} = \frac{\varepsilon_0 S}{2t^2} \frac{U^2}{(1-m)^2} = C_F F^*, \qquad (1)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \, \Phi/\text{м}$  — электрическая постоянная; *S* — площадь электрода; *y* —смещение якоря;  $C_F$  — конструктивная константа; *F*<sup>\*</sup> — базовая функция активной силы; *m* — нормированная величина смещения, равная *x/t*; *U* — электрическое напряжение.



Рис. 2. Распределение базовых сил  $F_i^*$  по длине электродов при различных значениях смещения конца электрода v(U)

Для притягиваемого плеча единичная сила с разделением на переменную и постоянную части в точке *x* равна (рис. 2)

$$F_{1i} = \frac{\varepsilon_0 a U^2 \Delta x}{2(t-y)^2} = \frac{\varepsilon_0 a \Delta x}{2t^2} \frac{U^2}{\left(1 - \frac{x}{L} \frac{v}{t}\right)^2} =$$
$$= \frac{\varepsilon_0 a \Delta x}{2t^2} \frac{U^2}{\left(1 - nm\right)^2} = C_{Fi} F_{1i}^{\bullet}, \qquad (2)$$

где а — ширина держателя.

Из рис. 1 очевидны соотношения

$$\frac{y}{x} = \frac{v}{L}, \ y = x\frac{v}{L}, \tag{3}$$

где v — смещение конца электрода;  $n = \frac{x}{L}$  — нормированная величина координаты x;  $m = \frac{v}{t}$  — нор-

мированная величина смещения v конца электрода.

Разность между длиной электрода и длиной якоря относительно мала, поэтому в целях упрощения формул обозначаем их размеры единым символом *L*. По этой же причине не учитываем изолирующий участок между электродами на основании.

Единичный момент

$$M_{1i} = F_{1i}x = \frac{\varepsilon_0 a\Delta x}{2t^2} \frac{U^2 x}{(1-nm)^2}.$$
 (4)

Момент плеча

$$M_{1} = \frac{\varepsilon_{0} a U^{2}}{2t^{2}} \int_{0}^{L} \frac{x dx}{(1 - nm)^{2}} =$$
$$= \frac{\varepsilon_{0} a L^{2}}{2t^{2}} \frac{U^{2}}{m^{2}} \left[ \frac{m}{1 - m} + \ln(1 - m) \right].$$
(5)

Таблица 1

Значения функций  $M_{3,T}^*$  и  $M_{M,T}^*$  в зависимости от *m* при контактном моменте  $M_Q^* = 0$ 

m $M_{\rm M,\pi}^* \cdot 10^6$ , H·M	0,1 0,1	0,2 0,2	0,3 0,3	0,4 0,4	0,5 0,5	052 0,53	0,6 0,6	0,7 0,7	0,8 0,8	0,9 0,9
$U_{\rm T}^{\rm M.1}$ B	0,31	0,44	0,51	0,56	0,58	0,58	0,56	0,52	0,45	0,33
$M^*_{2T} \cdot 10^6,  {\rm H} \cdot {\rm M}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,53	0,6	0,7	0,8	0,9
$M_Q^* \cdot 10^6,  \mathrm{H} \cdot \mathrm{M}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Для отталкиваемого плеча аналогично

$$F_{2i} = \frac{\varepsilon_0 a U^2 \Delta x}{2(t+y)^2} = \frac{\varepsilon_0 a \Delta x}{2t^2} \frac{U^2}{\left(1 + \frac{x}{L} \frac{v}{t}\right)^2} = \frac{\varepsilon_0 a \Delta x}{2t^2} \frac{U^2}{\left(1 + nm\right)^2} = C_{F_{1i}} F_{1i}^*, \quad (6)$$

$$M_{2i} = F_{2i}x = \frac{\varepsilon_0 a \Delta x}{2t^2} \frac{U^2}{(1+nm)^2},$$
 (7)

$$M_{2} = \frac{\varepsilon_{0} a U^{2} \int_{0}^{L} \frac{x dx}{(1 + nm)^{2}} =$$
$$= \frac{\varepsilon_{0} a L}{2t^{2}} \frac{U^{2}}{m^{2}} \left[ -\frac{m}{1 + m} + \ln(1 + m) \right].$$
(8)

Суммарный момент электродов при теоретичес-ком расчете

$$M_{\mathfrak{3},\mathrm{T}} = \frac{\varepsilon_0 a L^2}{2t^2} \frac{1}{m^2} \left[ \frac{2m^2}{1-m^2} + \ln\left(1-m^2\right) \right] U_{\mathrm{T}}^2 = \\ = C_{M_{\mathfrak{3},\mathrm{T}}} M_{\mathfrak{3},\mathrm{T}}^* U_{\mathrm{T}}^2, \qquad (9)$$

где  $C_{M_{3,\tau}}$  — постоянная величина при расчете момента электродов теоретическая.

Активный момент  $M_{\mathfrak{P},\mathsf{T}}$  поворачивает якорь на угол  $\alpha$ , деформируя, скручивая оба его торсиона, что создает в них равный противоположно направленный реактивный механический момент  $M_{\mathsf{M},\mathsf{T}}$ , пропорциональный  $\alpha$ , который при реальных величинах допустимо принять

$$\alpha \approx tg\alpha = \frac{v}{L} = \frac{mt}{L},$$
 (10)

и равный [5]

$$M_{\rm M.T} = \frac{2 G J_{\rm T}}{l_{\rm T}} \alpha = \frac{2 G J_{\rm T} t}{l_{\rm T} L} m = C_{M_{\rm M.T}} M_{\rm M.T}^* =$$
$$= M_{\rm 3.T} = C_{M_{\rm 3.T}} M_{\rm 3.T}^* U_{\rm T}^2, \qquad (11)$$

где G — модуль сдвига;  $J_{\rm T}$  — момент инерции сечения торсиона;  $l_{\rm T}$  — длина торсиона;  $C_{M_{\rm M,T}}$  — постоянная величина при расчете механического момента теоретическая.



Рис. 3. Теоретические базовые функции параметров для торсионного включающего микрокоммутатора

Из формулы (11) следует, что требуемое условие равенства моментов обеспечивается напряжением

$$U_{\rm T} = \sqrt{\frac{4 G J_{\rm T} t^3}{\varepsilon_0 a L^3 l_{\rm T}}} \sqrt{\frac{m^3}{\frac{2m^2}{1-m^2} + \ln(1-m^2)}} = C_{U_{\rm T}} U_{\rm T}^*.$$
(12)

Используя полученное значение  $U_{\rm T}$ , находим связь суммарного момента электродов с механическими параметрами упругого элемента:

$$M_{\mathfrak{S}.T} = \frac{2 G J_{T} t}{l_{T} L} m = C_{M_{M.T}} M_{M.T}^{*}, \qquad (13)$$

Графически зависимость  $U_{\rm T}^*(m)$  представлена кривой в виде полукубической почти симметричной параболы. Ее экстремальные точки, полученные дифференцированием (12), равны  $U_0^* = 0,58$ при  $m_0 = 0,52$  [1], функции  $M_{_{\rm Э.T}}^*$  и  $M_{_{\rm M.T}}^*$  прямо пропорциональны *m* и выражаются единой прямой линией. Контактный момент  $M_Q^* = 0$  (табл. 1, рис. 3).

## Практическая реализация торсионных включающих микрокоммутаторов

В действительности после  $m > m_0 = 0,52$  якорь под действием неуравновешенного  $M_3$  коллапсирует до упора в неподвижные контакты основания, включая нормально разомкнутую управляемую цепь.



Рис. 4. Практические базовые функции параметров для торсионного включающего микрокоммутатора

Соотношение сил и моментов на подготовительном участке остается тем же, что и в теоретическом цикле. На исполнительном участке при  $U_0^* = \text{const}$  их формулы изменяются, кроме  $M_{\text{м.п}}$ :

$$M_{\rm M,\Pi} = M_{\rm M,T} = C_{M_{\rm M,T}} M_{\rm M,T}^* = \frac{2 G J_{\rm T} t}{l_{\rm T} L} m, \qquad (14)$$

Постоянство электрического напряжения определяется экстремумом базовой функции (обозначается \*):

$$U_{\Pi} = C_{U_{\Pi}} U_{0}^{*} = \sqrt{\frac{4 G J_{\Pi} t^{3}}{\varepsilon_{0} a l_{\Pi} L^{3}}} \cdot 0,58.$$
(15)

В связи с резким уменьшением межэлектродного расстояния после  $m_0 M_{_{3,\Pi}}$  начинает стремительно нарастать, превышая  $M_{_{M,\Pi}}$ , при  $U_{_{\Pi}}$  = const.

$$M_{\mathfrak{D},\Pi} = C_{M_{\mathfrak{D},\Pi}} M_{\mathfrak{D},\Pi}^* U_{\Pi}^2 = C_{M_{\mathfrak{M},\Pi}} M_{\mathfrak{D},\Pi}^* \cdot 0,58^2 = \frac{2 G J_{\mathsf{T}} t}{l_{\mathsf{T}} L} \frac{1}{m^2} \left[ \frac{2m^2}{1-m^2} + \ln(1-m^2) \right] 0,58^2.$$
(16)

Разность электрических и механических моментов создает контактный момент в НРК

$$M_{Q_{\Pi}} = M_{\Im,\Pi} - M_{M,\Pi} =$$
$$= C_{M_{M,\Pi}} \left( M_{\Im,T}^* \cdot 0.58^2 - m \right) = C_{M_{M,\Pi}} M_{Q_{\Pi}}^*, \qquad (17)$$

и контактное усилие

$$Q_{\rm HPK_{\pi}} = \frac{M_{9.\pi} - M_{\rm M.T}}{L} =$$
$$= \frac{C_{M_{\rm M.T}}}{L} = M_Q^* = C_{Q_{\pi}} M_{Q_{\pi}}^*.$$
(18)

Результаты расчетов практических базовых функций представлены в табл. 2 и на рис. 4. Они аналогичны по виду ПВК, но количественно их можно сопоставлять лишь с учетом реальных значений параметров конструктивных констант.

## Расчет разработанной конструкции торсионных включающих микрокоммутаторов

Исходные данные:

$$ε_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Φ/M}, G = 0,56 \cdot 10^{11} \text{ H/M}^2 \text{ [11]},$$
  
 $J_{\text{T}} = 0,1406 a_{\text{T}}^4, a_{\text{T}} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ M}, l_{\text{T}} = 400 \cdot 10^{-6} \text{ M},$   
 $a = 700 \cdot 10^{-6} \text{ M}, L = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ M}, t = 10 \cdot 10^{-6} \text{ M}.$ 

Расчет конструктивных констант:

$$C_{M_{\rm M,T}} = \frac{2 G J_{\rm T} t}{l_{\rm T} L} = 0,103 \cdot 10^{-6} \text{ H/M}$$

$$C_{U_{\rm T}} = \sqrt{\frac{4 G J_{\rm T} t^3}{\varepsilon_0 a l_{\rm T} L^3}} = 38,3 \text{ B};$$

$$C_{Q_{\rm T}} = \frac{2 G J_{\rm T} t}{l_{\rm T} L^2} = 69 \cdot 10^{-6} \text{ H}.$$

Расчет параметров ТВК (табл. 3):

$$M_{\rm M} = 0,103 \cdot 10^{-6} m \text{ H} \cdot \text{m},$$
$$U = 38,3 \cdot 0,58 = 22,2 \text{ B (const)},$$
$$M_{\rm g} = 0,103 \cdot 10^{-6} M_{\rm g.T}^* \cdot 0,58^2 \text{ H} \cdot \text{m},$$
$$P_{\rm HPK} = 69 \cdot 10^{-6} (0,58^2 M_{\rm g.T}^* - M) \text{ H}$$

Таблица 2

									1	
m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,52	0,6	0,7	0,8	0,9
$M^*_{M,\Pi} \cdot 10^6,  {\rm H} \cdot {\rm M}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,53	0,6	0,7	0,8	0,9
$U_{\pi}^*$ , B	0,31	0,44	0,51	0,56	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
$M^*_{2\pi} \cdot 10^6$ , Н · м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,53	0,63	0,86	1,33	2,85
$M_O^* \cdot 10^6$ , H · M	0	0	0	0	0	0	0,03	0,16	0,53	1,95
~										

Результаты расчетов базовых функций в практической реализации

42 —

Таблица 3

Результаты расчета параметров торсионных включающих микрокоммутаторов

m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,52	0,6	0,7	0,8	0,9
$M_{\rm M} \cdot 10^6$ , H · M	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,052	0,06	0,07	0,08	0,09
$U, \mathbf{B}$	3,83	7,66	11,5	15,3	19,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
$M_2 \cdot 10^6, \mathbf{H} \cdot \mathbf{M}$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,052	0,065	0,088	1,33	2,85
$Q_{\rm HKP} \cdot 10^6,  {\rm H} \cdot {\rm M}$	0	0	0	0	0	0	2,35	10,8	36,7	135

Управляющее напряжение в ТВК в общем случае больше, чем в ПВК (см. часть 1), поскольку в ТВК электростатические силы (см. рис. 2) активно действуют только примерно на 1/3 длины якоря со стороны его свободного конца.

### Выводы

- Торсионный включающий микрокоммутатор характеризуется возвратно-вращательной кинематикой якоря, которая осуществляется при приложении электрического напряжения U под действием электромеханических моментов M<sub>э</sub>, выполняющих поворот якоря относительно его оси и упругое деформирование торсионов. В рабочем цикле момент M<sub>э</sub> распределен неравномерно.
- Теоретически базовая функция U\*(m) выражается почти симметричной полукубической параболой с экстремальными значениями U<sub>0</sub><sup>\*</sup> = 0,58 и m<sub>0</sub> = 0,52, т. е. в 1,5 раза больше, чем в торсионных включающих микрокоммутаторах. Базовые функции M<sub>M</sub> и M<sub>3</sub> от m линейны и численно равны.
- Практически после  $m_0 = 0,52$  базовое электрическое напряжение  $U_0^* \ge 0,58$ , межэлектродное

расстояние резко уменьшается, в результате  $M_{\Im}$  начинает быстро возрастать.  $M_{M}(m)$  сохраняет линейность, что обусловливает возникновение и увеличение контактных момента  $M_{Q}^{*}$  и усилия

*Q*<sub>НРК</sub> в 65 раз.

 Рабочий цикл может быть разделен на подготовительный участок до *m* = 0,52 и "исполнительный" при *m* > 0,52, который осуществляет замыкание нормально разомкнутых контактов внешней электрической цепи.

### Список литературы

1. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И. Анализ взаимосвязи электромеханических характеристик электростатических торсионных микросистем // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 5. С. 52—59.

2. Mukhurov N. I., Efremov G. I. Microelectromechanical optical switch // Proc. of SPIE. 2003. Vol. 4983. P. 120–126.

3. **Gugliotta A., Soma A., Manro S.** et. all. Non-linear analysis of beams under electrostatic loads // Design, Test, Integration and Packaging MEMS/MOEMS. Paris, France. 2000. Vol. 4019. P. 372–378.

4. Kuchling H. Physik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1980. 332 p.

5. Пономарев С. Д., Бидерман В. Л, Лихарев К. К. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. М.: Наука, 1956. 568 с.

### УДК 621.382

**Ю. Б. Рогаткин**, канд. техн. наук, доц., e-mail: ryb42010@yandex.ru, Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН), Москва

# СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СБИС

Поступила в редакцию 11.06.2013

Представлен многоканальный сложнофункциональный блок сбора и обработки обобщенной информации о температуре и напряжении питания в отдельных частях СБИС, в частности многоядерных микропроцессорных системах.

**Ключевые слова:** надежность СБИС, аналого-цифровое преобразование, датчик температуры Важной задачей при разработке СБИС является повышение надежности их работы в различных условиях эксплуатации. Одними из основных показателей условий работы микросхемы является температура и напряжение питания в конкретной точке кристалла микросхемы. За рубежом проблеме мониторинга температуры в различных точках кристалла микросхемы уделяют большое внимание, эта проблема широко отражена в литературе, например [1, 2]. Данная работа посвящена задаче разработки простой и эффективной многоканальной системы мониторинга температуры и напряжения питания в различных наиболее тепловыделяющих точках СБИС.

В качестве датчика температуры используют различные устройства. Известны датчики температуры на основе *p*—*n*-перехода, на основе температурно-



Рис. 1. Принципиальная схема импульсного датчика температуры и напряжения питания

зависимого источника тока и другие [3]. В данной работе выбор был сделан в пользу датчика на основе генератора импульсов с самовозбуждением — в дальнейшем импульсного датчика. На рис. 1 приведена принципиальная схема импульсного датчика. Преимущества выбранного датчика, выходным параметром которого является частота генерируемых импульсов, следующие:

- линия связи состоит из одного провода;
- частота выходных импульсов слабо зависит от параметров линии связи;
- выходной сигнал импульсного датчика хорошо поддается оцифровке.

Исследовалась зависимость частоты выходных импульсов импульсного датчика, разработанного по технологии TSMC с проектными нормами 65 нм. В качестве конденсатора использовали варактор *птоs*-типа. Результаты представлены на рис. 2. Видно, что частота выходных импульсов импульсного датчика падает с увеличением температуры и уменьшением напряжения питания. Наименьшая частота F = 2,42 МГц соответствует координатам  $V_{sup} = 0.8 \text{ B}$ и T = 145 °C.

Исследовали зависимость выходной частоты датчика от параметров технологического процесса, результаты приведены в таблице. Процесс "ff" соответствует "быстрым" моделям транзисторов и "быстрым" моделям конденсаторов на основе варакторов, процесс "ss" — "медленным" моделям транзисторов и конденсаторов, процесс "sf" — "медленным" моделям транзисторов и "быстрым" моделям конденсаторов, процесс "fs" — "быстрым"



пряжения питания и температуры

Зависимость выходной частоты датчика от параметров технологического процесса для разных температур

FMΓιι	Τ,	K, %	
<i>г</i> , мпц	+85	+135	
Процесс "ff" Процесс "ss" Процесс "sf" Процесс "fs"	3,79 2,85 2,55 4,27	3,17 2,47 2,20 3,55	16,36 13,33 13,72 16,86

моделям транзисторов и "медленным" моделям конденсаторов. Коэффициент K показывает процентное изменение частоты при изменении температуры от +85 до +135 °C.

Отметим, что коэффициент K для разных процессов практически можно считать одинаковым и равным  $K = 15,07 \pm 1,8$ %.

Оценку изменений температуры и напряжения питания в конкретной точке кристалла выполняют по результатам измерения частоты импульсного датчика. Для этого проводят калибровку импульсного датчика путем подсчета числа его выходных импульсов при номинальных температуре и напряжении питания за эталонный промежуток времени. Последний может формироваться на основе частоты кварцевого генератора синхроимпульсов СБИС. Результаты подсчета N<sub>калибр</sub> на этапе

калибровки записываются в ПЗУ. В рабочем режиме эталонный промежуток времени увеличивается на время  $\Delta T$ , затем сравнивается число импульсов  $N_{\text{калибр}}$  и число импульсов в рабочем режиме  $N_{\text{раб}}$ . Условие  $N_{\text{раб}} < N_{\text{калибр}}$  (что соответствует аварийной ситуации) выполняется при определенном изменении температуры и напряжения питания в точке кристалла СБИС, где конструктивно находится конкретный рабочий импульсный датчик. На рис. 2 показана пограничная кривая СД, соответствующая уменьшению частоты импульсного датчика на 20 % от номинальной при температуре  $T_{\text{ном}} = +85$  °C и напряжении питания  $V_{\text{sup ном}} = +1$  В. на Таким образом, аварийная ситуация может наступить при анализе комплексного показателя "температура—напряжение питания", например, в точке А при температуре +116 °C и напряжении питания +0,9 В, или в точке В при перегреве до температуры



Рис. З.Функциональная схема блока мониторинга в режиме калибровки



Рис. 4. Функциональная схема блока мониторинга в рабочем режиме



Рис. 5. Сигналы блока мониторинга

+130 °С и "просадке" напряжения до +0,95 В. Как следует из таблицы, увеличение интервала  $\Delta T$  может быть в первом приближении одинаковым для различных технологических процессов. Погрешность определения аварийной ситуации составит не более нескольких процентов.

Сложнофункциональный блок (СФ-блок) мониторинга состояния СБИС построен на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с промежуточным преобразованием во временной интервал, в котором эталонный временной интервал, формируемый частотой синхронизации СБИС на основе, как правило, кварцевого генератора, заполняется импульсами выходной частоты импульсного датчика с последующим подсчетом. Работа блока мониторинга состоит из двух основных циклов: цикла или режима калибровки и рабочего цикла.

Функциональная схема СФ-блока мониторинга в режиме калибровки приведена на рис. 3. Счетчик в течение эталонного интервала времени калибровки подсчитывает импульсы выходной частоты калибровочного датчика, который расположен в "холодной" области кристалла СБИС, т. е. области, которая практически не перегревается относительно окружающей среды. Полученный результат в виде двоичного кода записывается через регистр во внутреннее или внешние ПЗУ.

В рабочем режиме (рис. 4) формируется эталонный рабочий интервал. Эталонный рабочий интервал заполняется импульсами выходной частоты одного из рабочих датчиков, который расположен в интересующей области СБИС. Полученный двоичный код сравнивается с кодом, записанным в ПЗУ с помощью цифрового компаратора. Если рабочий код меньше, чем калибровочный, вырабатывается аварийный сигнал. В этом случае принимаются меры по стабилизации работы СБИС, например уменьшается рабочая частота части СБИС, в которой обнаружено превышение допустимых условий.

На рис. 5 показаны результаты моделирования в среде САПР Саdence — сигналы формирования эталонного интервала для режима калибровки и для рабочего режима. Длительность эталонного интервала в рабочем режиме (сигнал WR) примерно на 16 % больше, чем его же длительность в режиме калибровки.

В результате моделирования СФ-блока мониторинга в режиме калибровки (см. рис. 3) при условиях T = 85 °С и  $V_{sup} = 1$  В был получен восьмиразрядный двоичный код для дальнейшего сравне-

ния  $N_{\rm этал} = 1101000$  (208), что составляет около 80 % от полной шкалы АЦП. Код получен путем подсчета импульсов с частотой  $F_{\rm калиб} = 4,27$  МГц от эталонного импульсного датчика (сигнал I56/net11). Во время рабочего периода моделирование проводили при условиях T = 120 °С и  $V_{\rm sup} = 1$  В. Измеренный код  $N_{\rm pa6} = 11001101$  (205). Код получен путем подсчета импульсов с частотой  $F_{\rm pa6} = 3,61$  МГц от одного из рабочих импульсных датчиков.  $N_{\rm pa6} < N_{\rm этал}$ , поэтому цифровой компаратор срабатывает, что свидетельствует об аварийном, в соответствии с выбранными критериями, состоянии части СБИС, которая подвергается мониторингу.

Проведенные исследования СФ-блока мониторинга показали эффективность использования импульсного датчика для проведения мониторинга по выбранным критериям — температуре и напряжению питания.

Разработанное устройство можно с успехом использовать для мониторинга состояния СБИС типа "система на кристалле", например в многоядерных микропроцессорах.

#### Список литературы

1. Leng Y., Zhao G., Li Q., Sun C., Liu S. A High Accuracy Signal Conditioning Method and Sensor Calibration System for Wireless Sensor in Automotive Tire Pressure Monitoring System // Proc. WiCOM. Sept. 2007. P. 1833–1837

2. Verma N., Chandrakasan A. A 256 kb 65 nm 8T Subthreshold SRAM Employing Sense-Amplifier Redundancy // IEEE J. Solid-State Circuits. Jan. 2008. Vol. 43, No. 1. P. 141–149,

3. **Yu-Shiang Lin.** Low power circuits for miniature sensor system. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Electrical Engineering) in The University of Michigan. 2008.



# Применение МНСТ

УДК: 53.087:537.621.2

В. А. Беспалов, д-р техн. наук, проф., первый проректор, Н. А. Дюжев, канд. физ.-мат. наук, нач. отд., А. С. Юров, канд. техн. наук., нач. лаб., М. Ю. Чиненков, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: chinenkov@inbox.ru, H. С. Мазуркин, инженер, Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МИЭТ", г. Москва

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ НАНОСТРУКТУР В ДАТЧИКАХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

### Поступила в редакцию 19.08.2013

Рассматриваются пути применения магниторезистивных наноструктур на основе анизотропных пленок пермаллоя Ni (80%) Fe (20%) в автомобильных датчиках. Чувствительный элемент датчиков представляет собой четыре магниторезистора в форме меандра, соединенных в мостовую схему. Характерная толщина слоя пермаллоя в экспериментальных образцах магниторезисторов составляет 50...100 нм. Приводятся характеристики экспериментальных образцов чувствительных элементов. Показана возможность использования подобных чувствительных элементов для построения датчиков оборотов и углового положения.

**Ключевые слова:** анизотропное магнитосопротивление, магниторезистор, МЭМС, НЭМС, датчик оборотов, датчик углового положения

### Введение

По мере развития технологий в наноразмерных диапазонах все большую актуальность приобретают эффекты, связанные с магнитными свойствами вещества [1, 2]. Магнитные материалы обеспечили решение многих технических и технологических задач в современном мире. Электронные структуры на основе магнитных материалов, в частности ферромагнетиков, нашли применение в компьютерной технике, электротехнике и радиотехнике, технике CBЧ, магнитной памяти, банковских карточках и во многих других областях. Одним из эффектов, который обеспечивает перспективное использование магнитных структур, является изменение электросопротивления в магнитном поле, т. е. магниторезистивный эффект [3]. Анизотропное магнитосопротивление — квантовомеханический эффект, заключающийся в изменении электросопротивления ферромагнитных материалов в зависимости от приложенного внешнего магнитного поля. Анизотропное магнитосопротивление описывается следующим выражением:

$$\delta_H = \frac{R(H) - R(0)}{R(H)},\tag{1}$$

где  $\delta_H$  — относительное изменение электросопротивления; R(0) — электросопротивление при отсутствии магнитного поля; R(H) — электросопротивление при включении магнитного поля с напряженностью H. Изменение электросопротивления связано с тем, что электроны со спином, параллельным намагниченности, слабо рассеиваются в магнитном слое и, следовательно, создают большую часть электрического тока. Наоборот, электроны со спином, антипараллельным намагниченности, рассеиваются сильно и вносят меньший по значению вклад в электрический ток.

Открытие эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС) в ферромагнитных многослойных структурах [4-6] дало толчок развитию теории транспортных свойств магнитных многослойных структур [7], а также его различным приложениям в разработке магнитосенсорных устройств, перспективных, в частности, для применения в микроэлектромеханических системах (МЭМС) [8]. Объяснение эффекта ГМС связывается со спин-зависимым эффектом рассеяния на граничных поверхностях слоев [9] и особенностями потенциального рельефа для мажорных и минорных электронов в слоистой структуре. В последние годы было установлено, что в многослойных структурах значительный вклад в ГМС вносит также интерференция электронных волн, отраженных от внешних и внутренних границ интерфейсов — поверхностей, разделяющих магнитные и немагнитные слои. Эти эффекты наблюдались как для электрического тока в плоскости слоев, так и для тока, протекающего перпендикулярно плоскости слоев [10]. ГМС осциллирует с толщиной слоев вследствие запирания электронов в стенках, образованных потенциальными барьерами на интерфейсах. Средняя длина свободного пробега электронов в интерфейсах оказывается также неодинаковой для различных ориентаций спина (например,  $\lambda_{\uparrow} \approx 2,0$  нм, а  $\lambda_{\downarrow} \approx 0,4$  нм). Интерфейсы действуют как спиновые фильтры, пропускающие электроны проводимости только с одной поляризацией. Особенно ярко этот эффект проявляется на интерфейсах мультислоев Fe/Cr и Со/Си [11], что объясняется резонансными состояниями в интерфейсах. Также в настоящее время активно исследуют спин-туннельные многослойные магнитные структуры (ТМС), имеющие значительно большее магнитосопротивление [12].

Основными актуальными задачами разработки магниточувствительных устройств и первичных преобразователей на основе магниторезистивных структур являются повышение их чувствительности, термостабильности, а также миниатюризация. Повысить чувствительность магниторезистивной структуры можно, в частности, путем выбора подходящей геометрической формы магниточувствительного элемента. Вариация формы и соотношения размеров элементов влияют на характеристики намагничивания и динамический диапазон сенсоров, а также на область их максимальной чувствительности к магнитному полю.

## Конструкция и изготовление сенсорной магниторезистивной наноструктуры

Основным элементом магниторезистивной наноструктуры является магниторезистор (рис. 1), представляющий собой ферромагнитную тонкую пленку пермаллоя толщиной 50 нм и состава 80 % Ni, 20 % Fe, имеющего значение анизотропного магниторезистивного эффекта, равное ~2 %.

Состав интегральной структуры магниторезистора (см. рис. 1, б)

№ поз.	Материал	Толщина, мкм
1	Si	460
2	SiO <sub>2</sub>	0,6
3	Пермаллой (80 % Ni 20 % Fe)	0,05
4	Al	0,6

Изготовление магниторезисторов проходит по технологическому маршруту, состоящему из следующих стандартных процессов: напыление магнитного слоя и проводящего слоя; фотолитографическое травление этих слоев; сборка и корпусирование. На ферромагнитной пленке методом фотолитографии сформирован рисунок магниторезисторов в виде длинных полосок [13]. На этот слой нанесен слой алюминия, на котором также фотолитографией сформирован рисунок контактов и полосок, расположенных под углом 45° к длинной оси пермаллоевых магниторезисторов. Толщина пермаллоевого слоя составляет 50 нм, толщина алюминия — 0,6 мкм. В качестве подложки используется пластина кремния. Пермаллоевая пленка характеризуется полем анизотропии и размагничивающим полем, которое зависит от геометрических размеров пленки. Ось легкого намагничивания (ось анизотропии) пермаллоя в процессе изготовления ориентируется вдоль длинной оси магниторезисторов.

Сопротивление пермаллоевого магниторезистора без полосок алюминия зависит от угла  $\alpha$  между вектором намагниченности M под влиянием внешнего магнитного поля H и направлением тока I в магниторезисторе и имеет вид

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2 \alpha, \qquad (2)$$



Рис. 1. Магниторезистор с алюминиевыми полосками [13]:

*а* — планарное представление магниторезистора; *б* — интегральное представление магниторезистора; описание обозначенных материалов приведено в таблице



Рис. 2. Электрический ток в магниторезисторе с алюминиевыми полосками

где  $R_0$  — сопротивление магниторезистора в отсутствии поля;  $\Delta R$  — изменение сопротивления магниторезистора в магнитном поле.

Для расчета электрического сопротивления в магниторезистивной структуре с заданной распределенной электропроводностью  $\sigma = \sigma(x, y)$  решается задача о распределении электрического поля:

$$\mathbf{E}(x, y) = -\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}\right), \tag{3}$$

где **Е** — напряженность электрического поля;  $\phi(x, y)$  — электрический потенциал. При этом должно выполняться уравнение сохранения заряда

$$\partial j_x / \partial x + \partial j_v / \partial y = 0, \tag{4}$$

в котором  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$  — ток с соответствующими граничными условиями для потенциала. Граничные условия для протекания тока в неограниченной периодической структуре — сохранение нормальной компоненты тока и тангенциальной электрического поля на границе сред  $\mathbf{J}_{n1} = \mathbf{J}_{n2}$ ,  $\mathbf{E}_{t1} = \mathbf{J}_{t1}/\sigma_1 = \mathbf{J}_{t2}/\sigma_2 = \mathbf{E}_{t2}$ . Средняя поперечная составляющая тока должна отсутствовать, поэтому  $d_1\mathbf{J}_{t1}\cos\varphi + d_2\mathbf{J}_{t2}\cos\varphi =$  $= d_1\mathbf{J}_{n1}\sin\varphi + d_2\mathbf{J}_{t2}\sin\varphi$ , где  $d_{1,2}$  ширина полосок алюминия. Изменение направления протекающего тока показано на рис. 2.

Сопротивление магниторезистора с алюминиевыми полосками описывается выражением

$$R = R_0 + \frac{\Delta R}{2} - \Delta R \left(\frac{H}{H_0}\right) \sqrt{1 - \frac{H^2}{H_0^2}}.$$
 (5)

Форма магниторезистора — сплошная пленка или полосковая форма влияет на зависимость сопротивления от магнитного поля (рис. 3).

В случае сплошной пленки характеристика является четной, в случае же полосковой формы характеристика становится нечетной.

Конструкция магниторезистивной структуры представляет собой четыре магниторезистора, включенных в мостовую схему (рис. 4). Особенность такой конструкции такова, что при воздействии на структуру внешнего планарного магнитного поля происходит изменение сопротивления всех магниторезисторов моста, причем за счет того, что полоски алюминия на магниторезисторах одного



Рис. 3. Зависимость сопротивления от магнитного поля [13]. Пунктирной кривой показано сопротивление магниторезистора без алюминиевых полосок, сплошной кривой — сопротивление магниторезистора с алюминиевыми полосками



гис. 4. изготовленная магниторезистивная структура, представ ленная мостовой схемой

плеча моста в них расположены под углами 45 и 135°, суммарное изменение сопротивлений резисторов в одном плече моста приводит к увеличению выходного сигнала моста в 4 раза по сравнению с выходным сигналом моста при изменении одного резистора.

Разработанная технология напыления магнитных слоев позволила получить магнитные пленки состава 20 % Fe, 80 % Ni со значением анизотропного магниторезистивного эффекта 2 %. На основе этих слоев были изготовлены магниторезистивные структуры, представляющие собой четыре магниторезистора с наклонными полосками из алюминия, соединенными в мостовую схему. Структуры имели различные геометрические размеры и различались шириной магниторезистора (30 и 40 мкм), а также шагом расположения алюминиевых полосок. Это позволило получить на одной и той же пленке пермаллоя структуры с различной чувствительностью. В частности, структуры с шириной пермаллоевой полосы 40 мкм и шагом наклонных полосок 15 мкм имеют чувствительность 8,8 мВ/В(кА/м), тогда как структуры с шириной пермаллоевой полосы 30 мкм и шагом 6 мкм имеют чувствительность 3,32 мВ/В(кА/м). Типичный вид передаточной характеристики структуры показан на рис.5.



туры (H = 1 кА/м,  $U_{IIIIT} = 5$  В): кривая 1 - прямой ход; кривая 2 - обратный ход

Измеренные значения чувствительности магниторезистивных структур достигают 8,5 мВ/В/(кА/м). Передаточная характеристика структур имеет линейный участок, причем его длина существенно зависит от значения поля подмагничивания в плоскости в направлении оси легкого намагничивания, т. е. вдоль магниторезистора. Это хорошо иллюстрируется графиком на рис. 6, где показана передаточная характеристика структуры при различных полях подмагничивания. Из него следует, что увеличение поля смещения уменьшает чувствительность, но при этом удлиняется линейный участок характеристики, что позволяет увеличить диапазон измерения магнитного поля.

Важной характеристикой датчиков является разбаланс мостовой схемы. Значение начального разбаланса магнитной системы определяется дву-мя факторами, а именно:

1) технологическим разбалансом магниторезистивной структуры, определяемом точностью подгонки резисторов моста,  $U_{\rm or}$ .

2) точностью установки постоянного магнита,  $U_{\rm om}$ .

Последнее обстоятельство имеет большое значение при определении области работоспособности датчика в целом. Следует отметить, что обе эти составляющие разбаланса зависят от температуры. Таким образом, для обеспечения устойчивой работы в широком диапазоне внешних воздействий,



Гис. 6. Передаточная характеристика магниторезистивно структуры при различных полях смещения  $H_x$ : кривая 1 - 2 кА/м; 2 - 3.5 кА/м; 3 - 10 кА/м

прежде всего температур, необходимо обеспечить минимальное значение начального разбаланса магнитной системы.

### Датчики оборотов и углового положения на основе магниторезистивной наноструктуры

Все известные методы измерения скорости автомобиля и прочих функциональных характеристик основаны на преобразовании частоты вращения вала и других параметров в электрические импульсы. Ниже показана возможность использования магниторезистивных структур для реализации поставленных задач измерения числа оборотов и углового положения. Схемотехническое решение подобных датчиков предполагает, что сигнал с магниторезистивной структуры должен предварительно усиливаться. Далее в зависимости от назначения датчика должно происходить формирование порогового либо аналогового сигнала. В датчиках оборотов и углового положения, являющихся пороговыми, аналоговый сигнал с магниторезистивной структуры, который составляет порядка десятков милливольт, подается сначала на вход усилителя, где он усиливается до значения около 1 В, а затем на вход компаратора напряжения, который и формирует пороговый сигнал. Датчик оборотов конструктивно представляет собой магниторезистивную структуру, которая установлена на печатную плату. С обратной стороны печатной платы на магниторезистивную структуру установлен постоянный магнит смещения, выполненный из феррита 25БА170. Кроме того на печатной плате размещены элементы электронной схемы формирования сигнала, в частности, усилитель, компаратор и триггер Шмитта, которые обеспечат необходимый выходной сигнал.

Датчик углового положения конструктивно также представляет собой магнитную систему, включающую в себя магниторезистивную структуру в корпусе SO-8, на которую установлен постоянный магнит смещения. Эта магнитная система, в свою очередь, установлена на печатную плату с электронными элементами, составляющими схему усиления и формирования сигнала. Таким образом, конструктивно датчики оборотов и углового положения будут состоять из двух сборок, одна из которых представляет собой сборку магниторезистивной структуры и постоянного магнита смещения, а другая — печатную плату с электронными компонентами.

Для регистрации частоты вращения зубчатого ротора магнитная система должна быть ориентирована полюсом магнита к торцам зубьев. Однако такое расположение магнитной системы неприемлемо для регистрации углового положения, поскольку сигнал от каждого зуба не будет пропорционален угловой протяженности отметчика. Задача регистрации углового положения требует точного определения в пространстве положения предмета из ферромагнитного материала, в частности отметчика, устанавливаемого на распределительном валу двигателя, при этом датчик должен точно отследить момент подхода отметчика к рабочему торцу датчика и момент его удаления, т. е. длительность импульса датчика должна соответствовать протяженности отметчика. Для этой цели магнитная система должна быть расположена боковой гранью в сторону отметчика.

При измерении магниторезистивных структур в качестве регистратора положения феррогмагнитного отметчика исследуемый образец помещается на стенд и фиксируется с помощью винта. На образец подается напряжение 5 В. Приводится в движение ферромагнитный отметчик. Данные с выхода магниторезистивной структуры поступают на осциллограф Актаком АСК-2035. На полученной осциллограмме получено значение максимума пика  $U_p$ , образующегося при прохождении ферромагнитного отметчика рядом с магниторезистивной структурой.

Для регистрации частоты вращения в датчиках скорости используется стальной зубчатый ротор, зубья которого утоплены в пластмассовом ободе, т. е. они не выступают за его пределы. Это существенно усложняет процесс контроля скорости,





поскольку зубья ротора не имеют собственного магнитного поля. В связи с этим процесс измерения сводится к регистрации не самого магнитного поля как такового, а к определению его изменений, создаваемых присутствием ферромагнитных элементов ротора, на фоне некоторого поля смещения, которое может быть создано постоянным магнитом или электромагнитом. Наиболее целесообразным является использование именно постоянного магнита, как наименее энергозатратного. Магниторезистивную структуру на постоянный магнит устанавливают таким образом, чтобы начальный разбаланс моста изменился минимальным образом. Тогда при появлении в поле магнита смещения ферромагнитного предмета на фоне этого разбаланса будет происходить изменение выходного сигнала, обусловленное именно присутствием ферромагнитного предмета.

Увеличение начального разбаланса магнитной системы приводит к искажению формы выходного сигнала. Это выражается в том, что появляется постоянный уровень сигнала и искажается его форма. В результате появляется постоянный уровень на входе электронной схемы обработки и усиления сигнала. При фиксированном уровне срабатывания, который задается на входных цепях, при определенных значениях разбаланса возникает ситуация, когда уровень срабатывания будет близок к нему по значению, что приведет к смещению рабочей точки датчика и сужению области работо-



Рис. 8. Сенсор угла поворота 0-180° (± 90°)

способности, а при достаточно больших значениях и к полной ее потере.

Значение начального разбаланса магнитной системы определяется двумя факторами:

1) технологическим разбалансом магниторезистивной структуры  $U_{\rm ot}$ , определяемым точностью подгонки резисторов моста;

2) точностью установки постоянного магнита,  $U_{\rm OM}$ .

Последнее обстоятельство имеет большое значение при определении области работоспособности датчика в целом. Следует отметить, что обе эти составляющие разбаланса зависят от температуры. Таким образом, для обеспечения устойчивой работы в широком диапазоне внешних воздействий, прежде всего температур, необходимо обеспечить минимальное значение начального разбаланса магнитной системы.

Исследования температурной зависимости структур показывают достаточно высокую термостабильность, что хорошо видно из графиков на рис. 7. Чувствительность при T = 20 °C составляет — 1,0 мВ/В(кА/м), тогда как при T = +150 °C она равна 0,8 мВ/В(кА/м), при T = -60 °C — 1,2 мВ/В(кА/м).

Была также изготовлена магниторезистивная структура, позволяющая измерять угол поворота магнитного поля от 0 до  $180^{\circ}$  ( $\pm 90^{\circ}$ ) и представляющая собой две магниторезистивные структуры, повернутые друг относительно друга на  $45^{\circ}$  (рис. 8).

Передаточная характеристика этого сенсора представляет собой два сигнала:  $sin\alpha$  и  $cos\alpha$ , где  $\alpha$  — угол поворота магнитного поля (рис. 9).



кривая  $1 - сигнал \cos\alpha$ ; кривая  $2 - сигнал \sin\alpha$ 

### Заключение

В ходе проделанной работы показано, что чувствительный элемент, выполненный на основе магниторезистивных наноструктур, позволяет детектировать изменение внешнего магнитного поля. Полученные значения чувствительности достигают 8,8 мВ/В(кА/м), что обеспечивает возможность разработки датчика оборотов и углового положения на основе магниторезистивных наноструктур.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы" ГК 14.513.11.0115.

### Список литературы

1. Вонсовский С. В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1032 с. 2. Coey J. Magnetism and magnetic materials. Cambridge University Press, 2010. 633 p.

3. **Spaldin N.** Magnetic materials. 2nd ed. Cambridge University Press, 2011. 290 p.

4. **Baibich M. N., Broto, J. M., Fert A.** Giant magnetoresistive of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices // Physical Review Letters. 1988. Vol. 61. P. 2472–2475.

5. Binasch G., Grunberg P., Saurenbach F. // Physical Review B. 1989. Vol. 39. P. 4828.

6. **Ферт А.** Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физических наук. 2008. Т.178. № 12. Р. 1336.

7. Swagten H. J. M. Spin-dependent tunneling in magnetic junctions // Handbook of magnetic materials. Amsterdam: Elsevier, 2008. P. 1–121.

8. Freitas P. P., Ferreira R., Cardoso S. Magnetoresistive sensors // J. Physics: Cond. Matt. 2007. Vol. 19. P. 165221.

9. Vedyayev A., Zhukov I., Dieny B. Current perpendicular to plane giant magnetoresistance in laminated nanostructures. // J. Magn. Magn. Mat. 2005. Vol. 290. P. 1050–1052.

10. Ведяев А. В. Угловая зависимость гигантского магнетосопротивления для тока, перпендикулярного плоскости слоев магнитного сэндвича // Физика твердого тела. 1999. Т. 41. С. 1814—1818.

11. **Mancoff F. B., Russek S. E.** Spin-current-induced magnetotransport in Co-Cu-Co nanostructures. // IEEE Trans. Magn. 2002. Vol. 38. P. 2853–2855.

12. **Parkin S., Jiang X., Kaiser C.** Magnetically engineered spintronics sensors and memory // Proc. of the IEEE. 2003. Vol. 91. P. 661–680.

13. **Dibbern U.** Magnetoresistive Sensors // Sensors. 1989. Vol. 5. P. 341–380.

## CONTENTS

Kartashev V. A., Kartashev V. V. Interpretation of STM Measurements with Using Tip Geometry .....2 STM measurement errors are caused by peculiarities probe movement system and motion control system. As result on the measured nanorelief picture can appear some objects that are absent in reality. Interpretation of STM measurements with using tip geometry prevents appearance of such objects. Tip geometry calculation method was developed in previous papers. The paper discusses results of tip geometry applying to graphical interpretation of measurements of nanorelief patches with great surface inclinations.

**Keywords:** probe microscopy, tunneling microscope, interpretation of STM measurements, probe tip shape

Uvarov I. V., Naumov V. V., Amirov I. I. Fabrication Features of Metallic Cantilevers with Nanometer The fabrication procedure of metallic nanocantilevers is presented. Cantilevers had a three-layer structure and were fabricated in two types: Cr/Al/Cr and Ti/Al/Ti. The cantilever thickness was 40, 80 and 120 nm, length-to-thickness ratio reached 2500. The release of cantilevers was performed by etching the sacrificial layer in SF<sub>6</sub> plasma. In the fabrication of Cr/Al/Cr cantilevers vacuum thermal annealing was used. For Ti/Al/Ti cantilevers the most important point was the selection of the release conditions.

Keywords: nanoelectromechanical systems, nanocantilever, fabrication, plasma etching, residual stress, thermal annealing, surface

Vasil'ev V. A., Orehov D. O., Chernov P. S. Modern Methods of Modelling Nano- and Microdimensional The paper is devoted to the modern methods of nano- and microstructures modeling. Review of the modern simulation methods of such systems is given, as well as several fields of their practical use. The results of numerical simulation of some systems are presented.

**Keywords:** nano- and microstructures, nano- and microelectromechanical systems, modeling and simulation, mathematical techniques, quantum physics, classical physics

Vekshin M. M., Culish O. A., Yakovenko N. A. Polarization Conversion in Weak-Guided Optical Waveguide A new method for construction passive integrated-optic polarization rotators, based on weak-guided glass waveguides, is proposed. The calculation results are presented, which, with the application of effect of hybrid mode beating, prove the proposed working principle of polarization rotator, and the samples of rotators have been fabricated. The measured efficiency of TM-TE conversion is 95 %.

**Keywords:** integrated optics, optical waveguide, polarization rotator, hybrid mode

Samoylovich M. I., Rinkevich A. B., Bovtun V., Belyanin A. F., Kempa M., Nuzhnyy D., Klescheva S. M., Savinov M. Optical and Dielectric Properties of Opal Matrices with Included Eulytine  $(Bi_4(SiO_4)_3)$  in Inter-

The composition, structure and properties of nanocomposites samples are studied on the basis of lattice packing  $SiO_2$  nanospheres (opal matrices) with included clusters of crystalline phase of eulytine (Bi<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) in interspherical nanospacing.

Keywords: nanocomposites, opal matrix, eulytine, X-ray diffractometry, Raman spectroscopy dielectric properties

Vyatkin A. F., Matveev V. N., Volkov V. T., Kononenko O. V., Levashov V. I., Eremenko V. G., Amelichev V. V., Kostyuk D. V., Khodos I. I. Multilayer Nanostructures with the Effect of a Giant Magnetore-The quantum-mechanical effect of a giant magnetoresistance (GMR) has been observed in a number of multilayer magnetic materials. The multilayered structure, in which exhibit this effect, consist of consistently deposited thin ferromagnetic layers separated by a conducting non-magnetic layer. Magnetic characteristics of such materials depend on the structure of the deposited layers, the states of interfaces between the layers and to a large extent from non-magnetic layer, the thickness of which requires a high degree of accuracy. In this paper the structures of Ta— NiFe—Cu—Co—FeMn—Ta were fabricated and investigated using electron-beam and laser deposition, transmission electron microscopy and atomic force microscopy. By optimizing the thickness of the copper separation layer it was possible to raise the value of GMR up to 5 % in the longitudinal field 10–20 Oe. **Keywords:** multilayer nanostructures, effect of a giant magnetoresistance

Milovanov R. A., Kelm E. A., Kosichkin O. A., Lyapunov N. A. Selective Etching of IC Copper Interconnects One of the stages of microchips failure analysis is to remove layers of conductors. In case of IC copper interconnects, the basic etching requirement is selectivity to the diffusion-barrier layer that provides complete removal of conductors layer without damaging the underlying layer. This paper discusses approaches to selectivity etching copper conductors by using methods of wet and dry etching. The results showed an example of crystals FPGA Virtex-4 f. XILINX.

**Keywords:** failure analyses, IC interconnects, copper, wet etching, dry etching, diffusion-barrier layer Savruk E. V., Smirnov S. V. Formation of the Light-Scattering Microrelief on the Surface of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic The results of research of light-scattering microrelief that were made by laser treatment of the surface of ceramic substrates are given. It is shown that laser microstructuring of substrates surface improves the luminous efficacy of LED modules for 10-15 %.

Keywords: light-scattering microrelief, microstructuring, LED module

Abdullaev D. A., Zaitsev A. A., Kelm E. A., Milovanov R. A. Ion Beam Etching, an Intermediate Stage of The paper presents the results of a series of experiments on removal of the passivation VLSI with intermediate planarization of micron relief by ion-beam etching technology in the failure analysis. The optimum parameters for planarization micron relief.

**Keywords:** ion-beam etching (IBE), plasma reactive-ion etching (RIPT), planarization of micron relief VLSI, technology failure analysis

Mukhurov N. I., Efremov G. I., Zhvavyi S. P. Electrostatic Micro Switches. Part 2. Closing Micro Switches Constructive of torsion structures electrostatic micro switches carried out. Mechanoelectrical actuators are offered, their features and advantage are shown. Formulas of effective calculation of critical parameters are received. **Keywords:** electrostatic closing micro switches, torsion structures, mechanoelectrical actuator, calculated formulas of critical parameters.

This paper describes the multichannel IP-block of collecting and processing of summarized information on temperature and supply voltage in separate parts of VLSI, in particular multinuclear microprocessor systems is presented. **Keywords:** reliability of VLSI, analog to digital convertor, temperature sensor

Bespalov V. A., Djujiev N. A., Yurov A. S., Chinenkov M. Yu, Mazurkin N. S. Sensor Application Features One of the effects which provides a promising use of magnetic structures is a magnetoresistive effect. The main urgent problems of the magnetic devices and primary conventers development based on the magnetoresistive structures are the sensitivity improvement, thermal stability as well as miniaturization. This paper discusses how to use the magnetoresistive nanostructures based on nanoscale films of permallov Ni (80 %) Fe (20 %) in the sensory systems. The influence of the initial imbalance of the magnetic nanosystem which includes the magnetoresistive structure and a permanent magnet on the value and shape of the output signal was studied. It is shown that the increase of the initial imbalance of the magnetic system leads to a distortion of the output signal. In the course of this work it is shown that the sensor element based on the magnetoresistive nanostructures allows to detect the external magnetic field change. It is shown that the variation of the shape and size ratio of magnetoresistive elements influences the characteristics of the magnetization and the dynamic range of the sensors, as well as their range of maximum magnetic field sensitivity.

**Keywords:** magnetoresistance, magnetoresistor, MEMS, magnetoresistive sensor

### 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 Professor Petr P. Maltsev, Deputy of Editor-in-Chief Professor Victor V. Luchinin (Russia), Deputy Editor-in-Chief Professor Michael S. Shur (USA) ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.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 Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 17.09.2013. Подписано в печать 23.10.2013. Формат 60×88 1/8. Заказ MC1113.

Пена логоворная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.