№ 1 (114) **♦** 2010

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.

Зам. гл. редактора Лучинин В. В.

Редакционный совет:
Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Волчихин В. И.
Гапонов С. В.
Захаревич Б. Г. Калдер И А
Кварлаков В В
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Нарайкин О. С.
Никитов С. А.
Сауров А. Н.
Сереоряников С. Б.
Чаплыгин Ю. А.
Шахнов В. А.
Шевченко В. Я.
Редакционная коллегия:
Абрамов И. И.
Андриевский Р. А.
Антонов Б. И.
Арсентьева И. П.
Быков В А
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
KUJUUB IO. P.
Moknob E. A
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петрунин В. Φ .
Путилов А. Б. Пятышев F Н
Стриханов М. Н.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тимошенков С. П.
Тодуа II. А.
пударев Б. А.
Отв. секретарь
Лысенко А. В.
Редакция:

Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Учредитель:

Издательство "Новые технологии" СОДЕРЖАНИЕ

Издается с 1999 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Беляева А. О., Солнцев В. А. Моделирование диффузионных процессов через барьерное покрытие в полупроводниковые ветви термоэлектрических модулей Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавый С. П. Конструктивные варианты элек-	2
тростатических торсионных микросканеров с оптимизированными функцио- нальными параметрами	7
Егоров В. В. Вопросы моделирования многомерных нано- и микроструктур.	15
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ	
Тарнавский Г. А. Имплантация легирующих примесей в подложку кремния с непланарной поверхностью	21
Аверин И. А., Аношкин Ю. В., Печерская Р. М. Исследование поверхностей слоев резистивных структур на низкоразмерном уровне	25
ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ	
Распопов В. Я., Иванов Ю. В., Малютин Д. М., Алалуев Р. В., Погорелов М. Г., Шведов А. П., Лихошерст В. В., Товкач С. Е. Информационно-измерительные микросистемы для подвижных объектов	27
Боронахин А. М., Иванов П. А., Суров И. Л. Исследование погрешностей триа- ды микромеханических гироскопов с использованием малогабаритного двухос-	
ного стенда	35
Пивоненков Б. И., Школьников В. М. Одно- и трехкомпонентные пьезорези-	42
Тимошенков С. П., Калугин В. В., Шалимов А. С., Анчугин С. А., Морозова Е. С.	12
Двухканальный емкостной преобразователь ускорений	46
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	
Потапов А. А. Расчет прочности связи гомоядерных молекул, образуемых ато- мами I группы таблицы Д. И. Менделеева	49
Contents	55
Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находя в свободном доступе на сайтах журнала (http://www.microsystems.ru) и научной электрон библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ", а с 2004 г. — в разделе "АРХИ	ится ной на 1В".
ΠΟΔΠИСКА: Адрес аля переписки: • по каталогу Роспечати (индекс 79493); Адрес аля переписки: • по каталогу "Пресса России" (индекс 27849) e-mail: nmst@novtex.ru • в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10) 6	

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2010

Моделирование и конструирование МНСТ

УДК 519.6

А. О. Беляева, аспирант, В. А. Солнцев, инженер, e-mail: lc-s@mail.ru, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЧЕРЕЗ БАРЬЕРНОЕ ПОКРЫТИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЕТВИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Проведено двухэтапное математическое моделирование диффузионных процессов, протекающих в термоэлектрическом модуле. На первом этапе разработана математическая модель процессов диффузии материалов многослойной конструкции полупроводниковой ветви, барьерного покрытия и припаянного медного проводника без учета дефектов данных материалов. На втором этапе разработана математическая модель с учетом дефектности материалов данной многослойной конструкции. Получены результаты математического моделирования, которые показали, что именно степень дефектности слоев барьерного покрытия в большей степени влияет на скорость протекания процессов диффузии, нежели тип материала барьерного покрытия.

Ключевые слова: математическое моделирование, термоэлектричество, термоэлектрические модули, полупроводник, эффект Пельтье, теллурид висмута, надежность по постепенным отказам, диффузионные процессы

Введение

Термоэлектрические модули (ТМ), работающие на эффекте Пельтье, представляют собой совокупность термопар, соединенных между собой последовательно по току и параллельно по потоку теплоты (рис. 1). Термопара представляет собой две ветви полупроводника *n*- и *p*-типа. Термопары помещают между двух керамических пластин. Ветки напаивают на медные проводящие площадки (шинки), которые крепят к специальной теплопроводящей керамике, например из оксида алюминия. Число термопар может варьироваться в широких пределах — от нескольких единиц до нескольких сотен, что позволяет создавать ТМ с холодильной мощностью от десятых долей ватта до сотен ватт. Наибольшую термоэлектрическую эффективность среди промышленно используемых для изготовления TM материалов имеет теллурид висмута, в который для получения необходимого типа и параметров проводимости добавляют специальные присадки, например селен и сурьму.

ТМ нашли широкое применение в таких областях, как медицина, электроника, транспорт, космос и авиация, телекоммуникации и бытовые приборы.

В настоящее время актуальной является проблема повышения надежности работы TM, так как это один из главных сдерживающих факторов развития рынка термоэлектрических модулей в России и за рубежом.

Потеря работоспособности ТМ происходит вследствие появления отказов, которые подразделяют на внезапные и постепенные. Причинами внезапных отказов являются механические повреждения, температурные перегрузки и электрический пробой. Причинами постепенных отказов являются старение контактов вследствие воздействия термоциклического фактора, диффузия припоя и меди в полупроводник, отслаивание припоя и т. д., а как следствие, повышение электросопротивления, снижение вырабатываемой мощности или холодопроизводительности.

Внезапные и постепенные отказы, связанные со старением контактов, в настоящее время возможно устранить технологическими методами, например подбором материала, а также путем правильной эксплуатации TM.

Таким образом, доминирующей причиной возникновения постепенного отказа, и как следствие снижением надежности ТМ, является диффузия материала припоя (Sn) и проводника (Cu) в полупроводник (Bi₂Te₃) во время работы ТМ, что изменяет химический состав полупроводника. Этот процесс приводит к изменению структуры (легированию)





- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 1, 2010 -

полупроводника и пара полупроводниковых термоэлектрических элементов *p*- и *n*-типа начинает работать как простой проводник, следовательно, эффект Пельтье не возникает. Таким образом, со временем выходят из строя *l*-е число термоэлектрических пар, значения параметров холодопроизводительности или мощности TM достигают предельного значения, и TM теряет свою работоспособность.

Предварительные исследования показали, что наиболее чувствительным элементом к легированию является полупроводник *n*-типа. Уже при 0,005 % концентрации легирующей примеси (в данном случае олова или меди) в полупроводнике происходят необратимые изменения его структуры и термоэлектрических свойств [1]. Таким образом, критерием отказа полупроводниковой ветви, а следовательно, и термопары в целом, будет достижение предельной концентрации меди или олова (насыщения) в полупроводниковой ветви *n*-типа. Кроме того, проведенные ранее исследования показали, что еще одним параметром изменения структуры полупроводника является выход теллура из ветви. Следовательно, подробное изучение процессов диффузии меди и олова в полупроводниковые элементы, и диффузии теллура из элементов *n*-типа является наиболее важным для прогнозирования надежности ТМ, поскольку полупроводниковые элементы *р*-типа более устойчивы к воздействиям легирования, соответственно, отказ их будет происходить позже.

Для снижения диффузии меди и припоя в ветви Bi_2Te_3 на ветви наносят защитное покрытие. В настоящее время в качестве защитного покрытия традиционно используют двухслойное покрытие, состоящее из молибдена и никеля, которое наносится в вакууме с помощью магнетронных источников распыления. Экспериментально установлено, что слой молибдена толщиной в 1 мкм обеспечивает хо-



Рис. 2. Изображение полупроводника теллурида висмута с нанесенным адгезионным слоев молибдена и барьерным покрытием никеля (получено с помощью ионной микроскопии)

рошую адгезию защитного покрытия к полупроводнику, а никель является именно защитным слоем, предотвращающим диффузию материалов конструкции в полупроводник. На рис. 2 представлено изображение полупроводниковой ветви с нанесенным барьерным покрытием.

Одним из путей решения проблемы надежности является использование новых материалов для защитных покрытий и новые методы их нанесения.

Данная работа посвящена предварительной оценке эффективности наносимых защитных покрытий из различных материалов.

Оценка проводилась с использованием математической модели процесса диффузии материалов в полупроводник через защитное покрытие.

Расчет надежности

Обобщенным критерием, характеризующим работоспособность ТМ, является показатель производительной мощности, который представлен формулой

$$M_{\rm TM} = \sum_{1}^{l} M_{i},\tag{1}$$

где l — число термопар; M_i — производительная мощность *i*-й термопары, $i \leq 1 \leq l$. При насыщении полупроводника *n*- или *p*-типа материалом припоя или проводника термопара уже не может внести свой вклад в производительную мощность ТМ. Со временем таких термопар становится все больше, ТМ перестает выполнять свои функции и происходит его отказ. Таким образом, для оценки общего времени работы ТМ и его отдельно взятого термоэлемента (ТЭ), т. е. полупроводниковой ветви, как уже показано выше, критическим является изменение химического состава ветви *n*-типа, следовательно, расчет целесообразно проводить для данного элемента.

Для оценки вероятности безотказной работы [2] ветви *n*-типа воспользуемся функцией Лапласа:

$$P(t) = \Phi\left[\frac{C_{\rm kp}(x) - C_{\rm s}\left(1 - \operatorname{erf}\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)}{\sqrt{(\sigma_{\rm c}t)^2}}\right],\qquad(2)$$

где x — глубина, мкм; $C_{\rm kp}$ — критическая концентрация примеси в полупроводнике на глубине x, см⁻³; C_S — концентрация примеси на поверхности полупроводника на глубине $x \neq 0$, см⁻³; D — коэффициент диффузии примеси в полупроводник, см² · c⁻¹;

$$D(t) = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_0 T}\right),$$

где E_a — энергия активации диффузии, эВ; T — температура диффузии, К; D_0 — значение коэффициента диффузии при начальных условиях, см² · c⁻¹; $k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; t — время работы ветви, с.

Задачу выбора нового типа покрытия решали с помощью разработки математической модели процесса диффузии меди и припоя в полупроводник через защитное покрытие, состоящее из металлов, с заданными начальными условиями: коэффициент диффузии D_0 и энергия активации E_a .

Математическое моделирование

Известно, что диффузия имеет междоузельный характер, когда атомы в кристаллической решетке перемещаются из одного междоузельного состояния в соседнее с ним. Диффузия примесей замещения, т. е. примесных атомов, занимающих места в узлах кристаллической решетки, обычно происходит за счет перескока примесей на место вакансий. В этом случае энергия активации включает энергию, необходимую для образования вакансии, и энергию, требуемую для перемещения примеси. Обычно диффузия через междоузлия представляет собой более быстрый процесс по сравнению с диффузией примесей замещения. Как известно, перемещение атомов вещества (примеси) в решетке кристалла происходит скачками. Эти скачки происходят в трех измерениях, и суммарный поток определяется статистическим усреднением за определенный период времени.

Для моделирования процесса воспользуемся основным уравнением диффузии (Шукарева—Фика) [3]; количество вещества ds, диффундирующего из твердого тела через данное сечение, пропорционально размеру данного сечения F, пропорционально градиенту (падению) концентрации dc/dx в направлении, перпендикулярном к этому сечению (разность концентрации на единицу длины пути), и пропорционально времени $d\tau$:

$$ds = DF \frac{dc}{dx} d\tau, \tag{3}$$

где D — коэффициент диффузии, см² · c⁻¹.

Формула (3) представляет собой математическое выражение закона Шукарева—Фика.

Это уравнение верно для стационарного процесса диффузии, т. е. процесса диффузии при постоянном градиенте концентрации. Практически процесс диффузии в ходе экстракции является нестационарным (градиент концентрации изменяется), поэтому приведенное уравнение верно лишь для каждого данного момента экстракции.

Как мы знаем, процесс диффузии связан с массопереносом и является одной из задач механики сплошных сред. Системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику таких физических явлений, допускают аналитическое решение лишь для тривиальных случаев, далеких от реальной жизни (значительные упрощения и допущения). Применительно к практическим инженерным и научно-техническим задачам экспериментальные исследования и математическое моделирование остаются, зачастую, единственно возможными. Именно таким образом обстоит дело и в нашем случае.

При решении задач моделирования процессов, протекающих в непрерывных средах, одним из общепринятых является метод конечных элементов (МКЭ). Точность полученного результата определяется следующими факторами:

- удачный выбор формы и размеров конечных элементов;
- приемлемый шаг итерации по времени;
- обоснованный выбор неизбежных упрощений и допущений.

В вопросе о выборе формы и размеров конечных элементов обычно руководствуются следующими соображениями:

- насколько хорошо из них образуется рассматриваемая непрерывная среда;
- каким образом описывается состояние текущего элемента (часто считается, что все точки КЭ имеют одно и то же значение всех переменных состояния);
- ограничениями на производительность и объемы памяти средств вычислительной техники, используемых при моделировании.

Постановка задачи без учета дефектов слоев конструкции. Полупроводниковая ветвь как часть термопары представляет собой многослойную структуру. Структура ТЭ представлена на рис. 3. ТЭ состоит из следующих шести слоев, каждый из которых имеет различное функциональное содержание:

- проводник (Cu);
- припой ПОС-61 (SnPb);
- коммутационное покрытие (Sn);
- барьерное покрытие (Ni);
- адгезионный слой (Мо);
- полупроводник (Bi₂Te₃).
 Начальные условия

1. Рассмотрение слоев конструкции как идеальных, без учета дефектов.



Рис. 3. Многослойная структура полупроводниковой ветви Bi_2Te_3 с нанесенным покрытием и припаянным медным проводником

Разбиение многослойной структуры на конечные элементы

$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	№ Ma	Материал	1	Шаг, мкм	4	L MKM	L MKM	L mkm	nV	n V	n7	N
		материал	Х	Y	Z	L_{χ} , with	Ly, mich	L_{z} , mu	пД	<i>n</i> 1	nΖ	''sum
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	1 2 3 4 5 6	Cr ΠOC (Sn, Pb) Sn Ni Mo Bi ₂ Te ₃	35 35 35 35 35 35 35	35 35 35 35 35 35 35	25 25 1 1 50	1400 1400 1400 1400 1400 1400	1400 1400 1400 1400 1400 1400	500 500 5 9 1 1600	40 40 40 40 40 40	40 40 40 40 40 40	20 20 5 9 1 32 Bcero:	$\begin{array}{c} 32\ 000\\ 32\ 000\\ 8\ 000\\ 14\ 400\\ 1\ 600\\ 51\ 200\\ 139\ 200\\ \end{array}$

2. Рассмотрение слоев конструкции с учетом дефектов.

Моделирование проводится для температуры 250 °С (*T* = 523 К) и времени 1000 ч. Также известно, что ТМ работает при температурах не выше 150 °C, однако локально и кратковременно температура может подниматься до 250 °С при ресурсе работы 1000 ч.

Предварительно заданы значения коэффициентов диффузии D₀ и энергии активации E_a материалов исследуемой структуры.

Разбиение на конечные элементы. Важным фактором, влияющим на выбор формы конечного элемента, является форма объекта моделирования (область непрерывной среды). Чаще всего дискретизация по



Рис. 4. Блок-схема математического моделирования процесса диффузии без учета дефектов слоев

пространству выполняется посредством проведения регулярным образом совокупности поверхностей, описываемых уравнениями невысокого порядка. Наиболее хорошим является решение, при котором конечный элемент повторяет в миниатюре форму всей моделируемой конструкции.

В нашем случае наиболее подходящей формой конечного элемента является прямоугольный параллелепипед. Разбиение проводится плоскостями, нормальными по отношению к осям системы координат oXYZ. Результаты дискретизации сплошной среды представлены в таблице.

Особенностью является переменный шаг по оси Z. Указанное направлено на то, чтобы "деликатные" слои покрытия смоделировать несколько точнее,

по сравнению с остальными.

Граничные условия. Как правило, граничные условия связаны с конечностью среды, в которой происходит динамика тех или иных процессов или/и наличием в среде поверхностей и объемов с резким изменением свойств. В нашем случае это проявляется:

- на границах ТЭ с окружающей средой; •
- в местах переходов в конструкции с одного материала на другой.

Структурная схема алгоритма

Алгоритм процесса математического моделирования без учета дефектов слоев структуры представлен на рис. 4.

Результаты математического моделирования процесса диффузии

Представленные результаты математического моделирования диффузионных процессов в слоях многослойной структуры (рис. 5) при заданных условиях показали, что диффузия меди и олова в полупроводник будет протекать настолько медленно, что работоспособность ТМ будет сохраняться в течение слишком большого времени, что противоречит практическим данным. А результаты подсчета вероятности безотказной работы P(t) = 0,999, хотя в реальности он не более 0,5. Таким образом, мы имеем право подвергнуть сомнению полученные результаты математического моделирования.

Постановка задачи с учетом дефектов слоев. В процессе экспериментальных исследований установлено, что в слоях барьерных покрытий при их нанесении возникают локальные неоднородности (дефекты). Причем под дефектами подразумеваются так называемые макродефекты материала, такие как по-



Рис. 5. Кривые изменения концентраций компонентов слоев по глубине структуры при *T* = 250 °С, *t* = 1000 ч: *1* — медь; *2* — припой; *3* — олово; *4* — никель; *5* — молибден; *6* — теллурид висмута

ры, трещины, капли, кластеры инородных материалов [4]. За доминирующую форму дефектов примем цилиндрическую с осью, расположенной по нормали к поверхности раздела слоев. Размеры дефектов по сравнению с размерами всего ТЭ малы (десятки нанометров). Процентное содержание дефектов в полупроводниковом материале значительно, до 80 % общего объема материала, а в покрытии — до 60 %.

Следовательно, их число велико:

$$N = \frac{400}{\pi d^2 h P_s}$$

где d — диаметр цилиндра, нм; h — высота цилиндра, нм; P_S — содержание дефектов в слое, %.

При d = 30 нм, h = 100 нм и $P_S = 60$ % их число в 1 мкм³ составит $n = 2,36 \cdot 10^4$. Суммарный объем материала, в котором присутствуют дефекты $V = 3,14 \cdot 10^9$. Таким образом, общее число дефектов во всей конструкции $N = 7.4 \cdot 10^{13}$.

Также будет иметь место проявление дополнительного граничного условия — на границах локальных неоднородностей (дефекты).

Эквивалентный конечный элемент. Решение задачи моделирования в виде, сформулированном выше, невозможно ввиду очень большой размерности. Снижение объема вычислений может быть достигнуто многими способами:

- увеличением размеров конечных элементов;
- увеличением шага интегрирования;
- моделированием не всей конструкции, а лишь ее некоторой части или множества частей и др. Все способы снижения объема вычислений не-

Все спосооы снижения ооъема вычислении негативно сказываются на точности результатов решения. Нам представляется целесообразным обоснованное ослабление требований в постановке задачи ко всем факторам. Одним из них является отказ от детального моделирования каждого дефекта в отдельности и переход к эквивалентному конечному элементу. Последний не является полностью



Рис. 6. Замена конечного элемента с точечными дефектами эквивалентным

идентичным реальному, однако достаточно хорошо сохраняет физические свойства последнего. В качестве эквивалентного элемента выбран полый паралле-



Рис. 7. Блок-схема математического моделирования процесса диффузии с учетом дефектов слоев



их дефектности по глубине структуры при T = 250 °C, t = 1000 ч: 1 -медь; 2 -припой; 3 -олово; 4 -никель; 5 -молибден; 6 -теллурид висмута

лепипед (рис. 6). При этом объем внутренней полости равен суммарному объему всех дефектов, которые она замещает, а ее форма (эллипсоид вращения) обладает "наилучшими" свойствами с точки зрения обтекаемости диффузионными потоками. Указанная замена практически не влияет на результаты моделирования, однако значительно снижает размерность задачи.

Алгоритм процесса математического моделирования без учета дефектов слоев структуры представлен на рис. 7.

Анализ результатов и выводы. Результаты проведенного математического моделирования (рис. 8) с учетом дефектов слоев показывают, что именно дефектность слоев барьерного покрытия и полупроводника существенно влияют на скорость диффузионных процессов. Из рис. 8 видно, что к концу процесса моделирования, при t = 1000 ч., материал медного проводника не достигнет границы с полупроводником, как и припой. А слои олова, никеля и молибдена начинают диффундировать по объему не только полупроводника, но и всей конструкции, что приводит к изменению химического состава слоев структуры.

Заключение

Получены результаты моделирования процесса диффузии меди и олова в полупроводник через барьерное покрытие из различных материалов, без учета дефектов и с учетом дефектности полупроводника и покрытия. Можно сделать вывод о том, что дефектность покрытия и поверхности полупроводника влияет на увеличение скорости процесса диффузии во много раз сильнее, чем материал покрытия.

Таким образом, решить проблему процесса диффузии становиться возможным путем улучшения технологии нанесения барьерного покрытия, что приведет к уменьшению его дефектности и соответственно, к повышению надежности работы TM.

Список литературы

1. Гольцман Б. М., Кудинов В. А., Смирнов И. А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi₂Te_{3.} М.: Наука, 1972. 320 с.

2. **Проников А. С.** Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с.

3. **Мехрер Х.** Диффузия в твердых телах: Пер. с англ. М.: Springer, 2007. 700 с.

4. Болтакс Б. И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Л.: Наука, Ленингр. отд., 1972. 384 с.

УДК 621.382.049.77+531:546.621-31

Н. И. Мухуров, д-р техн. наук, зав. лаб., e-mail: mukhurov@inel.bas-net.ru, Г. И. Ефремов, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., С. П. Жвавый, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: zhvavyi@inel.bas-net.ru, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, г. Минск

КОНСТРУКТИВНЫЕ ВАРИАНТЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ТОРСИОННЫХ МИКРОСКАНЕРОВ С ОПТИМИЗИРОВАННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Рассмотрены конструктивные принципы формирования электростатических торсионных микросканеров с повышенным диапазоном управляемой фазы эксплуатационного цикла. Предложены расчетные формулы, приведены схемы устройств и их базовые зависимости электрического напряжения U от угла поворота α якоря. **Ключевые слова:** МЭМС, электростатические микросканеры, конструкции, оптимизация параметров

Введение

Сканирующие устройства находят широкое применение в различных областях техники, информатики, медицины, биологии. Их общей характеристикой является реализация требуемого последовательного перемещения подвижного элемента под влиянием воздействия какого-либо внешнего управляющего фактора. Движение элемента используется, например, для измерения вектора отражаемых или испускаемых элементом лучей. В условиях интенсивной конкуренции идет непрерывная жесткая борьба за качество, снижение массогабаритных и энергоемкостных показателей. Естественно, что в такой ситуации перспективным направлением является микроминиатюризация сканеров с электростатической актюацией.

Схематично электростатические торсионные микросканеры представляют собой комбинацию из

диэлектрических оснований с двумя выступами и плоского якоря, размещенного параллельно над основанием между выступами, в которых якорь жестко закреплен торсионами, расположенными на его боковых сторонах [1-4]. На основании симметричной оси торсионов размещены два изолированных друг от друга неподвижных электрода. На якоре напротив них сформирован единый подвижный электрод и образует с неподвижными межэлектродный промежуток высотой t. На внешней стороне якоря может находиться отражающий экран, например зеркало. При подаче зарядов (электрического напряжения U) на электроды от источника постоянного тока якорь под действием электростатических сил F, создающих активный момент M_F, в зависимости от знаков зарядов на электродах повернется относительно оси в том или ином направлении на угол α, деформируя торсионы, в которых возникает реактивный момент M_{P} . На стороне торсионных микросенсоров с разноименными зарядами электродов создаются притягивающие активные силовые факторы, с одноименными — отталкивающие. Их суммарные величины определяют положение якоря. Показано [2, 4, 5], что функция $U(\alpha)$ выражается кривой, имеющей вид несимметричной параболы с максимумом в пределах (0,42...0,52) α_{max} [4], где α_{max} — максимальный угол поворота якоря, допускаемый геометрией сканера. Такая зависимость объясняется тем, что активный момент M_F в процессе прямого хода рабочего цикла изменяется в зависимости от α^{-2} , тогда как реактивный момент М_Р пропорционален α. Практический результат заключается в разделении прямого хода на управляемую часть от 0 до U_{max} и α от 0 до ~0,5 α_{max} и на неуправляемую при $U_{\text{max}} = \text{const}$ и α от ~0,5 α_{max} до а_{тах}. Функция характеризуется моментальным переходом (коллапсом) яркости при U_{max} в конечное положение.

Таким образом, зависимость $U(\alpha)$ в электростатических сканерах нелинейна и управление возможно на ограниченном участке угла а_{max}. Однако функциональное назначение актюаторов, в том числе сканеров, расширяется при пропорциональности входных и выходных параметров. Учитывая перспективность электростатических устройств, обусловленную малыми значениями потребляемой электроэнергии, массогабаритных показателей, простотой, возможностью реализации методами интегральной технологии микроэлектроники, проведен комплекс теоретических и практических разработок, направленных на линеаризацию зависимости U(α) и увеличение диапазона пропорциональности $\alpha(t)$. Предложения в большинстве основаны на применении различных сложных электрических схем источников питания, осуществляющих обратную связь параметров актюатора [6-9].

Методика расчета

В данной статье рассматриваются решения задачи конструктивно-технологическими методами, являющимися следствием теоретического анализа взаимодействия электрических и механических параметров при срабатывании электростатических устройств [4, 10]. При теоретических расчетах используется традиционное условие равновесного состояния, т. е. равенства активных M_F и реактивных M_P моментов сил. Из их сопоставления находится требуемая зависимость $U(\alpha)$, т. е. определяется электрическое напряжение, которое необходимо для поворота якоря на нужный угол.

Важной особенностью принятой методики является разделение параметров моментов и напряжения на постоянные и переменные в процессе рабочего цикла по схеме [4]

$$\Pi = C\Pi^*(\alpha),$$

где *С* объясняет постоянные величины, а $\Pi^*(\alpha)$ — переменные. Функция $\Pi^*(\alpha)$ является базовой, содержащей относительные величины перемещения, определяет характер и числовое значение изменения функции $\Pi^*(\alpha)$ и при *C* = 1 является единой для всех типоразмеров выбранной конструктивной схемы. Дифференцирование функции $\Pi^*(\alpha)$ позволяет получить координаты положения экстремальной точки α_0 и соответствующее значение электрического напряжения, равное рабочему значению ($U_{\text{раб}}$): $U_0^* = U_{\text{max}} = U_{\text{раб}}$. Действительное значение Π в каждом конкретном сканере будет получено после подстановки в *C* соответствующих конструктивных данных и умножения на $\Pi^*(\alpha_0)$.

Из анализа взаимодействия сил и базовой функции следует, что U_{max}^* достигается тогда, когда дальнейшее увеличение электрического напряжения после прохождения критического положения, т. е. электростатического момента, уже не уравновешивается реактивными моментами торсионов, что является следствием разной их зависимости от α , отмеченной выше. Следовательно, увеличение диапазона управляемого поворота якоря можно добиться путем:

- постепенного или дискретного дополнительного увеличения реактивного момента;
- относительного снижения суммарной величины электростатических сил на концах электродов.

Приведем несколько примеров микросканеров, в которых оптимизация параметров достигается изменением 3D-геометрии межэлектродного пространства.

Электростатический гребенчатый микросканер (ЭСГС)

ЭСГС [11] содержит подвижный элемент в виде жесткого якоря *1* и жестких лепестков *2*, расположенных перпендикулярно оси упругих торсионов (рис. 1). Якорь торсионами *3* якоря (ТЯ) соединен



Рис. 1. Электростатический гребенчатый микросканер ЭСГС

с лепестками, которые в свою очередь соединены торсионами 4 лепестков (ТЛ) с выступами 5 на основании. Под концами лепестков на основании расположены опоры 6, высота которых предусматривается в двух вариантах: все опоры имеют одинаковую высоту; на разных диагоналях якоря опоры имеют разную высоту, но на одной диагонали они равновысокие.

Электродная система также рассматривается в двух вариантах с учетом одновременного действия притягивающих и отталкивающих факторов:

- с электродами на якоре;
- с электродами на якоре и лепестках.

Электрод на основании имеет соответствующую вариантам площадь. Введение лепестков с электродами и без, равновысоких опор существенно изменит силовое поле между электродами. Соотношение жесткостей торсионов якоря Q_{TR} и лепестков $Q_{\text{TЛ}}$ выбрано $z = Q_{\text{TR}}/Q_{\text{TЛ}} > 1$, чтобы обеспечить повышение эффективности увеличения суммарного момента силового фактора с нарастанием поворота якоря.

При включении сканер проходит следующие фазы, которые характеризуются относительным углом поворота якоря $k = \alpha/\alpha_{max}$. В любом варианте зависимость U(k) будет иметь максимум. Углы поворота якоря от исходного положения до очередного U_{max} обозначим 0, k_1 , k_2 , k_3 .

Фазы поворота электронных систем с лепест-ками:

Фаза 1. Поворот без остановки лепестков до первого максимума напряжения.

 Φ *аза 2*. Остановка при k_1 обоих лепестков и продолжение поворота якоря до k_2 .

 Φ аза 3. После фазы 1 остановка одного лепестка и продолжение поворота якоря до k_2 .

 Φ аза 4. После фазы 3 остановка второго лепестка и продолжение поворота до k_3 .

В каждой фазе остановка очередного лепестка сопровождается отключением соответствующего торсиона, увеличением жесткости системы и реактивных моментов, что создает условия для дальнейшего управляемого поворота якоря, естественно, при соответствующем увеличении работающего электрического напряжения.

А. Рабочее напряжение в ЭСГС с электродами на якоре.

В конструкции с одновременной остановкой лепестков:

Аф.1 в фазе поворота 1 ($k = 0...k_1$)

$$U_{1} = \sqrt{\frac{4GI_{TR}t^{3}}{\varepsilon_{0}aI_{TR}L^{3}}} \sqrt{\frac{\frac{k^{3}}{z+1}}{2k^{2}\frac{1-m_{0}^{2}}{(1-k^{2})(1-m_{0}^{2}k^{2})} + \ln\frac{1-k^{2}}{1-m_{0}^{2}k^{2}}}.$$
(1)

Аф.2 в фазе поворота $2(k = k_1...k_2)$

$$U_{2} = \sqrt{\frac{4 G I_{\text{TR}} t^{3}}{\varepsilon_{0} a l_{\text{TR}} L^{3}}} \sqrt{\frac{\frac{k^{2} \left[\frac{k_{1}}{z+1} + (k-k_{1})\right]}{2k^{2} \left(\frac{1-m_{0}^{2}}{\left(1-k^{2}\right)\left(1-m_{0}^{2}k^{2}\right)} + \ln \frac{1-k^{2}}{1-m_{0}^{2}k^{2}}}, (2)$$

где G — модель сдвига; I_{TR} — момент инерции при кручении; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/В · м — электрическая постоянная; a — ширина якоря; l_{TR} — длина лепестков; L — расстояние от оси якоря до его внешней стороны.

В конструкции с последовательной остановкой лепестков:

Аф.1 в фазе поворота 1 напряжение определяется по формуле (1);

Аф.3 в фазе поворота 3 ($k = k_1...k_2$) — по формуле

$$U_{3} = \sqrt{\frac{4 G I_{\text{TA}} t^{3}}{\varepsilon_{0} a l_{\text{TA}} L^{3}}} \sqrt{\frac{\frac{k^{2} 2 k + z(k - k_{1})}{2}}{2k^{2} \frac{1 - m_{0}^{2}}{(1 - k^{2})(1 - m_{0}^{2}k^{2})} + \ln \frac{1 - k^{2}}{1 - m_{0}^{2}k^{2}}};(3)$$

Аф.4 в фазе поворота 4 ($k = k_2...k_3$) — по формуле

$$U_{4} = \sqrt{\frac{4 G I_{\text{TR}} t^{3}}{\epsilon_{0} a l_{\text{TR}} L^{3}}} \sqrt{\frac{\frac{\frac{k^{2} 2k + z(2k - k_{1} - k_{2})}{2}}{2k^{2} \frac{1 - m_{0}^{2}}{(1 - k^{2})(1 - m_{0}^{2}k^{2})} + \ln \frac{1 - k^{2}}{1 - m_{0}^{2}k^{2}}} .(4)$$



Величина z, как следует из рис. 2, оказывает существенное влияние на основные технические параметры торсионных систем. При изменении z от 0 до 25 у кривой Аф.4 по отношению к кривой Аф.1 рабочее электрическое напряжение максимально снижается почти в 2,5 раза, угол управляемого поворота возрастает в 1,6 раза. Объяснение этому результату заключается в том, что добавка к торсионам якоря любого размера торсионов лепестков уменьшает жесткость опор и, следовательно, снижает реактивный момент якоря М_Р. В условиях равновесного состояния это обстоятельство приводит к снижению активного электростатического момента M_F и соответственно рабочего электрического напряжения. Ступенчатое повышение жесткости торсионов в момент достижения промежуточных максимальных значений U_{раб} компенсирует увеличение F, обусловленное уменьшением межэлектродного расстояния t настолько, что вызывает необходимость дальнейшего повышения электрического напряжения. Перепад максимальных значений электрических напряжений с увеличением Z от 0 до 25 нарастает с 1 до 2,5 в Аф.2 (при одновременной) и до 2,1 в Аф.4 (при последовательной остановке лепестков), k_0 соответственно увеличивается до 0,7 и 0,8, т. е. второй вариант обеспечивает более плавное повышение рабочего электрического напряжения (рис. 2). Это создает хорошие условия для управления углом поворота якоря на дополнительных фазах. Оптимальными величинами z (рис. 2) являются значения в диапазоне 10...25. Они обеспечивают наибольший управляемый угол поворота якоря при наименьшем рабочем электрическом напряжении.

Б. Рабочее электрическое напряжение ЭСГС с электродами на якоре и лепестках.

Рассмотрим электромеханические параметры в ЭСГС с электродами на якоре и на лепестках. Составим уравнения равновесия и определим зависимость U(k) для каждой фазы поворота якоря. Ширину лепестка a_{π} , т. е. электрода, выразим через ширину якоря: $a_{\pi} = \lambda a_{\pi}$, где λ — некоторая постоянная величина, тогда полная ширина электрода будет равна

$$a = a_{\mathfrak{g}} + 2\lambda a_{\mathfrak{g}} = a_{\mathfrak{g}}(1+2\lambda), \tag{5}$$

Бф.1. На участке $k = 0...k_1$, где действует общий электростатический момент M электродов шириной $a_{\mathfrak{R}} + 2a_{\mathfrak{R}}$,

$$U_{1} = \sqrt{\frac{4G_{\text{TS}}t^{3}}{\varepsilon_{0}a_{\text{s}}l_{\text{TS}}L^{3}}} \sqrt{\frac{k^{3}}{\frac{z+1}{zn_{1}}}};$$
 (6)

$$zn_1 = (1+2\lambda) \left[\frac{2k^2 (1-m_0^2)}{(1-k^2)(1-m_0^2 k^2)} + \ln \frac{1-k^2}{1-m_0^2 k^2} \right].$$

Бф.2. На участке $k = k_1...k_2$, где после одновременной остановки лепестков действуют притягивающий суммарный момент M_1 электрода с шириной $a_{\rm s}$ и отталкивающий суммарный момент M_2 электродов с шириной $a_{\rm s}(1 + 2\lambda)$,

$$U_{2} = \sqrt{\frac{4 G I_{\text{TM}} t^{3}}{\varepsilon_{0} a_{\text{s}} l_{\text{TM}} L^{3}}} \sqrt{\frac{k^{2} \left[\frac{k_{1}}{z+1} + (k-k_{1})\right]}{z n_{2}}};$$
(7)

$$zn_2 = \frac{k(1-m_0)}{(1-k)(1-m_0k)} + \ln\frac{1-k}{1-m_0k} + (1+2\lambda) \left[\frac{k(m_0-1)}{(1+k)(1+m_0k)} + \ln\frac{1+k}{1+m_0k}\right]$$

Бф.3. На участке $k = k_1...k_2$, где после остановки одного из лепестков действуют притягивающий суммарный момент M_1 электродов с шириной $a_g(1 + \lambda)$

и отталкивающий момент M_2 электродов с шириной $a_{\rm g}(1+2\lambda),$

$$U_{3} = \sqrt{\frac{4GI_{\text{T}\text{R}}t^{3}}{\varepsilon_{0}a_{\text{R}}l_{\text{T}\text{R}}L^{3}}} \sqrt{\frac{k^{2}}{\frac{2k+z(k-k_{1})}{z+1}}}{zn_{3}}}; \qquad (8)$$

$$zn_3 = (1+\lambda) \left[\frac{k(1-m_0)}{(1-k)(1-m_0k)} + \ln \frac{1-k}{1-m_0k} \right] + + (1+2\lambda) \left[\frac{k(m_0-1)}{(1+k)(1+m_0k)} + \ln \frac{1+k}{1+m_0k} \right].$$

Бф.4. На участке $k = k_2...k_3$ после остановки второго лепестка

$$U_{4} = \sqrt{\frac{4 G I_{\text{TH}} t^{3}}{\varepsilon_{0} a_{\text{H}} l_{\text{TH}} L^{3}}} \sqrt{\frac{\frac{1}{2} k^{2} \frac{2k + z(2k - k_{1} - k_{2})}{z + 1}}{z n_{4}}}; \quad (9)$$
$$z n_{4} = \frac{k(1 - m_{0})}{(1 - k)(1 - m_{0}k)} + \ln \frac{1 - k}{1 - m_{0}k} + (1 + 2\lambda) \left[\frac{k(m_{0} - 1)}{(1 + k)(1 + m_{0}k)} + \ln \frac{1 + k}{1 + m_{0}k}\right].$$

Результаты расчетов, проведенных для $m_0 = 0,2$; $\lambda = 0,5$; z = 0...25, представлены на рис. 3, на котором приведена также исходная кривая U(k) при





 $z = 0; \lambda = 0$. Сопоставим их с данными рис. 2, относящимися к схеме с лепестками без электродов.

В Бф.1 снижение электрического напряжения β_1 относительно Аф.1 составляет 1,414. В обеих схемах фаза 1 заканчивается при $k_1 = 0,5$. В Бф.2, т. е. при одновременной остановке лепестков, электрическое напряжение также снижается благодаря остающейся увеличенной площади отталкивающей половины электродов. Снижение β_2 незначительное, примерно в 1,04 раза, поскольку поворот сопровождается увеличением межэлектродного расстояния отталкивающей пары электродов. В Бф.3, т. е. при остановке одного лепестка, напряжение снижается более значительно в связи с продолжающимся действием притягивающего электрода второго лепестка. Относительное уменьшение напряжения β_3 составляет ~1,24 раза. В Бф.4 после отключения электрода второго лепестка и его торсиона снижение электрического напряжения снова становится незначительным, так как в сущности повторяется силовое состояние схемы А. В итоге схема Б по сравнению с А дает общее относительное снижение напряжения β_4 в 1,026 раза.

Числовые значения снижения напряжений при сопоставлении схем приведены для конечных значений *k* каждой фазы. В общем виде, т. е. для других значений λ , учитывая относительно малую величину M_2 , с практически достаточной степенью точности можно принять $\beta_2 = \beta_4 = 1$, $\beta_3 = \sqrt{1 + \lambda}$, что следует из отношения формул напряжения схем A и Б. Отметим также, что значения k_2 , k_3 остаются равными в обеих схемах.

Таким образом, конечный результат сопоставления состоит в том, что диапазоны управляемого перемещения якоря (зеркала) и управляющие электрические напряжения в обоих вариантах практически одинаковы. Но тем не менее, положительный эффект формирования электродов на лепестках имеет место. Как следует из рис. 3, он состоит в том, что создаются лучшие условия для линеаризации функции U(k) за счет снижения электрического напряжения в средней зоне и сокращения размеров участков с малым значением производной dU/dk. Это создает условия для повышения точности установки якоря в заданное положение.

Электростатический фигурный микросканер (ЭСФС)

По расчетам при форме межэлектродного промежутка, близкой к треугольной, основной вклад в суммарную электростатическую силу вносит треть электрода, расположенная на его конце, что предопределяет раннее коллапсирование якоря. Рассмотрим эффективность замены традиционной прямоугольной формы электродов на фигурную, ширина которой уменьшалась бы по мере удаления от оси поворота. Такая конструкция представлена на рис. 4.



Электростатическая сила притяжения F_{1i} в точке m_i определяется формулой

$$F_{1i} = \frac{\varepsilon_0 a_j U^2 L}{2t^2} \frac{1 - m_0}{n(1 - m_{ij}k)^2},$$
 (10)

где j — номер участка, 1...n, m_{ji} — размер m_i на участке j; m_{jH} , m_{jK} — начало и конец j-го участка; $a_j = ap_j$, p_j — относительная ширина j-го участка по отношению к первому, $p_j \leq 1$.

Суммарная сила притяжения

$$F_{1} = \sum \frac{\varepsilon_{0} a_{j} U^{2}}{2t^{2}} \int_{m_{H}}^{m_{K}} \frac{Ldm}{\left(1 - \frac{mL}{t} tg\alpha\right)^{2}} = \frac{\varepsilon_{0} U^{2} L}{2t^{2}} \sum_{y=1}^{N} a_{j} \frac{m_{K} - m_{H}}{(1 - m_{K} k)(1 - m_{H} k)}.$$
 (11)

Единичный притягивающий момент

$$M_{1i} = \frac{\varepsilon_0 a_j U^2 L}{2t^2} \frac{1 - m_0}{n(1 - m_{ji}k)} x_i; x_i = Lm_i.$$
(12)

Суммарный притягивающий момент

$$M_{1} = \frac{\varepsilon_{0}U^{2}}{2t^{2}} \sum_{j=1}^{N} a_{j} \int_{m_{H}}^{m_{K}} \frac{mL \cdot Ldm}{(1 - \frac{mL}{t} tg\alpha)^{2}} = \frac{\varepsilon_{0}U^{2}L^{2}}{2t^{2}k^{2}} \sum_{j=1}^{N} a_{j} \times \left(\frac{1}{1 - m_{jK}k} - \frac{1}{1 - m_{jH}k} + \ln\frac{1 - m_{jK}k}{1 - m_{jH}k}\right).$$
(13)

Аналогичны формулы для отталкивающих сил F_2 и моментов M_2 , откорректированные с учетом увеличения межэлектродного расстояния.

Из условия равновесия общего активного электростатического $M = M_1 + M_2$ и общего реактивного торсионного $M_{\rm T}$ моментов следует:

$$U = \sqrt{\frac{4GI_{\rm T}t^3}{\varepsilon_0 l_{\rm T}aL^3}} \sqrt{\frac{k^3}{zn_5}}; \qquad (14)$$

$$zn_5 = \sum_{j=1}^{N} p_j \left[2k^2 \frac{m_{j\kappa}^2 - m_{j\rm H}^2}{\left(1 - m_{j\kappa}^2 k^2\right) \left(1 - m_{j\rm H}^2\right)^2} + \ln \frac{1 - m_{j\kappa}^2 k^2}{1 - m_{j\rm H}^2 k^2} \right].$$

Проведем анализ изменения электрического напряжения U^* с трехступенчатым электродом и притягивающим моментом M_1 . Базовые кривые $U^*(k)$ представлены на рис. 5 и в табл. 1. Изменение площади конца электрода не дало положительных результатов, максимум кривой 1 остался при k = 0,5. Анализ распределения единичных моментов показал, что по-прежнему резкое возрастание их значения начинается с 80...85 % длины электрода. Эффективность дальнейшего уменьшения площади конца электрода проверена на четырехступенчатом электроде (кривые 2, 3, 4 на рис. 5). U^*_{max} при M_1 остался при $k_0 = 0,5$, при M увеличился до $k_0 = 0,6$.





НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 1, 2010

Таблица 1

<i>U</i> *,	Параметры, отн. ед.					
отн. ед.	z_1	M _{πp}	z_2	m _{ot}	k	
U_1^*	1,0	0,2	1	0,2	0 (трад. схема)	
U_2^*	1,5	0,2	0,2	0,2	0-1,5	
U_3^*	2,0	0,2	0,2	0,2	0—2,0	
U_4^*	2,0	0,2	0,2	0	0—2,0	
U_5^*	2,5	0,2	0,2	0	0-2,5	

Далее рассмотрим идентичный электрод (кривые 5, 6, 7) с нулевой шириной последней ступени, который для M позволил расширить диапазон управления до $k_0 = 0,7$, но при M_1 максимум остался при $k_0 = 0,5$. Значит, малые значения M_2 двух последних контуров оказываются способными увеличить управляемый угол поворота.

Использование электродов только с M_2 (кривые 3, 6) весьма проблематично, так как несмотря на линейность зависимости $U^*(k)$ реализация их ограничивается существенным (в 4,5 раза) повышением электрического напряжения. Повышенных значений электрических напряжений (примерно в 2 раза) требуют и кривые 5 и 7, что следует из сопоставления их с зависимостью (8) U(k) при a = const.

Таким образом, эти конструкции нельзя оценить однозначно: есть и положительные, и отрицательные стороны. Вопрос об использовании этих конструкций должен решаться отдельно в каждом конкретном случае.

Электростатический ступенчатый микросканер (ЭССС)

В традиционной схеме межэлектродные расстояния притягивающих и отталкивающих пар электродов в исходном состоянии выполнены равными, что предопределяет раннее коллапсирование системы за счет электростатических сил первой пары при незначительном силовом вкладе второй [8]. Представляется, что для увеличения координаты коллапсирования целесообразно повысить влияние отталкивающего момента $M_{\rm ot}$ при одновременном снижении притягивающего момента M_{пр}. Конструктивно это может быть реализовано, например, за счет расположения электродов основания на разном уровне так, чтобы обеспечить увеличение межэлектродного расстояния первой пары электродов и уменьшение расстояния у второй [12]. Проведем теоретический анализ эффективности такой *z*-образной схемы. В целях корректности сопоставления рассматриваемой схемы с традиционной, т. е. обеспечения идентичности формулировки исходных постоянных параметров конструкций, примем, что есть условные расчетные



Рис. 6. Электростатический ступенчатый микросканер ЭССС

межэлектродное расстояние t и угол поворота якоря α_{max} , соответствующие расположению неподвижных электродов в одной плоскости у традиционной схемы. Межэлектродное расстояние у притягивающей пары t_1 выполним больше t в z_1 раз, у толкающей пары t_2 — в z_2 раз меньше t (рис. 6), т. е.

$$t_1 = z_1 t; \ t_2 = z_2 t, \tag{15}$$

где *z*₁ > 1; *z*₂ < 1.

Учитывая, что при малых углах $tg\alpha \approx \alpha$, введем коэффициент *k*, характеризующий одновременно относительные поворот якоря α и смещение его конца *v*:

$$\frac{\mathrm{tg}\alpha}{\mathrm{tg}\alpha_{\mathrm{max}}} = \frac{\alpha}{\alpha_{\mathrm{max}}} = \frac{v}{t} = k.$$

Тогда

$$U_{\rm np} = -\sqrt{\frac{4\,GIt^3}{\epsilon_0 a l L^3}} \sqrt{\frac{\frac{k^3}{k(1-m_{\rm np})}}{\frac{k(1-m_{\rm np})}{z_1\left(1-\frac{k}{z_1}\right)\left(1+m_{\rm np}\frac{k}{z_1}\right)}} + \ln\frac{1-\frac{k}{z_1}}{1-m_{\rm np}\frac{k}{z_1}}}.$$
 (16)

Аналогично для отталкивающихся электродов, межэлектродное расстояние у которых равно $t_2 + y_x$, отталкивающее электрическое напряжение

$$U_{\rm or} = \sqrt{\frac{4 G I t^3}{\varepsilon_0 a l L^3}} \frac{k^3}{k(m_{\rm or} - 1)} + \ln \frac{1 + \frac{k}{z_2}}{1 + m_{\rm or} \frac{k}{z_2}} . (17)$$

Электрическое напряжение U(k) при суммарном действии моментов $M_{\rm np}$ и $M_{\rm or}$

$$U = \sqrt{\frac{4 G I t^3}{\varepsilon_0 a l L^3}} \sqrt{\frac{k^3}{z n_6}}; \qquad (18)$$

$$zn_{6} = \frac{k(1 - m_{\Pi p})}{z_{1}\left(1 - \frac{k}{z_{1}}\right)\left(1 - m_{\Pi p}\frac{k}{z_{1}}\right)} + \frac{k(m_{OT} - 1)}{z_{2}\left(1 + \frac{k}{z_{2}}\right)\left(1 + m_{OT}\frac{k}{z_{2}}\right)} + \frac{\left(1 - \frac{k}{z_{1}}\right)\left(1 + \frac{k}{z_{2}}\right)}{\left(1 - m_{\Pi p}\frac{k}{z_{1}}\right)\left(1 + m_{OT}\frac{k}{z_{2}}\right)}.$$

Полученные теоретические соотношения дают возможность выполнить анализ принципиальных закономерностей, специфических для ступенчатого расположения электродов. Выбор значений z и m для проведения анализа определяется следующими практическими соображениями. Межэлектродное расстояние притягивающих электродов достаточно ограничить диапазоном $z_1 = 1, 5...2, 5$, так как меньшие значения не дадут эффекта, а при больших, повидимому, значительно возрастет электрическое напряжение. В отталкивающей паре расстояние должно быть минимальным, но реальным; таким можно считать $z_2 = t_2/t = 0,2$. В этой паре учтем также влияние диэлектрических промежутков *m*₁ и *m*₂, которые нужны для обеспечения сопротивления между электродами основания, но, находясь непосредственно у оси вращения якоря, т. е. в зоне малого значения t₂, m₂ уменьшает силу отталкивания якоря.

На основании изложенного остановимся на следующих вариантах (табл. 2), определяющих базовое значение U^* . Традиционная базовая зависимость $U_1^*(k)$ характеризуется значительной и непостоянной кривизной, усложняющей электрическую схему управляющих источников питания.

В рассматриваемой схеме при $z_2 = 0,2$ и $z_1 = 1,5$; 2,0; 2,5 угол k_0 возрастает до 1,0; 1,4; 1,8 соответственно (кривые $U_2^*(k)$, $U_3^*(k)$, $U_4^*(k)$, $U_5^*(k)$), при от-



Рис. 7. Базовые кривые $U^*(k)$ ЭССС при различных соотношениях t_1/t_2

носительных значениях максимальных электрических напряжениях 0,78; 1,10; 1,47 (рис. 7). Восходящая ветвь кривой, т. е. управляемый угол поворота, практически является линейной почти на всем протяжении от k = 0 до $k = k_0$, при этом угол подъема ветвей у всех трех кривых можно считать одинаковым. После k_0 начинается резкое снижение напряжения. Объясняется это изменение характера зависимости $U^*(k)$ тем, что определяющую роль в повороте вначале выполняют отталкивающие электроды, разделенные малым межэлектродным расстоянием. Примерно до k = 1 они сами почти в состоянии создавать нужный для поворота момент. На этом пути одни отталкивающие электроды лишь на

~(5...10) % (кривые $U_7^*(k)$, $m_1 = 0,2$, $m_2 = 0$, $U_6^*(k)$, $m_1 = m_2 = 0$) превышают восходящие ветви. Далее постепенно преобладающее влияние начинают ока-

Таблица	2
---------	---

No		k								
ле Характеристика электродов –		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	$M_1, j = 3, m_i = 0,46; 0,7; 0,98; p_j = 1; 0,5; 0,25$	0,6325	0,8490	0,9649	1,025	1,0408	1,0154	0,9473	0,8256	0,6181
2	$M_1, j = 4, m_i = 0.46; 0.66; 0.82; 0.98; p_i = 1; 0.5; 0.33; 0.25$	0,6901	0,9177	1,0519	1,1291	1,1601	1,1533	1,1050	-	—
3	$M_2, j = 4, m_i = 0.46; 0.66; 0.82; 0.98; p_i = 1; 0.5; 0.33; 0.25$	0,7671	1,1269	1,4524	1,7499	2,0345	2,3151	2,5908	-	—
4	$M, j = 4, m_i = 0.46; 0.66; 0.82; 0.98; p_i = 1; 0.5; 0.33; 0.25$	0,5130	0,7116	0,8519	0,9486	1,0081	1,0323	1,0164	-	—
5	$M_1, j = 4, m_i = 0.46; 0.66; 0.82; 0.98; p_i = 1; 0.5; 0.33; 0$	0,7255	0,9759	1,1259	1,2186	1,2884	1,2831	1,2651	1,2138	1,1263
6	$M_2, j = 4, m_i = 0.46; 0.66; 0.82; 0.98; p_i = 1; 0.5; 0.33; 0$	0,7906	1,1744	1,5127	1,8163	2,1091	2,3968	2,6788	2,9609	3,2457
7	$M, j = 4, m_i = 0,46; 0,66; 0,82; 0,98; p_i = 1; 0,5; 0,33; 0$	0,5345	0,7506	0,9032	1,0119	1,0995	1,1312	1,1440	1,2131	1,0640
	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,						i l		r	1

зывать нарастающие за счет уменьшения межэлектродного расстояния силы притягивающих электро-

дов, создаваемых напряжением $U_{\pi p}^{*}(k)$. В итоге совместных действий электростатические силы преодолевают линейно возрастающий момент сопротивления торсионов и при k_0 возникает явление коллапса, уже упомянутого выше, и якорь неуправляемо проскакивает оставшееся межэлектродное расстояние. Увеличение площади отталкивающих электродов за счет уменьшения m_2 с 0,2 до 0 снижает электрическое на-

пряжение U_4^* при $k_0 = 1,4$ на ~7 % до U_3^* . Значит, целесообразно $m_{\rm T}$ уменьшать до 0, а сопротивление между электродами на основании в случае необходимости обеспечивать увеличением *m*₁. Заметного увеличения U^* это не повлечет, так как участок m_1 во всем цикле находится на большом межэлектродном расстоянии.

Таким образом, теоретически положительное значение *z*-образной схемы состоит в линеаризации зависимости U(k) и увеличении k_0 в 2,0...3,6 раза. Однако это требует повышения напряжения в 1,35...2,5 раза. По-видимому, оптимальным будет вариант при $z_1 = 2; m_{\Pi p} = 0,2; z_2 = 0,2; m_{ot} = 0$, обеспечивающий значения абсолютные $k_0 = 1,4; U^* = 1,1$ и относи-

тельные $k_0/k_{01} = 2,8$; $U^*/U_1^* = 1,9$. Для сравнения: в [5] приводится плоскопараллельная схема, позволяющая увеличить по расчетам $k_0 \, c \, 0,33$ до 1,0 при повышении электрического напряжения U в 6 раз.

Заключение

В традиционных электростатических торсионных микросканерах управляемый относительный угол поворота якоря k_0 не превышает 0,5 k_{max} . Анализ базовых кривых показал, что 3D-трансформация меж-

электродного пространства позволяет увеличить k_0 до (0,6...0,7)k_{max} в электростатических фигурных микросканерах, до (0,7...0,8)k_{max} в электростатических гребенчатых микросканерах, до (2...2,5)k_{max} в электростатических ступенчатых микросканерах, причем последняя схема обеспечивает линеаризацию функции U(k). Рост k_0 сопровождается повышением напряжения в 1,5...2 раза. Результаты свидетельствуют о положительной роли предложенного конструктивного направления.

Список литературы

1. Petersen K. E. Dynamic micromechanics on silicon techпіциез // IEEE Transactions on electron devices. 1978. Vol. ED-25, N 10. P. 1241—1251. 2. Дятлов В. Л., Коняшкин В. В., Потапов Б. С. и др. Пленочная электромеханика. Новосибирск: Наука, 1991.

248 c.

3. Graeffe I., Suhonen M., Sipola H. et al. Scanning Microвеспанся и, бырова и, бырова и стан весанинд инето mechanical mirror for fine pointing units of intersatellite optical links // SPIEP. 2000. Vol. 4019. Р. 372—378.
4. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И. Анализ взаимосвязи электромеханических характеристик электростатических

электромсханических характеристик электростатитеских торсионных микросистем // Нано- и микросистемная тех-ника. 2007. № 5. С. 52—59. 5. **Chan E. K., Dutton R. W.** Electrostatic micromechanical

actuator with extended range of travel // J. Microelectromecha-nical System. 2000. Vol. 8, N 3. P. 321–328.

6. Karkoub M., Zribi M. Robust control of an electrostatic microelectromechanical actuator // The Open Mechanics Journal. 2008. N 2.

7. Патент GB 2278200 MПК GOID 3/02 FR Landrum. Linearising circuit for use with semi-logarithmic sensing devices.

8. Hah D., Yoon T., Hong S. A low-voltage actuated micromachined microwave switch using torsion springs and leverage // MTT. 2000. Vol. 48, N 12. P. 2540–2543.

9. Алексенко А. Г., Балан Н. Н. Анализ эффекта схлопывания электродов электростатических актюаторов в

пывания электродов электростатических актюаторов в MEMS- и NEMS-устройствах // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 7. С. 31—41. 10. Ефремов Г. И., Мухуров Н. И. Функциональные воз-можности электростатических микрореле по результатам моделирования // НТК "Кибернетика и технологии XXI ве-ка". РФ, Воронеж, 23—24 окт. 2001. С. 499—508. 11. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И. Патент РБ № 10544 Сканирующее устройство.

Сканирующее устройство.

12. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И. Патент РБ № 7959 Оптический микросканер.

УДК 51-74

В. В. Егоров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ЦНИТИ "Техномаш", г. Москва, e-mail: v-sphinks@yandex.ru

ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ НАНО-И МИКРОСТРУКТУР

Получены алгоритмы моделирования многомерных полей, полезные для представления нано- и микроструктур.

Ключевые слова: поле, пуассоновский процесс, алгоритм, распределение вероятности мажоранта, многомодальное распределение, стохастический процесс

Моделирование случайных полей для нанои микроструктурированных объектов является нетривиальным процессом. Основная проблема — необходимость учета всего ансамбля реализаций с тем, чтобы метод моделирования не накладывал ограничений на характер выходного случайного поля [1-3]. Случайным точечным полем можно аппроксимировать непрерывные поля, например, в задачах наблюдения и интерпретации сигналов от шероховатой поверхности обрабатываемого объекта. Известно, что основной вклад в сигнал обеспечивают так называемые зеркальные точки, набором которых аппроксимируется и сам объект, и подстилающая поверхность.

В оптоэлектронных системах квантовое представление входных сигналов (точечных полей) является общепринятым. Проблемы моделирования случайного точечного поля возникают сразу же, как только выясняется, что оно не является пуассоновским, имеет многомодальное распределение, плотности вероятностей не известны заранее или не могут быть вычислены аналитически, поскольку сами определяются стохастическими дифференциальными уравнениями, допускающими, в лучшем случае, численные решения. Для решения подобного рода задач был разработан метод мажоранты для случайного точечного поля, позволяющий использовать минимальные вычислительные средства при моделировании случайных точечных полей.

Этот метод основан на аппроксимации точечных случайных полей точечным полем простой структуры, например пуассоновским. Основная задача заключается в подборе простой цепочки преобразований случайных полей, позволяющей получить требуемое приближение ценой разумных вычислительных и временны́х затрат.

Проиллюстрируем сказанное примером. Рассмотрим точечное поле, заданное в евклидовом пространстве. Можно полагать его считающим, т. е. без ограничения общности можно предположить, что всегда существует такая малая окрестность исходного пространства, в которой находится не более одной точки случайного точечного поля. Более общие поля можно рассмотреть по аналогии, но в настоящей работе мы этого делать не будем.

Можно ли исходя из базового (обычно просто устроенного) точечного поля получить (путем какой-либо легко воспроизводимой процедуры) поле с заданной структурой? В указанной постановке можно считать базовое поле пуассоновским, а сами поля (исходное и то, которое нужно получить) описывать через вероятности попадания в рассматриваемую (компактную и конечную) область пространства заданного числа точек n и плотность распределения вероятностей этих n точек указанной области. Таким образом, необходимо установить соответствие между точками n и N исходного и моделируемого полей.

Предположим, что плотности распределения вероятностей записываются в виде:

$$W'_{\zeta}(n, x_1, x_2, ..., x_n) = P_{\zeta}(n) W_{\zeta}(x_1, x_2, ..., x_n); \quad (1)$$

$$W'_{\xi}(N, y_1, y_2, ..., y_N) = P_{\xi}(N) W_{\xi}(y_1, y_2, ..., y_N),$$
 (2)

где ζ — исходное поле; ξ — моделируемое поле; n — число точек исходного поля в рассматриваемой об-

ласти; N — число точек моделируемого поля; $P_{\zeta}(n)$, $P_{\xi}(N)$ — вероятности появления n и N точек в рассматриваемой точке; W'_{ζ} , W'_{ξ} — плотности распределения вероятностей для полей ζ и ξ соответственно; W_{ζ} , W_{ξ} — плотности распределения вероятностей попадания n и N точек полей ζ и ξ соответственно в точки $x_1, x_2, ..., x_n$ и $y_1, y_2, ..., y_n$ рассматриваемого пространства.

Согласно (1) и (2) необходимо определить пару преобразований $n \ge N$ и $x_1, x_2, ..., x_n \ge y_1, y_2, ..., y_n$.

Для получения вида соотношений, переводящих целочисленную случайную величину $\{n\}$ в $\{N\}$, можно воспользоваться следующим соображением. Рассмотрим новую целочисленную случайную величину вида

$$N' = \Theta(n)n, \tag{3}$$

где $\Theta(n)$ — случайная величина, принимающая значение от 0 до 1.

Предполагаем далее, что случайная целочисленная величина $\{n\}$ определена на прямой $[0, \infty]$ и может принимать все значения из числового ряда. Идея заключается в том, чтобы "поправить" случайную величину *n* на вероятностном пространстве до случайной величины *N*, поэтому распределение $\Theta(n)$ вычисляется по формуле

$$\Theta(n) = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } \gamma \frac{P_{\xi}(n)}{P_{\zeta}(n)}; \\ 0 & \text{с вероятностью } 1 - \gamma \frac{P_{\xi}(n)}{P_{\zeta}(n)}, \end{cases}$$
(4)

где γ — нормирующая константа, выбираемая из условия, что вероятности для всех *n* вида $\gamma \frac{P_{\xi}(n)}{P_{\zeta}(n)}$ не больше единицы. Как следует из принятых выше условий на поля ξ , вероятность $P_{\xi}(n)$ не равна нулю для всех значений $n < \infty$, и поэтому условие (4) не вырождено. Можно отметить, что определение $\Theta(n)$ и вероятностного пространства случайной величины $\{N'\}$ может быть выполнено достаточно произвольно, поскольку единственным ограничивающим условием на $\Theta(n)$ является (4).

Так как в дальнейшем приводится одна из конкретных конструкций построения вероятностного пространства и случайного поля ξ на нем, исходя из случайного поля ζ , то мы оставляем решение этой задачи до рассмотрения соответствующего примера, здесь лишь можно отметить, что построенная таким образом величина $\{N'\}$ еще не совпадает с $\{N\}$, поскольку отличается от нее значением вероятности

$$P(\{N\} = 0), \text{ t. e. } P_{\xi}(\{N\} = 0) \neq P(\{N'\} = 0).$$
 (5)

Чтобы закончить решение рассматриваемой задачи, следует провести перенормировку вероятностей величины ξ в точке $\{N'\} = 0$ до значения $P(\{N'\} = 0) = \gamma P_{\xi}(\{N\} = 0)$.

Построенная случайная целочисленная величина совпадает с $\{N\}$.

Как теперь определить преобразование (в общем случае нелинейное), позволяющее из заданного поля получить поле с требуемыми характеристиками? В соответствии с предлагаемым представлением можно определить преобразования для каждого заданного числа *n*.

Из (1) и (2) следует, что необходимо определить соответствие между $y = \{y_1, ..., y_n\}$ и $x = \{x_1, ..., x_n\}$, преобразующее вектор x в вектор y так, чтобы имело место

$$W_{\xi}(y) = \left| \frac{\partial x}{\partial y} \right|_{n} W_{\zeta}(x(y)), \tag{6}$$

где $\left|\frac{\partial x}{\partial y}\right|_n$ — модуль якобиана нелинейного преобразования.

Отметим еще раз, что $x_1, ..., x_n$ и $y_1, ..., y_n - это координаты первой, второй, ...,$ *n* $-й точек соответственно для поля <math>\zeta$ и поля ξ . К уравнению (6) необходимо присоединить уравнение связи

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial x}{\partial y} \right|_{n} W_{\zeta}(x_{1}(y); x_{2}(y); ..., x_{n}(y)) = \\ &= \int_{V} ... \{ ... \int_{V} \left| \frac{\partial x}{\partial y} \right|_{n+m} W(x_{1}(y'), x_{2}(y'), ..., x_{n}(y'); \\ x_{n+1}(y'); x_{n+2}(y'); x_{n+m}(y') dy_{n+1} dy_{n+2} ... dy_{n+m}), (7) \end{aligned}$$

где $\{y_1, y_2, ..., y_n\}; y' = \{y_1, y_2, ..., y_n; y_{n+1}, y_{n+2}, ..., y_{n+m}\}; V$ — область задания потоков ζ и ξ .

В уравнении (7) m — произвольно. В (6) и (7) рассматриваются однозначные нелинейные преобразования случайных величин x и y. Заметим, что y_i , равно как и x_i , — это координаты *i*-й точки, т. е. они представляют векторы в евклидовом пространстве. Поэтому соответствующие интегралы и якобианы необходимо понимать именно в пространстве $n \times k$ измерений (k — размерность евклидова пространства).

Можно ли найти невырожденное преобразование *n* точек потока ζ в *n* точек потока ξ (можно для определенности считать, что *i*-я точка переводится в *i*-ю), удовлетворяющее условиям (6) и (7). Для пуассоновского исходного потока ζ величина $W_{\xi}(x)$ является плотностью вероятностей равномерного закона распределения — константой. Будем считать V (для простоты анализа) кубом в *k*-мерном пространстве. Уравнение (6) перепишется в виде

$$W_{\xi}(y) = \left| \frac{\partial x}{\partial y} \right|_{n}.$$
 (8)

Таким образом, необходимо решить дифференциальное уравнение в частных производных относительно функций x₁, ..., x_n, зависящих от переменных $y_1, ..., y_n$, вернее показать, что указанное решение существует и может быть получено. Порядок дифференциального уравнения, определяемый правой частью (8), равен $n \times k$, однако число слагаемых в правой части (8) равно $(n \times k)^2$, т. е. мы можем "управлять" решением уравнения, налагая по своему усмотрению условия на некоторые частные производные, входящие в якобиан или коэффициенты при них. Ясно, что по крайней мере локально в "малой окрестности" какой-либо точки области И можно определить непрерывное решение дифференциального уравнения (8), обеспечиваемое невырожденностью якобиана. Необходимо доказать существование решения во всей области V, но в соответствии с известными из анализа теоремами существования решений дифференциальных уравнений в частных производных оно определяется с точностью до $(n \times k - 1)$ произвольных функций. Кроме того, в нашем распоряжении имеются $(n \times k)^2 - (n \times k)$ произвольных функций (частных производных — элементов матрицы якобиана). Поэтому можно всегда поправить решение, скажем, в d точках области V (для любого конечного d) так, чтобы якобиан был невырожденным. Поскольку V – компактно по условию, то эти d точек и их число можно выбрать так, чтобы объединение областей существования решения накрывало все V, т. е. склеенное решение удовлетворяло поставленным выше условиям. Наконец, уравнения связи (7) выполняются автоматически в силу условия

$$\int_{V} \dots \int_{V} W_{\xi}(y_{1}, y_{2}, ..., y_{n};$$

$$y_{n+1}, \dots, y_{n+m}) dy_{n+1} dy_{n+2} \dots$$

$$\dots dy_{n+m} = W_{\xi}(y_{1}, y_{2}, ..., y_{n}).$$
(9)

Отмеченное выше нелинейное отображение x(y) или $y(x) = x^{-1}(y)$ еще не дает нам аппарата для его построения. Поэтому далее мы специально сосредоточиваем внимание на конструировании точечных полей из поля, имеющего относительно "простую" конструкцию. Как условились выше, примером такого поля может являться пуассоновское, для кото-

рого соответствующая плотность вероятности нахождения n точек в заданном объеме V равна константе c, с одной стороны, а с другой, $P_{\zeta}(n)$ не равна нулю для всех п. Сам поток моделируется достаточно просто, но только в том случае, когда его интенсивность постоянна. Если это не так и интенсивность является многомодальной функцией, то моделирование пуассоновского поля классическим методом (путем поиска нелинейного преобразования, существование которого было доказано выше) оказывается весьма сложной задачей несмотря на то, что поток является пуассоновским. Последнее связано с тем, что для определения координат каждой из точек и их числа необходимо решать интегральное уравнение со сложным ядром. Даже при наличии существования решения его реализация на ЭВМ требует значительных ресурсов памяти и времени.

В качестве полезного в дальнейшем примера рассмотрим одномерный пуассоновский процесс с интенсивностью $\lambda(t)$ (t — координата). Стандартная схема состоит в том, что на основании утверждения о равномерном распределении функции распределения случайной величины отыскиваются (последовательно) координаты каждой из точек поля. Рассмотрим теперь выбор первой точки. Предполагая, что моделирование поля проводится на интервале [0, T], в соответствии с нашими допущениями получим, что функция распределения интервала [0, t), где t место фиксации первой точки поля, имеет вид

$$\xi = F_{\zeta}(\zeta < t) = 1 - \mathbf{e}^{0} \qquad (10)$$

Поэтому моделирование координаты t первой точки проводится в два этапа: сначала разыгрывается случайная величина ξ , распределенная по равномерному закону на интервале [0, 1], затем из уравнения (10) определяется случайное значение t, соответствующее данному (разыгранному) ξ , т. е. решается уравнение вида

$$\int_{0}^{t} \lambda(s) ds = -\ln(1-\xi)$$
(11)

относительно *t*. После определения *t* розыгрыш второй точки выполняется в точности по той же схеме, за исключением того, что начало отсчета помещается в первую точку. Сразу же отметим, что наиболее простая часть схемы моделирования — выбор ξ — не компенсирует сложностей, обусловленных необходимостью вычисления интеграла по *s*. За редким исключением, интеграл в (11) слева необходимо определять численными методами, что требует определенных затрат машинного времени, за-

висящих от сложности представления функции $\lambda(s)$, но, самое главное, функция, как правило, неизвестна заранее. Она сама может определяться из системы дифференциальных, интегральных и т. п. уравнений, имеющих в качестве возмущающей компоненты составляющие шумы, определяющие случайный характер поведения $\lambda(s)$ в каждой точке. Если действовать в соответствии с (10), то сначала надо определить $\lambda(s)$, затем интеграл в (10) слева и найти значение t, при котором он равен выражению справа. Можно обойти процедуру вычисления интеграла в (10), заменив ее методом прореживания мажорирующего поля. Последнее становится особенно удобным, когда от одномерного пространства мы переходим к рассмотрению полей, заданных в пространстве многих измерений. Еще раз подчеркнем, если бы была известна функция $\lambda(s)$ во всех точках пространства V, то задача моделирования поля могла бы решаться по схеме, предложенной при доказательстве существования решения, т. е. разыгрывалось бы число точек в области *n*, а затем определялось месторасположение каждой из них. Однако при $\lambda(s)$, заданной в неявной форме, заранее неизвестной и случайной, ее приходится вычислять во всех точках V и запоминать указанные значения, что требует значительных затрат времени и памяти. Альтернативным, конечно, является подход, основанный на применении последовательной разворачивающейся по мере вычисления λ(s) процедуры моделирования поля. Чтобы перейти к ней, вложим рассматриваемое поле в подходящим образом подобранный точечный процесс.

Пусть (Ω , *f*, *F*, *P*) определяет стохастический базис (см., например, [4]) с $F = (f_t)$, $t \ge 0$; Ω — вероятностное пространство; $f - \sigma$ -алгебра подмножеств Ω ; F — неубывающее семейство σ -алгебр, в другой терминологии называемое фильтрацией, удовлетворяющее условиям

$$f_t = \bigcap_{u > t} f_u, \ t \ge 0;$$

f0 — пополнена множествами нулевой меры из f.

Здесь \cap знак пересечения σ -алгебр. Поскольку мы сами определяем "вложение" поля в процесс, то удобно считать, что f_t — непрерывна справа и, по крайней мере, пополнена так, как это было отмечено выше. Мы будем стремиться к использованию более простых конструкций, избегая процедуры конструирования полей из патологических элементов, хотя применение последних могло бы (после соответствующей работы) привести к возможной оптимизации задачи.

Обозначим: D(F) и P(F) соответственно опциональную и предсказуемую σ -алгебры случайных множеств в $\Omega \times R_+$. Далее R_+ — положительная вещественная прямая $[0, \infty)$, (E, ε) — лузинское пространство; E — борелевское подмножество компактного метрического пространства с борелевской σ -алгеброй ε , в нашем случае подмножество евклидова пространства с естественной топологией;

$$\Omega = \Omega \times R_{+} \times E;$$

$$\widetilde{f} = f \otimes B(R_{+}) \otimes \varepsilon;$$

$$D = D \otimes \varepsilon;$$

$$\widetilde{P} = P \otimes \varepsilon,$$

где $A \otimes B$ — наименьшая σ -алгебра, содержащая σ -алгебры A и B; $B(R_+)$ — борелевская σ -алгебра подмножеств из R_+ .

Случайная мера на $R_+ \times E$ определяется соотношением

$$\mu = \{\mu(\omega; dt, dx), \omega \in \Omega\}$$
(12)

как семейство σ -конечных неотрицательных мер $\mu(\omega;.) \omega \in \Omega$ на $(R_+ \times E, B(R_+) \otimes \varepsilon)$, таких что при каждом $A \in B(R_+) \otimes \varepsilon$ величина $\mu(.; A)$ является *f*-измеримой и, кроме того,

$$\mu(\omega; \{0\} \times E) = 0 \ \forall \omega \in \Omega.$$
 (13)

Для предполагаемой конструкции процесса в качестве *E* берется компактное подмножество евклидова пространства *V* с естественной метрикой на нем. Можно по-разному задать точечный процесс на $E \times R_+$. Полагая поле пуассоновским, при определении последовательной процедуры моделирования можно считать меру µ целочисленной, т. е.

$$\mu(\omega; \{t\} \times E) \leq 1$$
 для всех $\omega \in \Omega, t \in R_+;$

для всякого $\Gamma \in B(R_+) \otimes \varepsilon$ случайная величина $\mu(.;\Gamma)$ принимает значения в множестве {0, 1, ..., ∞}; μ опциальна; μ — является \tilde{P} — σ -конечной. Теперь вопрос о конструировании случайного процесса связывается с определением фильтрации $F = (f_t)_{t \ge 0}$. Считаем, что фильтрация F непрерывна справа и представляет собой расширяющийся поток σ -алгебр пуассоновского процесса.

Как сформировать поле из процесса? Наиболее простой путь состоит в том, чтобы "спроектировать" точки процесса на *E*, т. е. "склеить" их по координате

 R_+ , полагая, что моделирование происходит на конечном отрезке [0, *T*] (условие, обеспечивающее конечность числа точек в множестве *V*). Таким образом, мы добились (см. пример выше) независимого моделирования каждой из точек в отдельности.

Как сформировать заданную интенсивность $\lambda(x, s)$ ($x \in E = V$, $S \in R_+$) без решения интегрального уравнения относительно *t* в каждой из точек множества $E \times [0, T]$. Это тем более кстати, поскольку для разных сечений $x \in E$ интенсивность $\lambda(s, x)$ может задаваться различными соотношениями. Так как в *V* возможны разрывы интенсивности, то, вообще говоря, при реализации процесса через интеграл по S необходимо вычислять и запоминать значения

 $\int_{0} \lambda(s) ds$ для каждой точки $x \in V(V = E)$, что совер-

шенно недопустимо при численном моделировании.

Изложенные выше ограничения на случайный точечный процесс подводят нас к необходимости использования понятия мультивариантного точечного процесса $(T_n, x_n)_{n \ge 1}$ на $(R_+ \times E_1 B(R_+) \otimes \varepsilon)$, где T_n — марковские моменты, такие что $T_1 > 0$ и $T_n < < T_{n+1}$ на $\{T_n < \infty\}$. Кроме того, функции $T_{n+1} = T_n$ на множестве $\{T_n = \infty\}$. Случайные элементы x_n обладают свойством $x_n \in E$ на $\{T_n < \infty\}$ и $x_n = \delta$ на $\{T_n = \infty\}$, где δ — "фиктивная" точка, не принадлежащая E:

$$(\delta \notin E), \{x_n \in C\} \in f_{T_n}, \forall C \in \varepsilon, n \ge 1.$$

Для такого точечного процесса справедливо представление

$$\mu(\omega; dt, dx) = \sum_{n \ge 1} I(T_n < \infty) \varepsilon_{(T_n, x_n)}(dt, dx), \quad (14)$$

где I(A) — индикатор множества A; $\varepsilon_a(dt, dx)$ — функция Дирака, равная 0 вне точки a, в точке a она равна 1.

Компенсатор меры μ определяется соотношением

$$v(\omega; dt, dx) = \sum_{n \ge 0} I(T_n < t \le T_{n+1}) \frac{G_n(\omega; dt, dx)}{H_n(\omega; [t, \infty))},$$

где $G_n(\omega; dt, dx)$ — регулярное условное распределение $(T_{n+1}; x_{n+1})$ при условии f_{T_n} — измеримости и определения $H_n(\omega; dt)$ из соотношения

$$H_n(\omega; dt) = G_n(\omega; dt; E \cup \{\delta\}).$$

В соответствии с предлагаемой схемой моделирования рассмотрим точечный мультивариантный процесс $Z = (T_n, z_n)$ вида

z = xy,

где x — пуассоновский процесс в $V \times R_+$, согласованный с фильтрацией χ_t ; y — считающий процесс (принимающий значения 0 и 1), согласованный с χ_t .

Для простоты рассматривается "естественный" поток σ -алгебр $\chi = (\chi_t)_{t \ge 0}$, отвечающий мере μ , с фильтрацией

$$\chi_t = \sigma\{\mu(\omega; (0; S] \times B), S \leq t, B \in \varepsilon\}.$$

Пусть для процесса x условное распределение на V равномерно, а процесс y для $t = T_n$ строится следующим образом:

$$y = (T_n, y_n);$$

$$y_n = \begin{cases} 0 & \text{при} & \eta < \frac{\lambda(\omega; t, x)}{\lambda} < 1; \\ 1 & \text{при} & \eta \ge \frac{\lambda(\omega; t, x)}{\lambda} \end{cases} .$$
(15)

В (15) η — случайная величина, имеющая равномерное распределение, $\lambda(\omega; t, x)$ — желаемое (моделируемое) распределение "интенсивности" точечного процесса; λ — "интенсивность" потока *x*, выбираемая из условия

$$\int_{V} \frac{\lambda(\omega; t, x) dx}{\lambda} < 1$$

с заданной вероятностью (вообще говоря, равное 1).

В соответствии с (12) и (13) компенсатор процесса *z* имеет вид

$$v^*(\omega; dt, dx) =$$

$$= \sum_{n \ge 0} I(T_n \le t \le T_{n+1}) \frac{G_n^*(\omega; dt, dx)}{H_n^*(\omega; [t, \infty))}, \quad (16)$$

где $G_n^*(\omega; dt, dx)$ (аналогично H_n^*) — требуемое условное распределение (I_{n+1}, x_{n+1}); T_n — соответст-

вующие марковские моменты. Последнее следует из того, что "интенсивность" потока *z*, полученного на основании (14) и (15), совпадает почти наверное с интенсивностью $\lambda(\omega, t, x)$ во всех точках { $V \times [0, T]$ }, где [0, *T*] — интервал моделирования. Поэтому условные вероятности, однозначно определяемые заданными распределениями $\lambda(\omega, t, x)$, равны (вычисление G_n^* в явной форме возможно лишь в исклю-

ление G_n в явной форме возможно лишь в исключительных случаях).

* * *

Потоки с вырожденным распределением $\lambda(\omega, t, x)$ промоделировать удается не всегда из-за возможной неизмеримости $\lambda(\omega, t, x)$ относительно $(\chi_t)_{t > 0}$. В этом случае можно попытаться аппроксимировать соответствующие σ -алгебры путем измельчения (χ_t) $_t > 0$, связанного с увеличением интенсивности потока х. Однако последнее — тема отдельного исследования. Несмотря на это предложенная процедура ((14) и (15)) позволяет промоделировать потоки (поля) достаточно общего вида, охватывающие класс процессов и полей, встречающихся в задачах представления и интерпретации поверхностных и объемных нано- и микроструктур. Обычные трудности моделирования, связанные с необходимостью предварительного определения областей унимодальности, при использовании предложенных алгоритмов даже не возникают в качестве постановочных. В силу общности полученных результатов они могут быть перенесены и на задачи моделирования полей и процессов в оптико-электронных, радиолокационных, акустических и гидролокационных системах.

Список литературы

1. **Гуров И. П.** Формирование и анализ стохастических интерференционных полей. // Проблемы когерентной и нелинейной оптики / Под ред. И. П. Гурова и С. А. Козлова. СПб.: СПбГИТМО, 2000. С. 67—87.

2. Yoshimura T., Kida K., Masazumi N. Development of an image processing system for a low coherence interferometer // Optics Communications. 1995. N 117. P. 207–212.

3. Лабунец Л. В., Мусьяков М. П. Параметрическая модель однородных анизотропных случайных полей // Изв. АН СССР. Сер. Техническая кибернетика. 1988. № 3. С. 191–199.

4. Анулова С. В., Веретенников А. Ю., Крылов Н. В., Липцер Р. Ш., Ширяев А. Н. Стохастическое исчисление. Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. М.: ВИНИТИ, 1989. Т. 45. 260.

Материаловедческие и технологические основы МНСТ

УДК 519.2:541.1

Г. А. Тарнавский, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: gennady.tarnavsky@gmail.com

ИМПЛАНТАЦИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В ПОДЛОЖКУ КРЕМНИЯ С НЕПЛАНАРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

На основе компьютерного моделирования проводится исследование влияния параметров технологического процесса (прицельного угла и энергии имплантации) на распределения концентраций легирующих примесей в кремниевой подложке.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, легирование кремния, имплантация, донорные и акцепторные примеси

Введение

Современные технологии проектирования, конструирования и производства наноэлектромеханических систем (НЭМС-технологии) базируются на сложных физико-химических и механических процессах. Эти процессы составляют цепочку базовых стадий (сегментов) промышленного производства разнообразных НЭМС-устройств.

Одним из важных технологических процессов является легирование. Легирование (допинг) — процесс внедрения в кремниевую пластину примесей акцепторного и/или донорного типа (фосфора, мышьяка, сурьмы, бора, галлия и т. п.) в целях создания в полупроводнике зон повышенной проводимости *n*- и *p*-типа для организации диодных и транзисторных каналов.

Кроме этого, легирование может быть направлено на достижение иных технологических целей. Например, легирование бором останавливает процесс травления основного материала.

Среди технологий легирования наиболее эффективной и применяемой в настоящее время является ионная имплантация, которая заключается во внедрении в полупроводниковый материал ионизированных атомов, разогнанных в электрическом поле и имеющих высокую энергию. Эта технология требует специализированных сложных установок, но является намного более точной, чем диффузионный метод, и применяется для создания скрытых слоев, *p*- и *n*карманов, доменов в чипе, формирующих транзисторные каналы.

Компьютерные эксперименты, являясь, по сравнению с физическими, более мобильными и гораздо более дешевыми (если не считать затрат на интеллектуальные усилия), с возможностью перебора сотен и даже тысяч вариантов, с быстрым и эффективным анализом их результатов, а также со способностью наращивания уровней используемых физикоматематических моделей играют все более и более возрастающую роль в дизайне новых полупроводниковых материалов.

В настоящей работе на основе компьютерного моделирования проводится исследование влияния параметров технологического процесса (прицельного угла и энергии имплантации) на распределение концентраций легирующих примесей в кремниевой подложке).

Компьютерный инструментарий

Программный комплекс *NanoMod* [1] предназначен для проведения научных исследований и прикладных разработок в области микроэлектроники, в том числе микропроцессорной техники. Комплекс может быть использован для обучения специалистов, аспирантов и студентов в данной области знания.

Вычислительный инструментарий *NanoMod* создается на базе современных оригинальных алгоритмов моделирования электрофизических, термохимических и механических процессов (см. [2] и библиографию в ней) для компьютерной поддержки автоматизированного проектирования наноструктурированных полупроводниковых материалов.

В работе представляются результаты, полученные при использовании одного из сегментов программного комплекса — решателя IMPL (*implantation*).

Решатель IMPL

Алгоритм сегмента основан на методе численного расчета закона Гаусса для распределения в кремниевой подложке концентраций допинг-примесей различных элементов, внедренных способом ионной имплантации [3]:

$$C_1(\xi) = A \exp\left(B(\xi - \xi_0)^2\right).$$
 (1)

В выражении (1) координатное направление ξ есть направление движения ионов от разгонного устройства к подложке. В общем случае это направление не перпендикулярно к поверхности подложки, а составляет с нормалью к ней угол α_I . Значение координаты ξ отсчитывается от точки начала внедрения иона в подложку с увеличением значения ξ при движении в глубь материала. Величины *A*, *B* и ξ_0 являются константами, зависящими от физических факторов — типа *S*_I и дозы *D*_I имплантата, энергии ускорения ионов *E*_I:

$$A = A(S_{I}, D_{I}, E_{I}); B = B(S_{I}, D_{I}, E_{I});$$

$$\xi_{0} = \xi_{0} (S_{I}, D_{I}, E_{I}).$$
(2)

Величина ξ_0 в формулах (2) является глубиной максимума внедрения ионов в подложку — пиком распределения Гаусса (1) с экспоненциально уменьшающейся вглубь материала и к его поверхности концентрацией примесей.

При наличии на поверхности подложки защитных масок, непрозрачных для потока имплантируемых ионов, может быть учтено распространение примесей в тангенциальном направлении под маской, вдоль второго координатного направления η , перпендикулярного ξ (подробнее см. [4]):

$$C_2(\eta) = F \cdot \operatorname{erf}\left(k(\eta - \eta_0)\right); \tag{3}$$

$$F = F(S_{I}, D_{I}, E_{I}); k = k(S_{I}, D_{I}, E_{I});$$

$$\eta_{0} = \eta_{0}(S_{I}, D_{I}, E_{I}).$$
(4)

Величины F, k и η_0 в (3)—(4) имеют следующий смысл. Параметр η_0 есть координата края маски, от которого отсчитывается значение координаты η (под маску), а параметры F и k являются константами, зависящими от физических параметров задачи.

Результирующая концентрация выражается в виде

$$C(\xi, \eta) = C_1(\xi)C_2(\eta).$$
 (5)

В координатах (x, y) реальных задач при непланарности поверхности подложки и/или ненулевом значении прицельного угла имплантации функция C(x, y) в (5) не может быть представлена в виде расщепления на произведение $C_1(x)$ и $C_2(y)$. Вследствие этого в решателе используется численный алгоритм расчета задачи (1)—(5) в координатах (ξ , η). Затем это решение представляется в координатах (x, y).

Значения величин S_I , D_I , E_I , α_I вводятся пользователем в соответствии с формулировкой задачи. Значения параметров A, B, F, k, ξ_0 и η_0 содержатся в специализированной БД комплекса и вводятся системой поддержки заданий без участия пользователя. Следует отметить, что полнота таблиц этих параметров и их постоянно уточняемые в физических экспериментах (выполняемых на современной исследовательской технике) числовые значения, которые своевременно вводятся в базу данных решателя, повышает эффективность вычислительного инструментария.

Результаты компьютерного моделирования

Формулировка задачи. В области R

$$x \in [0, x_{\max}], y \in [0, y_{\max}],$$
 (6)

состоящей из двух подобластей — подобласти внешней среды $R_{\rm V}$ и подобласти кремния $R_{\rm Si}$, которые разделяются границей

$$y = Y_{\rm Si}(x),\tag{7}$$

отыскивается решение задачи (1)-(5).

При этом полагается, что легирование проводится только в R_{Si} , т. е. $y < Y_{Si}$, а в R_V имеют место нулевые концентрации имплантируемых примесей.

Для численного решения задачи (1)—(5) в (6) строится дискретная расчетная сетка с числом узлов N_x и N_y по направлениям x и y соответственно.

В представляемом ниже спектре задач моделирование проводилось в области $x_{max} = 100$ нм и $y_{max} = 60$ нм на сетке с $N_x = 151$ и $N_y = 151$ при следующих значениях параметров задачи в выражениях (2) и (4): исследовалась имплантация фосфора P, бора B и мышьяка As (параметр S_I), доза имплантата была фиксированной ($D_I = 10^{15}$ см⁻³), а энергия имплантации E_I варьировалась в пределах от 5 до 20 эВ.

Значения концентраций, полученных в расчетах, приводятся в размерных единицах $[cm^{-3}]$.

Имплантация в кремний с планарной поверхностью. Рассмотрим результаты решения задачи при постоянном значении $Y_{Si}(x) = 35$ в функции (7), энергии имплантации 5 эВ и трех типах допинга: As, B и P.

Рис. 1 (см. вторую сторону обложки) иллюстрирует результаты вычислений сегмента. Показана схема имплантации и распределение концентраций мышьяка As и бора B в кремнии Si.

Заметим, что при одной и той же энергии имплантации глубина внедрения В в Si больше, чем As в Si. Максимум распределения As имеет место при y = 20 (на глубине 15 нм от поверхности), а В — при y = 0 (глубина 35 нм).

Максимум концентрации фосфора (рис. 2, a, см. вторую сторону обложки) находится на глубине 20 нм (y = 15). Таким образом, при одной и той же энергии имплантации фосфор внедряется в кремний глубже, чем мышьяк, но уступает по этому показателю бору.

Ширина имплантированного слоя больше всего у As, а меньше — у В. Процесс диффузии примесей с течением времени размывает это распределение со скоростью, зависящей от ряда факторов (температуры, типа кристаллической решетки и др.).

Проанализируем влияние прицельного угла имплантации α_I . На рис. 2 показаны результаты расчета имплантации фосфора при значении $\alpha_I = 0^{\circ}$ (рис. 2, *a*) 30° (рис. 2, *б*) и 60° (рис. 2, *в*). Угол α_I отсчитывается от координатных линий x = const, в данной задаче — от направления нормали к поверхности базовой подложки.

Априори можно прогнозировать, что в результате моделирования 2D-задачи должны быть получены 1D-структуры распределения концентраций C = f(y), и такая постановка задачи является, помимо получения научных данных, тестом на корректность функционирования вычислительного алгоритма и реализующей его компьютерной программы.

Результаты расчетов соответствуют прогнозам: распределения концентраций фосфора зависят только от координаты *у*.

При этом имеет место следующий факт — с увеличением α_I глубина внедрения Р в Si уменьшается и, естественно, прямо пропорционально $\cos \alpha_I$, что имеет место на рис. 2.

Функции распределения $C(\alpha_I, y)$, где α_I рассматривается как параметр, коррелируют друг с другом при вариации α_I с небольшими отличиями.

Так, функция $C(60^\circ, y)$ более узколокализована, чем $C(0^\circ, y)$, и ее максимум примерно на 15 % больше. Вид и цифровые значения функции $C(30^\circ, y)$ занимают промежуточное положение между $C(0^\circ, y)$ и $C(60^\circ, y)$.

Отличия функций связаны с близостью границы Si к координате у максимума распределения Гаусса (1), и "хвост" этого распределения "отсекается" поверхностью подложки.

Имплантация в подложку с непланарной поверхностью. Рассмотрим результаты компьютерного моделирования имплантации фосфора Р в кремний Si с непланарной поверхностью при вариации прицельного угла α_I и энергии имплантации E_I .

На рис. 3, *а* (см. вторую сторону обложки) показана конфигурация (размеры в нанометрах) базовой подложки Si с отфрезерованными в ней канавками. Этап технологического цикла операций с подобными конфигурациями часто имеет место при формировании полупроводниковых материалов с заданными электрофизическими свойствами НЭМС-узлов, в частности, элементов трехзатворных нанотранзисторов SON-конструкций (*silicon-on-nothing*, см., например, [5, 6]).

На рис. 3, δ и 3, ϵ показаны распределения C(x, y) при значениях $\alpha_I = 0^\circ$ и 60° соответственно.

При $\alpha_I = 0^{\circ}$ допинг-примеси образуют узколокализованные домены с размерами 5...10 нм и максимумами глубины внедрения около 7...8 нм (при данной энергии имплантации $E_I = 5$ эВ. Заметим, что в зонах глубоких траншей имплантат достигает нижнего края (дна) подложки.

При имплантации под бо́льшим углом $\alpha_I = 60^{\circ}$ (рис. 3, *в*) допинг-домены, естественно, "разворачиваются" к направлению потока имплантата.

При таком нанорельефе поверхности в подложке возникают теневые зоны. Так, в левом выступе Si концентрация P незначительна, а на бортах траншей и дне пластины концентрация C(x, y) практически равна нулю.

Влияние энергии имплантации E_I при фиксированном прицельном угле $\alpha_I = 30^\circ$ и том же нанорельефе поверхности иллюстрирует рис. 4 (см. вторую сторону обложки). Возрастание E_I от 5 эВ (рис. 4, *a*) до 10 эВ (рис. 4, *б*) и далее, до 15 эВ (рис. 4, *в*) существенно меняет картину распределения Р в Si.

Меняется дислокация, размеры и интенсивность допинг-пятен. Так, в частности, при $E_I = 5$ эВ в центральном выступе образуется допинг-домен, хотя и небольшой интенсивности и размера, но достаточно заметный. При $E_I = 10$ эВ этот домен существенно размывается, а при $E_I = 15$ эВ центральный выступ вообще является "прозрачным" для потока имплантата, который "проходит его насквозь" и дислоцируется в левом сегменте конфигурации подложки.

Концентрация Р в левом сегменте существенно зависит от E_I и меняется от небольшого домена (рис. 4, *a*) до образования обширной зоны (рис. 4, *в*).

Правый сегмент конфигурации подложки, как незатемняемый, более консервативен по отношению к вариации E_{I} : допинг-домен здесь имеет примерно одинаковые размеры, но, естественно, при увеличении E_{I} смещается вглубь подложки вплоть до самого ее дна (рис. 4, θ).

В заключение отметим, что функция C(x, y) определяет организацию в Si зон повышенной электропроводности, в которых возможна организация (см., например [6, 7]) каналов нанотранзисторов.

Миниатюризация НЭМС: проблемы математического моделирования

Совершенствование промышленного производства электроники и переход за последние 5 лет от технологий 130 нм к технологиям 90 нм, 65 нм, 45 нм, 32 нм и к 22 нм ставит новые и весьма сложные проблемы математического моделирования электрофизических, термохимических и механических процессов, используемых в этих технологиях, в рамках модели сплошной среды.

Так, размер расчетной области задачи R, как правило, составляет уже около 100 нм (в разных координатных направлениях по-разному, в зависимости от формулировки задачи). Выпишем некоторые физические характеристики кремния Si (при температуре около 300 К и давлении 1 атм):

длина волны де Бройля $L_1 - 12$ нм,

шаг кристаллической решетки $L_2 - 0,54$ нм,

размер атома по Мелвину-Хьюзу L₃ - 0,12 нм.

Сопоставляя значения R со значениями L_1 , L_2 и L_3 , можно сделать некоторые важные выводы.

Во-первых, поскольку R больше L_1 (условная граница начала проявления квантовых эффектов Si), существенно больше L_2 и много больше L_3 , то модель сплошной среды достаточно (**пока еще**) справедлива и применима.

Во-вторых, однако, имеет место следующее. Пусть при расчете используется сетка в N узлов. Тогда шаг сетки d = R/N. При R = 100 нм и N = 100 имеем d = 1 нм. Таким образом, шаг сетки d меньше L_1 , сравним с L_2 и больше L_3 .

При стремлении увеличить точность расчета в "классических" случаях (бифуркационные ситуации оставим в стороне) следует увеличить N, например, до 1000 узлов. В этом случае шаг сетки d равен 0,1 нм, сравним с размером атома кремния L_3 и в 5 раз меньше L_2 , т. е. при построении сетки каждые четыре узла из пяти попадают в межатомное пространство кристаллической решетки.

Таким образом, становится неопределенным, какой именно процесс моделируется. Вообще говоря, эти рассуждения не вполне корректны, поскольку при использовании модели сплошной среды предполагается "усреднение" вещественной субстанции, в которой нет ни атомов, ни их группировок в решетке, и где можно формулировать непрерывную дифференциальную задачу, в которой процессы описываются дифференциальными уравнениями, например диффузии, с эмпирическими коэффициентами, полученными из реалий (стандартный или напряженный кремний, температура и т. п.).

Дискретизация непрерывной задачи (построение вычислительного алгоритма), естественно, вносит свои проблемы (аппроксимация, сходимость. единственность решения). Однако эти проблемы носят совершенно другой характер и не имеют ничего общего с проблемами адекватности модели сплошной среды в отношении к реальным процессам.

Резюмируя вышесказанное, можно констатировать следующее. **В целом** модель сплошной среды на размерах 100 нм еще достаточно корректна, но **локальное** моделирование структур уже требует специального анализа и осторожности при интерпретации полученных численных результатов.

Современные технологии позволяют создавать НЭМС с размерами элементов менее 10 нм. Так, в НЭМС-транзисторах применяют двухслойные подзатворные диэлектрики. Первый слой — термический диоксид кремния SiO_2 толщиной 1 нм и менее. Второй слой — нитрид кремния Si_3N_4 (или смесь оксида и нитрида) имеет примерно аналогичную толщину. При таких размерах точность расчета процесса оксидирования в рамках модели сплошной среды становится весьма сомнительной. Требуется использование более сложных физико-математических моделей и реализующих их вычислительных алгоритмов.

Переход же к квантово-механической модели с необходимостью построения операторов Гамильтона и решения уравнений Шредингера потребует создания новых теоретических методов, вычислительных алгоритмов и применения суперкомпьютеров высокой мощности.

Заключение

В работе проведено компьютерное моделирование одного из важных технологических процессов, применяемых при конструировании новых полупроводниковых материалов с заданными электрофизическими свойствами, — процесса имплантации легирующих примесей в базовую подложку кремния с непланарной поверхностью.

Исследовано влияние параметров процесса (прицельного угла и энергии имплантации) на распределения концентраций примесей фосфора, бора и мышьяка в кремнии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-07-12001-офи).

Список литературы

1. Тарнавский Г. А., Анищик В. С. Решатели процессорной системы программного комплекса NanoMod // Нано-и микросистемная техника. 2009. № 4. С. 6—13.

2. Тарнавский Г. А., Анищик В. С. Инструментарий NanoMod компьютерной поддержки проектирования наноструктурированных полупроводниковых материалов // Вычислительные методы и программирование. 2009. Т. 10. Разд. 2. С. 34—50.

3. **Runge H.** Distribution of implanted ions under arbitrarily shaped mask // Phys. Stat. Sol. 1977. V. 39 (a). P. 595–607.

4. Furikawa S., Matsumura H., Ishiwara H. Theoretical consideration on lateral spread of implanted ions // Jap. J. Appl. Phys. 1972. V. 11. N. 2. P. 134–142.

5. Monfray S., Skotnicki T., Tavel B., Morand Y., Descombes S., Talbot A., Dutarte D., Leverd F., Le Friec Y., Palla R., Pantel R., Haond M., Nier M.-E., Vizioz C., Louis D. Highly-performant 38 nm SON (Silicon-On-Nothing) P-MOS-FETs with 9 nm-thick channels // IEEE SOI Conference Proc. 2002. P. 22–35.

6. Адамов Д. Ю., Матвеенко О. С. Усовершенствование структур МОП-транзисторов в нанометровых технологиях // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 2. С. 53—63.

7. Мустафаев Ар. Г., Мустафаев Аб. Г. Проблемы масштабирования затворного диэлектрика для МОП-технологий // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 4. С. 17—22. И. А. Аверин, д-р техн. наук, доц., зав. каф., Ю. В. Аношкин, аспирант, ст. преподаватель, Р. М. Печерская, д-р техн. наук, проф., декан, е-mail: micro@pnzgu.ru, ГОУ ВПО "Пензенский государственный университет"

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЕВ РЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР НА НИЗКОРАЗМЕРНОМ УРОВНЕ

Приведены исследования морфоструктуры слоев резистивных структур на основе хромоникелевых сплавов на низкоразмерном уровне. Установлены механизмы образования слоев за счет кластеров. На основании термодинамических и фрактальных аспектов разработана физико-математическая модель управления размерами кластеров путем изменения условий конденсации слоев для метода термического испарения в вакууме.

Ключевые слова: морфоструктура, слой, резистивная структура, поверхность, фрактальность, кластер, модель, низкоразмерный уровень, информационно-измерительный прибор, конденсации

В настоящее время наряду с изучением новых материалов нано- и микроэлектроники продолжаются детальные исследования свойств известных материалов с точки зрения контролируемых изменений. Наибольший интерес представляют резистивные структуры на основе многокомпонентных материалов, которые используются в датчико-преобразуюшей аппаратуре в качестве регистрирующих элементов. Они должны обеспечивать заданные характеристики устройств функциональной электроники и их стабильность в процессе эксплуатации. Поэтому исследования влияния условий конденсации на морфоструктуру слоев, определяющую выходные параметры резистивных структур, являются актуальной проблемой. Причем особое внимание уделяется исследованиям на низкоразмерном уровне.

Объектами исследования являются слои на основе хромоникелевых сплавов для резистивных структур, синтезированные методом термического испарения в вакууме.

Для исследования морфоструктуры поверхности слоев применяют атомно-силовой микроскоп с максимальной областью сканирования — 30 × 30 мкм. Зондами служат стандартные кантилеверы фирмы "NT-MDT" из кремния пирамидальной формы с радиусом закругления 20 нм и жесткостью 1,7 Н/м. Сканирование поверхности проводят при комнатных условиях в контактном режиме при постоянной высоте и силе (уровень сил 0,1...100 нН) взаимодействия зонд — подложка. Анализ результатов исследования морфоструктуры слоев на низкоразмерном уровне проводили в специальной программе SPIP. Типичное изображение поверхности слоев резистивных структур, полученное на атомно-силовом микроскопе (ACM), представлено на рис. 1, *a* (см. третью сторону обложки). Видно, что поверхность состоит из областей (кластеров), имеющих преимущественную ориентацию и овалообразную форму.

Для определения размеров выберем произвольный кластер (рис. 1, δ), длина которого приблизительно равна 1 мкм, а его ширина и высота составляют около 700 нм и 12 нм соответственно (рис. 1, δ).

Для детального анализа изображения поверхности слоя резистивных структур проведено цветовое масштабирование, обеспечивающее четкое изображение кластеров. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) показана поверхность слоя после цветового масштабирования.

На рис. 2, *а* видно, что слои состоят из кластеров. В процессе конденсации слоев формируются кластеры критического размера (область 1 на рис. 2, *a*). Далее кластеры мигрируют по поверхности подложки, соединяясь друг с другом, образуя сначала крупные кластерные группы (область 2 на рис. 2, *a*), а затем макрокластеры (область 3 на рис. 2, *a*), из которых формируется сплошная пленка.

Сегменты кластеров, выделенных с помощью программы SPIP, представлены на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Сравнение сегментов кластеров и их контурных форм (рис. 3) показывает, что кластер, крупные кластерные группы и макрокластеры самоподобны. Следовательно, для них применим фрактальный анализ, позволяющий установить фрактальную размерность, которая характеризует качество поверхности слоев для резистивных структур [2]. Рис. 4 (см. третью сторону обложки) иллюстрирует угловой фрактальный анализ для поверхности слоев резистивных структур, выполненный для трехмерного случая.

Фрактальная размерность морфоструктуры поверхности слоев D_{β} для трехмерного случая составляет 2,47, а для двухмерного — 1,47. Таким образом, идеальная морфоструктура для объемного варианта имеет фрактальную размерность $D_{\beta}^* = 3$, такой поверхности отвечает полусфера или другая правильная геометрическая форма трехмерного объекта. Для двухмерного варианта $D_{\beta}^* = 2$ поверхность соответствует идеально плоской фигуре.

Из экспериментальных исследований морфоструктуры поверхности слоев определим количественную оценку распределения кластеров с учетом условий конденсации. На рис. 5 показана зависимость процентного значения плотности кластеров δ_S на поверхности слоев от условий конденсации для метода термического испарения в вакууме. Наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и расчетных значений, описывающих распределение плотности кластеров на поверхности слоев от условий конденсации, которое оценивается по значению коэффициента Пирсона, равного 0,8... 0,95.

Для определения средней плотности кластеров θ на некотором расстоянии *L* от кластера воспользуемся следующим выражением [2]:

$$\theta(L) = \text{const}L^{-\beta},\tag{1}$$

где const — постоянная; β — показатель степени, $\beta = D_{\beta}^* - D_{\beta}$, в котором параметр расстояния от некоторой точки кластера сложно определить экспериментально. При условии, что пленка состоит из кластеров, а кластеры являются самоподобными и обладают фрактальностью, определение расстояния возможно. При недостаточной локальности интеграционных свойств физического объекта, состоящего из фрактальных элементов, образец представляется как квазиоднородный. О соблюдении подобия между различными фрактальными элементами и частями фрактала в отдельном элементе можно судить только при статическом усреднении [3, 4].

С увеличением плотности кластеров расстояние между ними уменьшается. Так как в работе плотность кластеров оценивается в процентном отношении, то можно предположить, что расстояние будет



Рис. 5. Количественная оценка плотности кластеров на поверхности слоев

величиной, обратной плотности кластеров, тогда получаем следующее эмпирическое выражение:

$$\theta(\delta s, D_{\beta}) = K_{\theta} \left(\frac{1}{\delta s}\right)^{D_{\beta}-2}, \qquad (2)$$

где K_{θ} — эмпирический коэффициент, характеризующий плотность кластеров.

Фрактальная размерность определяется следующим образом:

$$D_{\beta}(T_{\text{исп}}, T_{\Pi}) = 0.875 \exp[9.0 \cdot 10^{-3} \delta s(T_{\text{исп}}, T_{\Pi})].$$
 (3)

Выражение (3) позволяет определить фрактальную размерность на ранних стадиях формирования слоев для различных условий их конденсации. Размер кластеров от условий конденсации можно рассчитать в рамках термодинамической и фрактальной теорий образования кластеров:

$$R_{\rm KI}(T_{\rm UCII}, T_{\rm II}) = \frac{3\Delta\alpha(T_{\rm II})T_{\rm UCII}}{3\Delta\alpha(T_{\rm II})T_{\rm UCII}}, (4)$$
$$Q(T_{\rm UCII})(T_{\rm UCII} - T)K_{\theta} \left(\frac{1}{\delta s(T_{\rm UCII}, T_{\rm II})}\right)^{D_{\beta}(T_{\rm UCII}, T_{\rm II}) - D_{\beta}^{*}}$$

где $\Delta \alpha(T_{\Pi})$ — разность поверхностных энергий, $\Delta \alpha(T_{\Pi}) = 0,137 \exp\left(\frac{148}{T_{\Pi}}\right); Q$ — скрытая теплота фазового перехода, $Q(T_{\text{исп}}) = 2,44 \cdot 10^3 \exp\left(-\frac{495}{T_{\text{исп}}}\right).$

Таким образом, установлены закономерности на низкоразмерном уровне между условиями конденсации и морфоструктурой слоев на основе многокомпонентных материалов. Эти закономерности обеспечивают управление выходными параметрами резистивных структур для информационно-измерительных приборов.

Список литературы

1. Технология тонких пленок / Под ред. Л. Майсселл, Р. Глэнг. М.: Сов. радио, 1977. Т. 2. 768 с.

2. **Суздалев И. П.** Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига, 2006. 592 с.

3. Жабрев В. А., Мошников В. А., Таиров Ю. М., Федотов А. А., Шилов О. А. Золь-гель-технология: учебное пособие / СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2005. 156 с.

4. Золотухин И. В., Соколов Ю. В. Фрактальная структура и некоторые физические свойства углеродного депозита, полученного распылением графита в электрической дуге // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, № 13. С. 71–75.

Элементы МНСТ

УДК 621.317:621.3.049.77

В. Я. Распопов, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Ю. В. Иванов, д-р техн. наук, проф., Д. М. Малютин, канд. техн. наук, проф., Р. В. Алалуев, канд. техн. наук, доц., М. Г. Погорелов, ассистент каф., А. П. Шведов, ассистент каф., В. В. Лихошерст, ассистент каф., С. Е. Товкач, аспирант, Тульский государственный университет, e-mail: tgupu@yandex.ru

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены разработанные на кафедре "Приборы управления" Тульского государственного университета информационно-измерительные микросистемы, которые могут решать задачи измерения параметров движения различных объектов.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр, датчик уровня, пирометрический датчик, магнитный датчик, интегрированная навигационная микросистема, датчик угловой скорости.

Введение

Перспективы современного машиностроения связаны с созданием микросистем, обладающих малыми массой, габаритными размерами, энергопотреблением и себестоимостью при безусловном выполнении целевой функции с заданной точностью.

Начиная с 2001 г. на кафедре "Приборы управления" Тульского государственного университета выполнен цикл работ, в результате которых разработаны информационно-измерительные микросистемы (в дальнейшем микросистемы) для решения задач измерения параметров движения различных подвижных объектов:

- микросистема для измерения негоризонтальности железнодорожного полотна;
- микросистема для измерения линейных ускорений и угловой скорости управляемого летательного аппарата;
- микросистема пирометрического типа для угловой ориентации подвижного объекта;
- микросистема магнитометрического типа для угловой ориентации подвижного объекта.

Микросистема для измерения негоризонтальности железнодорожного полотна

К путевым относятся машины, применяемые при строительстве и ремонте железнодорожного полотна.

Измерение превышения одного рельса над другим и уклона дорожного полотна является одной из важных операций при строительстве, капитальном ремонте и контроле качества железных дорог [3]. Для этого используются датчики прямого измерения на базе физического маятника и датчики компенсационного измерения на основе линейного акселерометра. Датчики уровня могут быть использованы также при соответствующей настройке частотного диапазона для диагностики состояния строительных сооружений, например, мостов, путепроводов и др.

Датчик уровня на базе микромеханических линейных акселерометров представляет собой линейный акселерометр с горизонтально расположенной осью чувствительности, выход которого соединен с фильтром нижних частот, предназначенным для подавления вибрационной составляющей сигнала, так как в большинстве случаев работа датчика осуществляется одновременно с вибрационным уплотнением балласта рабочими органами путевой машины. На рис. 1 показаны варианты размещения датчика уровня на путевой железнодорожной машине.

В табл. 1 приведены параметры вибрационных возмущений, действующих на датчики уровня, установленные на железнодорожных путевых машинах.

Датчик на основе акселерометра преобразует проекцию ускорения свободного падения в электрический сигнал, пропорциональный углу отклонения оси чувствительности датчика от горизонта. На рис. 2 приведена структурная схема датчика ИИУ-М4 на базе микромеханического акселерометра.

Электрический сигнал усиливается предварительным усилителем и фильтруется фильтром

Таблица 1

Возмущения, действующие на датчики уровня при работе железнодорожных путевых машин

Тип путевой машины	Амплитуда вибрационного ускорения, g
ПРМ-5, ВПР-02К, ВПРС, МКТ	1,5
ЭЛБ-4	12,3
ВПО-3-3000	5,5
ЩОМ-6У, ДСП	5,3

















Рис. 9. Линейность характеристики

низкой частоты. На выходе схемы включен масштабирующий операционный усилитель. При $R_{OS} \approx$ ≈ 400 кОм он обеспечивает коэффициент передачи 24 мВ/мм. Дополнительный вывод *M* позволяет пользователю самому выбирать обратную связь и коэффициент передачи. Схема включения датчика оптимизирована по температуре (дополнительная температурная погрешность не превышает 0,035 %/°C). Общий вид датчика ИИУ-М4 показан на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки), а на рис. 4—9 приведены его типовые эксплуатационные характеристики.

На рис. 10 (см. четвертую сторону обложки) показаны путевые машины, на которых могут быть применены датчики ИИУ-М4.

Датчики уровня на микромеханических акселерометрах могут успешно применяться в составе дорожно-строительных машин. В настоящее время ведутся работы по увеличению устойчивости датчиков к воздействию трехкомпонентной вибрации повышенной амплитуды.

Микросистема для измерения линейных ускорений и угловой скорости управляемого летательного аппарата

Осесимметричные летательные аппараты (ЛА) типа ракет в полете, если пренебречь их нутационными колебаниями, в общем случае вращаются по крену с угловой скоростью ω вокруг продольной оси и перемещаются поступательно с линейными ускорениями a_x , a_y , a_z вдоль осей связанной системы координат *XYZ*, начало которой помещено в центр масс (т. *O*) ЛА (рис. 11) [1].

Движение ЛА характеризуется следующими значениями параметров: $\omega = (0 \div 6000)^{\circ}/c$; перегрузка $n_x = a_x/g = -10 \div 100$; $n_x = a_y/g$, $n_x = a_z/g$



Рис. 11. Расположение микромеханических акселерометров микросистемного модуля на борту ЛА с указанием направления осей чувствительности

в диапазоне ± 10 g. При ограничениях на габаритные размеры измерительного модуля и потребляемую им мощность целесообразно изготавливать его в микросистемном исполнении.

На кафедре "Приборы управления" ТулГУ разработан микросистемный модуль для измерения параметров движения ЛА.

Микросистемный модуль собран на основе микромеханических акселерометров фирмы "Analog Devices" [5] и состоит из двухкомпонентного акселерометра (ADXL 321 с диапазоном измерения $\pm 18g$), оси чувствительности которого ориентированы по осям Y и Z, и однокомпонентного акселерометра (ADXL 193 с диапазоном измерения ± 120 g). Эти акселерометры измеряют ускорения a_x , a_y , a_z .

Измерение угловой скорости осуществляется с помощью двух микроакселерометров $A_{\omega 1}$, $A_{\omega 2}$ (ADXL 193), установленных на одинаковом расстоянии *r* (рис. 11) от оси вращения ЛА, а оси их чувствительности перпендикулярны оси вращения ЛА и разнонаправлены. Применение двух микроакселерометров с разнонаправленными осями необходимо для исключения из показаний акселерометров $A_{\omega 1}$, $A_{\omega 2}$ ускорений a_x , a_y , a_z , проецируемых на показания микроакселерометров либо непосредственно, либо через перекрестную чувствительность датчиков.

Значения измеренных центростремительных ускорений оцифровываются и подаются в микроконтроллер, осуществляющий вычисление угловой скорости по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{r}},$$

где $a = \frac{A_{\omega 1} + A_{\omega 2}}{2}$ — среднее значение центростремительного ускорения; *r* — радиус установки микроакселерометров.



Рис. 12. Микросистемный модуль для измерения параметров движения ЛА

К достоинствам такого способа измерения угловой скорости можно отнести то, что в зависимости от измеряемой (максимальной) угловой скорости и требуемой чувствительности может быть применен либо микроакселерометр с другим диапазоном измерения, либо изменен радиус установки от центра вращения.

Недостатки способа, связанные с неравностью радиусов установки микроакселерометров, ликвидируются на этапе калибровки измерительного блока в лабораторных условиях путем изменения соответствующих параметров в управляющей программе микроконтроллера.

Общий вид измерительного модуля показан на рис. 12.

Характеристики модуля:

Типичные выходные характеристики микросистемного модуля приведены в табл. 2.

Для удобства передачи информации сигнал о текущей угловой скорости вырабатывается в формате частоты (Гц). Так как амплитуда выходных сигналов не должна превышать 2 В, то в случае выработки сигнала непосредственно о текущей угловой скорости коэффициент передачи по данному каналу не должен быть выше

$$\mathrm{K}\Pi_{\omega} = \frac{2}{20} \approx 0.1 \, \mathrm{B}/\mathrm{\Gamma}\mathrm{u}.$$

Таблица 2

Типичные выходные характеристики микросистемного модуля

Нулевой сигнал по каналу ω	Шумоподобный сигнал — амплитуда не более 400 мВ с постоянной составляющей 0,05—0,09 В в зависимости от текущей ориентации блока
Нулевой сигнал по каналу <i>А</i> В	0,248
H_{χ} , в Нулевой сигнал по каналу 4 В	1,005
Нулевой сигнал по каналу	1,004
И ₂ , В Коэффициент передачи	0,0965
Коэффициент передачи	0,0157
по каналу A _x , B/g Коэффициент передачи	0,099
по каналу A _y , B/g Коэффициент передачи по каналу A ₋ , B/g	0,099

Обработка результатов экспериментов, проведенных как в лабораторных, так и в "полевых" условиях на пяти образцах микросистемных модулей, показала, что точность определения угловой скорости при достижении 360°/с (до достижения угловой скоростью этого значения полезный сигнал слабо отличим от шумового, что снижает достоверность получаемого результата) составляет не менее 1,8 °/с. Точность определения ускорений несколько выше заявленных (это связано с тем, что в описании приводятся средние значения величин).

В результате анализа характеристик разработанного модуля получено, что возможно изготовление модуля в габаритах до $\emptyset 60 \times 15$ мм при увеличении измеряемой угловой скорости до 144 000°/с.

Микросистема пирометрического типа для угловой ориентации подвижного объекта

Определение углов крена и тангажа в связанной системе координат является важнейшей задачей для успешного пилотирования любого летательного аппарата. В беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), особенно класса "микро", подобный измерительный модуль должен обладать минимальной массой, габаритными размерами и энергопотреблением при сохранении заданной точности измерений. удовлетворяет Этим условиям микросистема, в которой функции чувствительных элементов выполняют четыре пирометрических датчика, размещенные на площадке в плоскости планера под углом 90°. Они формируют двумерный датчик горизонта (рис. 13), по показаниям которого могут быть вычислены углы крена и тангажа связанного с ним БПЛА.

Если БПЛА летит горизонтально, каждый датчик "видит" 50 % небосвода и 50 % Земли. Показания диаметрально противоположных датчиков равны, т. е.

Dat1 - Dat3 = 0, Dat2 - Dat4 = 0.

Если БПЛА накренится на 30°, датчик Dat1 будет "видеть" 80 % Земли и 20 % неба, а датчик Dat3, наоборот, 80 % неба и 20 % Земли, и условие равенства не выполнится. Возникнет рассогласование.

Для вычисления углов крена и тангажа необходимо знать рассогласование, возникающее, когда датчики видят 100 % неба и 100 % Земли. Для этого необходимо на Земле, перед вылетом, разместить БПЛА вертикально по крену и тангажу и зафиксировать показания датчиков в этих положениях. Тогда углы крена и тангажа могут быть вычислены по формулам

 $\gamma = \frac{(\text{Dat}1 - \text{Dat}3)90}{(\text{Dat}1_0 - \text{Dat}3_0)}, \ \theta = \frac{(\text{Dat}2 - \text{Dat}4)90}{(\text{Dat}2_0 - \text{Dat}4_0)},$



Рис. 13. Двумерный пирометрический датчик (микросистема) горизонта:

а — конструктивная схема; *б* — схема размещения на планере

где Dat*x* — текущие показания датчиков, Dat x_0 — показания датчиков при калибровке на Земле, 90 — половина диапазона углов крена/тангажа (180°).

Нетрудно подсчитать, что при условии равенства Datx соответствующим Dat x_0 формула "вернет" $\pm 90^\circ$, а при условии равенства показаний диаметрально противоположных датчиков "вернет" ноль. Это свойство очень важно, так как с увеличением высоты процентное соотношение видимой части Земли и неба смещается в сторону неба, снижается влияние фоновых засветок от зданий и деревьев, в итоге температура уровня горизонта также будет меняться. Приведенная формула нечувствительна к этому и позволяет вычислять углы крена БПЛА на любой высоте. Причем в знаменателе ноль исключен, так как даже в плотном тумане температуры зенита и Земли немного отличаются.

Внешний вид пирометрического датчика, разработанного на кафедре "Приборы управления" ТулГУ и оборудованного системой ориентации пирометрического типа микроБПЛА, показаны на рис. 14 (см. четвертую сторону обложки).

Важной особенностью пирогоризонта является то, что точность определения углов крена и тангажа напрямую зависит от разницы температур Земля/зенит. Пусть разрешение измерительной системы пирометров по температур составляет 0,1 °C. Тогда при разнице температур Земля/зенит в 40 °C точность определения углов крена/тангажа составит 180/(40/0,1) = 0,45 (или $\pm 0,225$)°. При разнице температур Земля/зенит в 2 °C, которая может быть зимой в облачность, над снеговым настом, точность вычисления углов составит уже $\pm 4,5$ °. Таким образом, математический аппарат, обрабатывающий сигналы пирометров, должен быть адаптивным, обеспечивая наилучшие условия фильтрации и поправки показаний датчиков в текущих и изменяющихся погод-

Таблица 3

Значения разностных температур Земля/зенит для различных погодных условий

Условие	<i>t</i> воздуха, °С	Разница Земля/зенит, °С
Ясная зимняя ночь, нулевая	-15	32
Солнечный зимний день, нулевая облачность	-10	20
Пасмурный зимний день, низкая снеговая облачность	-2	1,5
Пасмурный зимний день, туман, низкая облачность	0	1
Солнечный летний день, нулевая облачность	+25	40
Начало ноября, солнечный день, легкая облачность	+5	19

ных условиях. Погодные условия с достаточной точностью могут быть определены по разности показаний вертикальной пары пирометров при стартовой или непрерывной калибровке. Типичные значения разности температур Земля/зенит для различных погодных условий приведены в табл. 3.

На рис. 15 приведен график ошибки определения углов крена/тангажа пирогоризонтом в диапазоне углов 0—30°.

В обычном для БПЛА диапазоне углов крена/тангажа 0—30° ошибка определения углового положения БПЛА, таким образом, не превышает 1°. Система ориентации пирометрического типа может применяться как в качестве самостоятельной системы ориентации БПЛА, так и в составе интегрированной инерциальной или магнитометрической навигационных систем.

Микросистема магнитометрического типа для угловой ориентации подвижного объекта

В настоящее время существует тип магнитных датчиков [6], который можно отнести к классу при-





боров микросистемного исполнения. Использование подобных датчиков позволяет создавать магнитометрические системы (рис. 16) с малыми массогабаритными характеристиками и почти мгновенным временем готовности.

Схема ориентации приборной системы координат трехосевого магнитометрического модуля относительно горизонтальной системы координат и вектора напряженности магнитного поля Земли (ВНМПЗ) показана на рис. 17.

Микросистема предназначена для определения углов тангажа и крена подвижного объекта путем обработки информации, поступающей с магнитных датчиков, приемника спутниковой навигационной системы (СНС) (модуль GPS), вырабатывающего информацию о путевом угле, магнитном склонении и о географических координатах объекта, а также известной карте магнитных наклонений [2, 7]. Достоинствами данной системы являются:

- отсутствие накапливаемой со временем ошибки;
- неограниченное время работы;
- минимальные массогабаритные характеристики;
- практически мгновенное время готовности.

Рассматриваемая микросистема магнитометрического типа позволяет решать следующие задачи:

- определение углов ориентации подвижного объекта;
- реализация раскладки команд управления вращающегося по крену подвижного объекта;
- получение данных о параметрах ориентации на траектории полета управляемого летательного аппарата при телеметрических пусках;
- комплексирование информации магнитометрической и инерциальной систем ориентации для управления движением летательного аппарата.



Рис. 16. Магнитометрическая система



Рис. 17. Системы координат:

OXYZ — приборная система координат, связанная с объектом; $O\xi'\eta'\zeta'$ — горизонтальная система координат; $O\xi\eta\zeta$ — система координат, определяемая направлением на магнитный север; I — угол магнитного наклонения; L, B — горизонтальная и вертикальная проекции ВНМПЗ в системе координат $O\xi\eta\zeta$; ψ угол магнитного курса; θ , γ — углы тангажа и крена

Использование трехосевого магнитометрического модуля позволяет избавиться от ошибки, обусловленной неточностью измерения напряженности магнитного поля путем нормирования показаний датчиков:

$$\bar{X} = \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}};$$
$$\bar{Y} = \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}};$$
$$\bar{Z} = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}},$$

где \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} — нормированные показания магнитного датчика по каналам X, Y, Z.

В этом случае горизонтальная и вертикальная проекции ВНМПЗ определяются через значение угла магнитного наклонения (*I*):

$$B = \sin I; L = \cos I$$

Углы тангажа (θ) и крена (γ) подвижного объекта определяются на основании следующих зависимостей [2]:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\bar{X}}{\sqrt{L^2 \cos^2 \psi + B^2}}\right) + + \arcsin\left(\frac{L \cos \psi}{\sqrt{L^2 \cos^2 \psi + B^2}}\right) - \pi;$$

$$\gamma = \begin{cases} \arctan\left(\frac{L\sin\psi}{\sqrt{\overline{Y}^2 + \overline{Z}^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{\overline{Z}}{\sqrt{\overline{Y}^2 + \overline{Z}^2}}\right) \\ & \text{при } \overline{Y} > 0; \\ \arctan\left(\frac{\overline{Z}}{\sqrt{\overline{Y}^2 + \overline{Z}^2}}\right) + \arcsin\left(\frac{L\sin\psi}{\sqrt{\overline{Y}^2 + \overline{Z}^2}}\right) - \pi \\ & \text{при } \overline{Y} < 0. \end{cases}$$

Вырабатываемый модулем GPS путевой угол для малоразмерного БПЛА ввиду малых углов скольжения можно принять в качестве угла курса относительно географического севера. Пересчет из географического курса в магнитный осуществляется на основании информации об угле магнитного склонения (*D*).

Моделирование работы микросистемы на борту БПЛА на широте Тульской области с учетом типичных ошибок магнитных датчиков компании *"Honeywell"* HMC 1001, CHC, а также невязки высоты объекта и ошибок экстраполяции показало точность определения углов тангажа и крена порядка 0,8°.

Одним из способов повышения точности определяемых параметров в условиях прямолинейного полета БПЛА является ее комплексирование с другими источниками информации, например с пирогоризонтом.

Структурная схема интегрированной микросистемы представлена на рис. 18.

На основании определенных по пирогоризонту углов тангажа и крена угол курса объекта вычисляется по следующим зависимостям:

$$\psi(\gamma) = \arcsin\left(\frac{\overline{Y}\sin\gamma + \overline{Z}\cos\gamma}{\overline{L}}\right);$$
$$\psi(\theta) = \arccos\left(\frac{\overline{X} - \overline{B}\sin\theta}{\overline{L}\cos\theta}\right).$$

Наличие нескольких измерений магнитного курса (углы курса, вычисленные по показаниям пирогори-

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 1, 2010 –



Рис. 18. Структурная схема системы ориентации подвижного объекта магнитометрического типа:

 $\theta_{\Pi}, \gamma_{\Pi}$ — углы тангажа и крена, определяемые по пирометрическим датчикам; λ, ϕ — географическая долгота и широта; $\psi(\theta_{\Pi}), \psi(\gamma_{\Pi})$ — углы курса, рассчитанные по показаниям магнитных датчиков (МД) и углам тангажа и крена, определяемых по пирогоризонту;

 $\widehat{X}, \ \widehat{Y}, \ \widehat{Z}$ — оцененные фильтром Калмана нормированные показания МД по соответствующему каналу



Рис. 19. Графики ошибок определения углов: *a* — тангажа и *б* — крена (*1* — ошибка без ФК, *2* — ошибка с ФК)

зонта и магнитных датчиков, и угол курса, определяемый по показаниям модуля GPS) позволяет реализовать фильтр Калмана (ФК) для оценки систематических ошибок магнитных датчиков [4]. Такой способ комплексирования повышает точность определения углов тангажа и крена и устраняет также ошибки, связанные с наличием магнитных помех и угла скольжения объекта, возникающего при воздействии бокового ветра.

Графики ошибок определения углов тангажа и крена интегрированной микросистемой при наличии угла скольжения объекта в 10° и воздействия внешнего перемагничивающего магнитного поля с интенсивностью 0,2 Гс приведены на рис. 19.

Применение интегрированной микросистемы на базе трехосевого магнитометрического модуля, СНС и пирогоризонта позволяет определять углы тангажа и крена подвижного объекта с точностью не хуже $0,5^{\circ}$ и может применяться как в качестве самостоятельной системы ориентации подвижных объектов, так и в составе интегрированной инерциальной навигационной системы.

Заключение

В статье рассмотрен ряд информационно-измерительных микросистем для измерения параметров наземных и воздушных подвижных объектов, способных функционировать с заданной точностью в жестких эксплутационных условиях. Намечены пути совершенствования этих микросистем.

Список литературы

1. Боднер В. А. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1973. 506 с.

2. Малютин Д. М., Погорелов М. Г., Шведов А. П. Система для определения параметров ориентации подвижного объекта по показаниям магнитных датчиков // Датчики и системы. 2009. № 5.

3. Распопов В. Я., Иванов Ю. В. Алалуев Р. В., Попов К. А. Датчики систем управления путевых железнодорожных машин // Справочник. Инженерный журнал. Приложение к № 10. 2007. С. 17—21.

4. Степанов О. А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 496 с.

5. www.analog.com.

6. www.magnitosensors.com.

7. www.ngdc.noaa.gov.

УДК 531.383-11:531.714.7

А. М. Боронахин, канд. техн. наук, доц., зам. зав. каф., e-mail: boronachin@mail.ru, П. А. Иванов, асп., e-mail: ivanov_etu@mail.ru, И. Л. Суров, магистр, e-mail: surovfam@mail.ru, СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРИАДЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГАБАРИТНОГО ДВУХОСНОГО СТЕНДА

Проводится анализ погрешностей триады микромеханических гироскопов консольного типа производства компании Analog Devices в целях уточнения принятых математических моделей показаний датчиков данного типа. Исследование проводилось на малогабаритном двухосном стенде, разработанном кафедрой Лазерных измерительных и навигационных систем СПбГЭТУ "ЛЭ-ТИ" по заказу Центра микроэлектроники и диагностики (ЦМИД).

Ключевые слова: инерциальная навигация, математическая модель погрешностей, микромеханический гироскоп, малогабаритный двухосный испытательный стенд По прогнозам рынок всех инерциальных микромеханических чувствительных элементов (ММЧЭ) к 2009 г. вырастет до 1350 млн долл., из которых сегмент рынка ММГ вырастет до 718 млн долл. за счет роста потребностей автомобильной промышленности (производства средств безопасности).

В прогнозе же состояния гироскопии на 2020 г. (рис. 2) предполагается, что ММГ будет обеспечивать точность порядка 0,01°/ч.

Требования к точностям инерциальных датчиков и систем на их основе при решении задач ориентации и навигации с каждым днем ужесточаются. Это приводит к необходимости совершенствования методов и средств испытаний таких систем в целях получения достоверных математических моделей их погрешностей.

На сегодняшний день испытания и калибровка трехосных инерциальных МЭМС (определение сдвига нуля, масштабного коэффициента и т. д.) могут быть выполнены с использованием позиционирования в поле силы тяжести Земли и реализацией последовательных вращений с заданными угловыми скоростями вокруг всех осей трехосного блока инерциальных датчиков. Для этих целей используют однои двухосные испытательные стенды.

В статье исследуются погрешности триады ММГ, входящей в состав модуля фирмы *Analog Devices*, а также на основе полученных результатов анализируется достоверность математических моделей погрешностей соответствующих датчиков.

Введение

Перспективы современного приборостроения связаны с созданием приборов, имеющих малую массу, габаритные размеры, энергопотребление и себестоимость при безусловном выполнении целевой функции с заданной точностью.

Направление МЭМС (микроэлектромеханических систем) является одним из наиболее интенсивно развивающихся в плане разработки инерциальных чувствительных элементов, таких как микромеханические гироскопы (ММГ) и акселерометры (ММА).

По точностным характеристикам ММГ и ММА *пока* проигрывают своим макроаналогам и относятся к категории грубых, однако уже сегодня получили широкое распространение (рис. 1) в следующих областях:

- о авиационная промышленность;
- о автомобильная промышленность;
- о морская навигация;
- о железнодорожный транспорт;
- о робототехника;
- о диагностика скважин.

Прочие Прочие Оборонная Оборонная промышленность пром. 9% 3% 5% 4% Потребительский рынок 11% Потребит. рынок 24% Автомобилестроение Автомобилестроение 81% 63% 2004г.: 0,84 млрд. долларов 2009г.: 1,35 млрд. долларов





Рис. 2. Прогноз состояния гироскопии на 2020 г.



Рис. 3. Модуль на базе ММЧЭ производства компании Analog Devices

1. Объект исследования

Объектом экспериментальных исследований был выбран модуль на базе чувствительных элементов производства компании *Analog Devices* (рис. 3), содержащий в себе три двухосных MMA (ADXL203) и три MMГ (ADXRS401).

2. Описание двухосного испытательного стенда

В рамках исследования ММЧЭ и модулей на их основе были выработаны требования к точностным и эксплуатационным характеристикам средства испытаний. Например, для оценки параметров ММА погрешность позиционирования не должна превышать 15", а для оценки ММГ нестабильность скорости вращения стенда в среднем за оборот не должна превышать 0,01 %.

Таким образом, усилиями научного коллектива Кафедры лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) СПбГЭТУ "ЛЭТИ" был создан опытный образец двухосного испытательного стенда.



Рис. 5. Двухосный испытательный стенд

Функциональная схема стенда (рис. 4) может быть представлена следующими основными блоками:

1) механический агрегат — двухстепенной карданов подвес, на каждой из осей которого установлены датчики угла (ДУ) ЛИР3170 производства ОАО "СКБ ИС", Россия и датчики момента (ДМ) — двигатели фирмы *Siemens*, Швеция;

2) система управления, назначением которой является задание углового положения инерциального измерительного модуля (ИИМ) относительно географической системы координат (ГСК), а также стабилизация угловых скоростей вращения вокруг осей механического агрегата;

3) электронный блок предназначен для сбора и предварительной обработки показаний ДУ, гироскопов и акселерометров ИИМ, а также результата его работы в решении задач ориентации и навигации;

4) *компьютер*, назначением которого является хранение и обработка измерительной информации, а также формирование команд в систему управления.

Внешний вид стенда представлен на рис. 5.

Ниже представлены, основные технические характеристики стенда:

Диапазон углов разворота по обеим осям, ° Не ограничен
Погрешность позиционирова- ния по обеим осям 15"
Диапазон скоростей вращения по обеим осям До 1500°/с
Отклонение от взаимной ортого- нальности осей вращения Не более 30"
Нестабильность скорости вращения при осреднении за один оборот



Легко заметить, что технические параметры разработанной установки не уступают соответствующим параметрам своих зарубежных аналогов.

Обоснование использования двухосного испытательного стенда как средства калибровки ММГ и ММА показало, что стенд полностью удовлетворяет требованиям в рамках испытания и калибровки модулей на базе таких датчиков и при этом имеет лучшие по сравнению со своими зарубежными аналогами массогабаритные и экономические параметры.

3. Математические модели погрешностей гироскопов

Испытания и калибровка ММГ и ММА и модулей на их основе реализуются с помощью традиционных методов и средств по стандартам IEEE. При этом используются следующие математические модели показаний ММГ:

$$\begin{bmatrix} \omega_x^{\mathrm{np}} \\ \omega_y^{\mathrm{np}} \\ \omega_z^{\mathrm{np}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \times$$

$$\times \left\{ \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_y & \beta_z \\ a_x & 1 & -\gamma_z \\ -\beta_x & \gamma_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{x0} \\ \omega_{y0} \\ \omega_{z0} \end{bmatrix}, (1)$$

где $\omega_i^{\text{пр}}$ — показания гироскопов (i = x, y, z); ω_i — истинное значение угловой скорости (i = x, y, z); ω_{i0} — нулевой сигнал гироскопов (i = x, y, z); K_i — масштабный коэффициент гироскопов (i = x, y, z); K_{ii} — коэффициенты нелинейности (i = x, y, z); α_x , α_y , β_x , β_z , γ_y , γ_z — углы неортогональностей измерительных осей гироскопов.

4. Изучение влияния линейного ускорения на показания ММГ

Принцип действия одномассового ММГ консольного типа. Рассмотрим схему одномассового гироскопа консольного типа, представленную на рис. 6.

В общем случае привод развивает силу $F_0 \sin pt (F_0, p - \text{соответственно амплитуда и частота ее генера$ ции), которая направлена под некоторым малым уг $лом <math>\varepsilon$ (sin $\varepsilon \approx \varepsilon$, cos $\varepsilon \approx 1$, t — время) к оси X и сообщает инерционной массе (ИМ) колебания $x = x_0 \sin pt (x_0 - \text{амплитуда колебаний})$. Мгновенный вектор линейной скорости ИМ в режиме движения (РД) имеет проекции на оси X и Y:

$$v_r = v \cos \varepsilon \approx v; v_v = -v \sin \varepsilon \approx -v \varepsilon.$$



Рис. 6. Принципиальная схема одномассового ММГ

При появлении переносной угловой скорости Ω_{z} , мгновенный вектор которой направлен в положительном направлении оси *Z*, возникает ускорение Кориолиса вдоль осей *X* и *Y*:

$$a_{Kx} = 2\Omega_z v\varepsilon, \ a_{Ky} = 2\Omega_z v,$$

вследствие чего ИМ оказывается под действием сил инерции Кориолиса: ma_{Kx} вдоль оси X, и ma_{Ky} вдоль оси Y.

С учетом сил инерции, демпфирования и упругих сил, действующих на ИМ, уравнения ее движения в простейшем случае имеют вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b_x\dot{x} + G_xx = F_0\sin pt - 2m\upsilon\Omega_z\varepsilon;\\ m\ddot{y} + b_y\dot{y} + G_yy = -(F_0\sin pt)\varepsilon - 2m\upsilon\Omega_z, \end{cases}$$
(2)

где b_x , b_y — коэффициенты демпфирования ИМ в направлении соответствующих осей; G_x , G_y — жесткости упругого подвеса в направлении соответствующих осей.

Для схемы, приведенной на рис. 6, с учетом влияния линейных ускорений, возникающих при движении объекта, систему уравнений (2) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b_x\dot{x} + G_xx = F_0\sin pt - 2mv\Omega_z\varepsilon - ma_x; \\ m\ddot{y} + b_y\dot{y} + G_yy = -(F_0\sin pt)\varepsilon - 2mv\Omega_z - ma_y, \end{cases}$$

где a_x и a_y — проекции ускорений на соответствующие оси ММГ.

ММГ, по своей сути, является измерителем линейного ускорения.

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 1, 2010 –

Было принято решение, используя стенд в режиме позиционирования, формировать дополнительные линейные ускорения как проекции ускорения свободно падающего тела:

$$\begin{cases} a_x = g_x \\ a_y = g_y \end{cases}$$

где g_x, g_y — проекции ускорения *g* свободно падающего тела на оси ММГ.

Согласно паспортным данным для MMГ ADXRS401 влияние линейного ускорения на его показания составляет $0.2^{\circ} \cdot c^{-1} \cdot g$.

Влияние линейного ускорения на оси первичных и вторичных колебаний. Линейное ускорение теоретически может оказывать влияние как на ось первичных, так и на ось вторичных колебаний. Для выявления этого влияния на показания ММГ было решено провести эксперимент, в ходе которого для каждого гироскопа выполнялись вращения отдельно вокруг оси его первичных и вторичных колебаний, лежащих в плоскости, перпендикулярной измерительной оси. Это позволило выявить зависимость показаний ММГ от проекции линейного ускорения на эти оси.

Вдоль оси первичных колебаний ИМ совершает колебания с большой частотой. Тогда мгновенный вектор ускорения ИМ будет пропорционален произведению амплитуды колебаний на квадрат круговой частоты колебаний. Согласно рис. 6 имеем

$$x = x_0 \sin pt$$
; $\ddot{x} = -x_0 p^2 \sin pt$.

Возникающее при появлении переносной угловой скорости ускорение Кориолиса, действующее вдоль оси вторичных колебаний, равно

$$a_{K_{u}} = 2\Omega_z \dot{x} = 2\Omega_z x_0 p \cos pt.$$

Найдем отношение мгновенного вектора ускорения *х* к ускорению Кориолиса:

$$\frac{\ddot{x}}{a_{K_v}} = \frac{-x_0 p^2 \sin pt}{2\Omega_z x_0 p \cos pt} = -\frac{p}{2\Omega_z} \operatorname{tg} pt.$$

Таким образом, за счет того, что ИМ совершает колебания с большой частотой, линейное ускорение вдоль оси первичных колебаний на показания ММГ должно действовать слабо, вдоль *оси вторичных колебаний*, наоборот сильно, так как она является *осью чувствительности* гироскопа, характеристики которого в этом случае будут определяться динамическими свойствами упругого подвеса вдоль оси вторичных колебаний. Результаты эксперимента приведены на рис. 7.

Можно видеть, что в первом случае ускорение свободно падающего тела не оказывает практически никакого влияния на показания и $\omega_y^{np} = \text{const}$, а во втором случае прослеживается гармоническая зависимость, т. е. $\omega_y^{np} \sim \cos \alpha$.

Аналогичное исследование было проведено для всех ММГ, входящих в состав модуля. Из анализа показаний гироскопов при их вращении в поле силы тяжести вокруг осей первичных и вторичных колебаний можно сделать заключение о расположении осей первичных и вторичных колебаний для всех ММГ, входящих в состав модуля.

Расположение осей показано на рис. 8: толстой темной стрелкой обозначены измерительные оси, тонкой темной — оси первичных колебаний, толстой светлой — оси вторичных колебаний.

Таким образом, для *х*-гироскопа — ось вторичных колебаний направлена вдоль оси *z*, для *y*-гироскопа — вдоль оси *z*, для *z*-гироскопа — вдоль оси *x* (*xyz* — связанная с модулем СК).

Исследование влияния линейного ускорения на показания ММГ. Показания ММГ линейно зависят от про-



Рис. 7. Показания гироскопа при вращении:

а — вокруг оси вторичных колебаний; *б* — вокруг оси первичных колебаний

— НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 1, 2010 -



Рис. 8. Расположение чувствительных осей и осей первичных и вторичных колебаний ММГ относительно приборной системы координат

екции ускорения свободно падающего тела на ось его вторичных колебаний. *Необходимо оценить вклад g в показания ММГ*. Для этого было проведено позиционирование ММГ вокруг осей их первичных колебаний.

По результатам этих опытов были построены зависимости показаний ММГ от проекции ускорения свободно падающего тела на ось их вторичных колебаний (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что зависимость показаний гироскопа от проекции линейного ускорения на ось его вторичных колебаний является линейной, т. е. имеет место уравнение

$$\omega(g) = KW'_{i,i},$$

где K — коэффициент линейного ускорения; $W'_{i,j}$ — проекция линейного ускорения на ось *вторичных* колебаний ММГ (*i* — измерительная ось ММГ, *j* — ось вторичных колебаний *i*-го ММГ).

При этом влияние *g* на показания для разных гироскопов оказалось разным. Для рассматриваемого случая этот вклад составляет $0,16...0,25 \cdot c^{-1} \cdot g$. В зависимости от режимов движения объекта, на ко-

тором будет эксплуатироваться модуль, содержащий в себе триаду ММГ, целесообразно отражать влияние линейного ускорения на показания ММГ в математической модели его погрешностей (1).

Коэффициент K можно определить как тангенс угла наклона прямой (рис. 9). Зная расположение осей вторичных колебаний (см. рис. 8) и угловой коэффициент для всех гироскопов целесообразно ввести дополнительное слагаемое в математическую модель (1):

$$\begin{bmatrix} \omega_{x}^{np}(g) \\ \omega_{y}^{np}(g) \\ \omega_{z}^{np}(g) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} KW'_{x,z} \\ LW'_{y,z} \\ MW'_{z,x} \end{bmatrix}$$

где *K*, *L*, *M* — угловые коэффициенты для *x*-, *y*- и *z*гироскопов соответственно [ед. съема · м⁻¹ · c²]; $W'_{x,z}$, $W'_{y,z}$, $W'_{z,x}$ — проекции ускорения свободно падающего тела на оси вторичных колебаний соответствующих гироскопов [м · c⁻²].

Тогда, с учетом влияния линейного ускорения, математическая модель (1) примет вид:

$$\begin{bmatrix} \omega_x^{\mathrm{np}} \\ \omega_y^{\mathrm{np}} \\ \omega_z^{\mathrm{np}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \times$$

$$\times \left\{ \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_y & \beta_z \\ \alpha_x & 1 & -\gamma_z \\ -\beta_x & \gamma_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \right\} +$$

$$+ \begin{bmatrix} KW'_{x,z} \\ LW'_{y,z} \\ MW'_{z,x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{x0} \\ \omega_{y0} \\ \omega_{z0} \end{bmatrix}.$$



Рис. 9. Показания триады ММГ в зависимости от действующего линейного ускорения на вторичные оси датчиков (кривые — экспериментально полученные данные, прямые — аппроксимирующие линии)

Если модуль установлен на подвижном объекте, значение абсолютного ускорения может быть получено по показаниям акселерометров, входящих в состав модуля. Учитывая, что погрешность определения ускорения составляет 0,001g (исходя из технических характеристик стенда), погрешность определения вклада линейного ускорения в показания ММГ составит 0,0002 °/с. Таким образом, показания ММГ могут быть скорректированы данными с ММА.

Исследование зависимости углов неортогональностей от вариаций угловой скорости. Математическая модель погрешностей триады гироскопов (1) включает в себя матрицу, содержащую углы неортогональности:

$$\begin{bmatrix} 1 & -\alpha_y & \beta_z \\ \alpha_x & 1 & -\gamma_z \\ -\beta_x & \gamma_y & 1 \end{bmatrix}.$$

Измерительные оси каждого ММГ ($x_{\Gamma}y_{\Gamma}z_{\Gamma}$), входящего в состав блока, развернуты относительно осей модуля (*xyz*) на два малых угла, как показано на рис. 10.

Матрица неортогональности, по сути, является матрицей перехода от системы координат, образованной измерительными осями чувствительных элементов $x_r y_r z_r$, к приборной системе координат *хуг*.

Было сделано предположение, что в силу конструктивных особенностей построения ММГ (см. рис. 6) положение чувствительной оси датчика может изменяться, следовательно, следует провести дополнительные исследования с целью выявления возможной зависимости углов неортогональности от текущего значения (и знака) угловой скорости. Для этого



Рис. 10. Углы неортогональностей



Рис. 11. Зависимость вклада за счет неортогональности в показания ММГ от действующей угловой скорости

были выполнены серии вращений (от -75 до $75^{\circ} \cdot c^{-1}$ с шагом в $5^{\circ} \cdot c^{-1}$) вокруг каждой оси чувствительности трех ММГ.

Ниже приведен график зависимости вклада за счет неортогональности (в ед. съема) от действующей угловой скорости для одного из ММГ (рис. 11).

Все шесть графиков, отображающих вклады в показания соответствующих ММГ за счет углов неортогональности, имеют однозначный характер и здесь не приводятся.

Как видно, вклад представляет собой линию (кривая на рис. 11), которую можно аппроксимировать функцией вида (прямая на рис. 11):

$$\gamma_z \omega_z = P + Q \omega_z,$$

где P — значение функции в точке 0° · c⁻¹ [ед. съема]; Q — угловой коэффициент функции [ед. съема].

$$\sim c^{-1}$$

Зависимость угла γ_z от угловой скорости ω_z приведена на рис. 12.

По графику видно (утолщенная стрелка), что угол, характеризующий неортогональность, изменяется в зависимости от знака задаваемой стендом угловой скорости:

$$\gamma_z = P_{\gamma_z} \operatorname{sign}(\omega_z) + Q_{\gamma_z}.$$

Таким образом, линеаризовав экспериментально полученные зависимости вкладов неортогональностей в показания ММГ в зависимости от угловой скорости, можно оценить коэффициенты *P* и *Q* для каждого случая. Причем этот вклад можно



Рис. 12. Зависимость угла γ_z от угловой скорости ω_z

получить независимо от масштабного коэффициента гироскопа.

Тогда математическая модель (1) примет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \omega_{x}^{\text{np}} \\ \omega_{y}^{\text{np}} \\ \omega_{z}^{\text{np}} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} K_{x} & 0 & 0 \\ 0 & K_{y} & 0 \\ 0 & 0 & K_{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_{y} & \beta_{z} \\ \alpha_{x} & 0 & -\gamma_{z} \\ -\beta_{x} & \gamma_{y} & 0 \end{bmatrix} \right\} \times$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{x} \\ \omega_{y} \\ \omega_{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{x} \\ \omega_{y} \\ \omega_{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} KW'_{x,z} \\ LW'_{y,z} \\ MW'_{z,x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{x0} \\ \omega_{y0} \\ \omega_{z0} \end{bmatrix},$$

где $\alpha_x = P_{\alpha_x} \operatorname{sign}(\omega_x) + Q_{\alpha_x}; \alpha_y = P_{\alpha_y} \operatorname{sign}(\omega_y) + Q_{\alpha_y};$ $\beta_x = P_{\beta_x} \operatorname{sign}(\omega_x) + Q_{\beta_x}; \beta_z = P_{\beta_z} \operatorname{sign}(\omega_z) + Q_{\beta_z}; \gamma_y =$ $= P_{\gamma_y} \operatorname{sign}(\omega_y) + Q_{\gamma_y}; \gamma_z = P_{\gamma_z} \operatorname{sign}(\omega_z) + Q_{\gamma_z}.$

Заключение

X

В статье рассмотрены технические характеристики разработанного научным коллективом кафедры ЛИНС стенда. Обоснование использования двухосного испытательного стенда как средства калибровки ММЧЭ показало, что стенд полностью удовлетворяет требованиям в рамках испытания и калибровки модулей на базе ММЧЭ и при этом имеет лучшие по сравнению со своими зарубежными аналогами массогабаритные и экономические параметры.

В качестве объекта испытаний был выбран трехосный модуль на базе ММЧЭ фирмы *Analog Devices*. Исследовано влияние линейного ускорения на показания ММГ. Был разработан алгоритм исследований, позволяющий:

- определить взаиморасположение осей первичных и вторичных колебаний внутри ММГ, а также доказать, что линейное ускорение влияет на показания датчика (косвенно) лишь через ось вторичных колебаний;
- оценить вклад и характер влияния ускорения свободно падающего тела (линейного ускорения) на показания ММГ.

Результаты эксперимента позволили уточнить математическую модель погрешностей для ММГ, а именно, отразить влияние линейного ускорения на показания датчика. Кроме того, исследования, связанные с взаиморасположением осей первичных и вторичных колебаний внутри ММГ, позволяют выработать технические рекомендации по установке модуля на объекте, на котором планируется его последующая эксплуатация.

Проведено исследование зависимости углов неортогональности от вариаций угловой скорости. Оно показало, что углы неортогональности не есть постоянные величины (как предполагается в традиционной математической модели погрешностей). В результате математическая модель погрешности гироскопа была уточнена: углы неортогональности вводятся как функционалы угловой скорости. Была найдена зависимость вклада неортогональности в показания ММГ от угловой скорости и коэффициенты для уточненной части математической модели.

При этом вклад в показания ММГ за счет неортогональности измерительных осей и за счет действия линейных ускорений можно оценивать и учитывать, не привязываясь к масштабному коэффициенту гироскопа. Это повышает точность определения коэффициентов модели и снижает погрешность измерения угловой скорости в целом.

Список литературы

1. Боронахин А. М., Лукьянов Д. П., Филатов Ю. В. Оптические и микромеханические инерциальные приборы. СПб.: Техномедиа/Элмор. 2007. 400 с.

2. Голован А. А., Парусников Н. А. Математические основы навигационных систем. Ч. І. Математические модели инерциальной навигации. М.: Изд-во МГУ, 2007. 110 с.

3. Голован А. А., Парусников Н. А. Математические основы навигационных систем. Ч. II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. М.: Изд-во МГУ, 2008. 1128 с.

 Власенко А. Интегральные гироскопы *iMEMS* — датчики угловой скорости фирмы *Analog Devices*: URL: http://www. analog. com.ru/Public/gyro.pdf.
 Анучин О. Н., Емельянцев Γ. И. Интегрированные

 Анучин О. Н., Емельянцев Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общей ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2003. 390 с.
 Степанов О. А. Основы теории оценивания с прило-

Степанов О. А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации.
 Ч. 1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 496 с.

7. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.

Б. И. Пивоненков, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., ФГУП "НПО Измерительной техники", e-mail: piboiv@yandex.ru, **В. М. Школьников**, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана e-mail: shakhnov@iu4.bmstu.ru

ОДНО- И ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ С ВОЗДУШНЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ

Описаны конструктивно-технологические решения трех видов пьезорезистивных акселерометров с воздушным демпфированием: однокомпонентного и трехкомпонентного акселерометров с навесным грузом и интегрального однокомпонентного акселерометра (МЭМСакселерометра). Представлены результаты испытаний. Подтверждены высокие динамические и прочностные характеристики акселерометров. Показана целесообразность реализации трехкомпонентного акселерометра в виде интегральной МЭМС-структуры.

Ключевые слова: пьезорезистивный акселерометр, чувствительный элемент, МЭМС (микроэлектромеханические системы), трехкомпонентный акселерометр, воздушное демпфирование, вибропрочность, ударопрочность

Введение

Пьезорезистивные акселерометры (ПА) — микроэлектронные акселерометры с интегральным упругим чувствительным элементом (ЧЭ) и сформированной в нем тензорезистивной схемой. В "гибридном исполнении" ПА используют навесной груз, в интегральном — выполняются в виде МЭМСструктур. ПА свободны от недостатков емкостных акселерометров [1, 2], обладая высокой разрешающей способностью и линейностью во всем измеряемом диапазоне ускорений.

Особенностью ПА являются значительные (порядка $2 \cdot 10^{-4}$) рабочие деформации ЧЭ, необходимые для получения требуемого сигнала. Поскольку при измерениях относительно малых низкочастотных ускорений действующие на ПА ударные и высокочастотные ускорения могут многократно их превышать, успешная реализация ПА требует обеспечения высокой собственной частоты (при заданной чувствительности), высокой виброи ударопрочности ПА, эффективного демпфирования упругой системы.

ПА скромно представлены в аппаратуре общего и специального назначения. Достаточно многочисленные публикации [3—7] рассматривают отдельные вопросы (в основном расчета и моделирования ЧЭ ПА) проектирования ПА. В связи с этим представленные ниже результаты интересны с точки зрения как комплексности решения указанных задач, так и возможного завершения описываемых разработок (в "гибридном" или полностью интегральном исполнении в виде МЭМС-структур).

Были разработаны, изготовлены и испытаны экспериментальные образцы ПА трех типов:

- ПФ-1 однокомпонентный с навесным грузом;
- ПФ-2 трехкомпонентный, четырехканальный (три компоненты ускорения и канал измерения температуры) с одним (трехкомпонентным, четырехканальным) ЧЭ и с навесным грузом;
- ПФ-3 однокомпонентный в виде МЭМСструктуры с интегральным грузом.

Технология изготовления чувствительных элементов и датчиков

Для формирования измерительной схемы ЧЭ использовались пластины Si (100) и стандартные операции КМОП-технологии. Тензорезисторы и терморезисторы с удельным сопротивлением $\rho \approx 5 \cdot 10^2$ Ом · см, поверхностным сопротивлением 200 Ом/ \Box , температурным коэффициентом сопротивления ТКС около 0,6 %/°С, температурным коэффициентом тензочувствительности ТКЧ около –0,25 %/°С и дополнительные терморезисторы с ТКС около 0,15 %/°С, $\rho \approx 5 \cdot 10^{-3}$ Ом · см и $R_s \approx 20$ Ом/ \Box формировались диффузией бора, коммутационные дорожки — напылением Al.

Для формирования профиля использовалось глубинное анизотропное травление кремния с последующим изотропным дотравливанием на 10— 30 мкм для ликвидации концентраторов напряжения. Точность двустороннего совмещения элементов схемы и профилированных участков ЧЭ составляла около 5 мкм. Технология обеспечивала минимальную толщину *h* профилированных областей до ≈ 20 мкм, что обусловило использование навесных грузов в двух из трех решений ПА (в них для интегральной реализации при $h \approx 20$ мкм требовались неприемлемо большие размеры ЧЭ).

При сборке ПА (в том числе при креплении ЧЭ к корпусу и грузу) использовались эпоксидные клеи холодного отверждения.

Описание пьезорезистивных акселерометров

В рассматриваемых ПА использовали демпфер Капицы — расположенные с воздушным микрозазором плоскопараллельные пластины, одна из которых (подвижная) — часть груза. При воздействии вибрационных и ударных перегрузок неподвижная пластина демпфера служит ограничителем перемещения груза.

Выходной сигнал рассматриваемых ПА составляет 100 мВ при питании постоянным напряжением 10 В. Термокомпенсация чувствительности осуществлялась подключением в цепь питания последовательно с тензосхемой двух внешних резисторов с суммарным сопротивлением, близким к входному сопротивлению моста.

ПА ПФ-1 (масса 10 г, диаметр 18 мм, высота 12 мм) предназначены для измерения ускорений в диапазонах 0...10—0...300 g. Чувствительный элемент [7] ПА ПФ-1 [8] (рис. 1) представляет собой квадратную пластину 8×8 мм с жесткими периферией *1* и центром *2* и профилированной областью *4*, на которой вблизи жесткого центра и периферии сформированы тензорезисторы *5* (рис. 1, *a*), ЧЭ закреплен своей периферийной частью на П-образной перемычке *6* (рис. 1, *б*) с отверстием в центре. К центральной части ЧЭ через отверстие 7 в перемычке прикреплен груз *8* с плоской нижней частью, расположенной с микрозазо-



Рис. 1. Чувствительный элемент ПА ПФ-1: *а* — вид сверху; *б* — вид сбоку

ром относительно плоского основания корпуса (демпфер Капицы). Верхняя часть груза также расположена с микрозазором относительно низа перемычки, что обеспечивает ограничение перемещений груза (без эффекта демпфирования) при его перемещении в противоположную сторону. Груз имеет симметричные вертикальные выступы 9 на периферии по обе стороны от перемычки, уравновешивающие его нижнюю часть и обеспечивающие расположение центра инерции груза в плоскости ЧЭ. Конструкция ЧЭ ПФ-1 обеспечивает в 3—5 раз большую собственную частоту (при равной чувствительности) по сравнению с ПА на основе консольного ЧЭ с той же толщиной профилированных областей.

Балансировка и термокомпенсация начального сигнала $\Pi \Phi$ -1 осуществлялась с использованием интегральной резистивной схемы, сформированной на ЧЭ.

ПА ПФ-2 (масса 10 г, диаметр 18 мм, высота 12 мм) предназначены для измерения трех компонент ускорений в диапазонах 0...10—0...300 g. КТР трехкомпонентного ПА ПФ-2 патентуется, поэтому его описание не приводится. Балансировка и термокомпенсация начального сигнала трех измерительных каналов (a_x , a_y , a_z) осуществлялась внешними постоянными резисторами с использованием выходов четвертого (температурного) канала.

ПА ПФ-3 (масса 5 г, диаметр 15 мм, высота 8 мм) предназначены для измерений ускорений в диапазонах 0...50-0...1000 g. Измерительный модуль ПА ПФ-3 (рис. 2) размерами $8 \times 8 \times 1,2$ мм представляет собой сэндвич из трех пластин: ЧЭ (средняя пластина 1) и верхней и нижней пластин 2 и 3, обеспечивающих корпусирование ЧЭ 1 и симметричное двустороннее демпфирование упругой системы. Для этого в пластинах 2 и 3 сформированы (анизотропным травлением) углубления 4. Центральная часть ЧЭ (рис. 2, б) — собственно ЧЭ отделена от периферийной части сквозными прорезями 5 и подвешена к ней на гибких профилированных перемычках 6. На центральной профилированной перемычке 7 расположена тензосхема (не показана). Такая конструкция по сравнению с консольным ЧЭ (тех же размеров и той же толщины профилированных областей) обеспечивает при близкой чувствительности (что реализуется в случае малой изгибной жесткости периферийных перемычек 6 по сравнению с изгибной жесткостью перемычки 7) в 1,4 раза большую собственную



a — вид сборку; δ — вид сверху (тензосистема не показана)

частоту ПА, близкую к нулю поперечную чувствительность, высокую боковую прочность.

Балансировка и термокомпенсация начального сигнала и настройка чувствительности ПФ-3 осуществлялись с использованием интегральных резистивных схем, сформированных на верхней крышке 3 измерительного модуля.

Расчетные характеристики ПА

ΠΑ Γ	ΙФ-1Π/	<mark>4 ΠΦ-</mark> 2	2ПА Г	IΦ-3
------	--------	----------------------	-------	------

Чувствительность k ,		
мВ/д 100,3	100,3	2 0,1
Диапазон измеряемых		
ускорений а ₀		
$(a_0 = 100 \text{ MB/}k), \text{ g} \dots \dots 10\dots 300$	10300	50 1000
Собственная частота v ₀ ,		
кГц15	15	3,5 10
Добротность Q 0,75	0,75	0,7 5
Уровень ограничения		
сигнала U _{огр} , мВ 7001200	700 1200	500 800

3 (4)	1 (1)
10	4
50100	2050
	3 (4) 10 50100

Настройка ПА

В процессе сборки и испытаний ПА были:

- отработана технология выставления требуемого микрозазора между пластинами-демпферами и точечными ограничителями в ПФ-1 и ПФ-2;
- определены и реализованы требуемые для эффективного демпфирования ПФ-3 глубины травления пластин-крышек (демпферов);
- отработаны технология настройки и компенсации параметров для всех трех типов ПА;
- отработана технология настройки чувствительности ПФ-3.

Результаты испытаний

Полученные динамические характеристики некоторых испытанных ПА представлены в таблице. Для каждого трехкомпонентного ПА ПФ-2 приводятся характеристики сначала для оси z (вертикальной — перпендикулярной посадочной поверхности ПА), затем для осей x и y (лежащих в плоскости посадочной поверхности ПА).

Все представленные ПА выдержали воздействие ускорений 100 g на частоте 100 Гц (на резонансном стенде) и ударных ускорений в 700 g. Уровень ограничения в ПА определялся по началу ограничения и искажения формы сигнала на вибрационном стенде (в случае ПА с большим a_0 — на ударном стенде).

Нелинейность ПА, определенная на вибростенде, не превышала 1 % и была практически целиком обусловлена погрешностью градуировки. Нелинейность, определенная при статическом нагружении ЧЭ, используемых в ПФ-1 и ПФ-2, силой, не превышала для всех ЧЭ 0,2 % в диапазоне выходных сигналов до 500 мВ (5 a_0).

Для оценки возможностей используемого воздушного демпфирования ПА ПФ-1 № 2 был передемпфирован при изготовлении. Его добротность оценивалась по относительной величине сигнала на расчетной резонансной частоте и на частоте, при которой достигался сдвиг фазы сигнала на $\pi/2$ относительно фазы действующего ускорения (частоты различались менее чем на 5 %). При собственной частоте 3 кГц и чувствительности 0,8 мВ/g

Результаты испытаний ПА (и_{поп} — поперечная чувствительность; v_{раб} — рабочий диапазон частот при неравномерности АЧХ не более 6 %)

Тип и номер ПА	<i>k</i> , мB/g (<i>a</i> ₀ , g)	h, MKM	т, г	v ₀ , кГц	Q	v _{раб} , Гц	<i>U</i> _{огр} , мВ	k _{поп} , %
ПФ-1 №3	12 (8,5)	50	2,0	0,8	2,4	0170	800	2,5
ПФ-1 №7	2,6 (39)	75	1,0	1,8	0,5	0200	500	2,3
ПФ-1 №11	0,9 (110)	75	0,3	3,1	1,5	0600	700	1,8
ПФ-2 №5	6 (17) 4,7 (21) 4,5 (22)	75	2,0	$1,1 \\ 0,8 \\ 0,8$	1,8 2,5 2,1	0220 0160 0160	800 600 500	2,5 3,5 3,8
ПФ-2 №13	2,3 (40) 1,7 (60) 1,5 (60)	75	0,9	1,7 1,3 1,3	3,5 4,5 4,5	0340 0260 0260	900 700 600	2,4 4,2 1,8
ПФ-3 №8	1,5 (70)	20	—	3,2	3,5	0650	500	1,7
ПФ-3 №9	1,0 (100)	25	_	4,1	4,5	0800	800	2,2

добротность *Q* акселерометра составила около 0,11 при уровне ограничения около 300 мВ.

Для оценки температурной зависимости степени демпфирования были проведены измерения АЧХ ПА ПФ-1 № 13 при трех температурах: T = -20 °C, T = 20 °C, T = +80 °C. Подтверждена слабая температурная зависимость степени демпфирования: изменение добротности не превышало 10 % от ее значения при T = 20 °C, собственной частоты — 5 %.

После компенсации и настройки температурный уход чувствительности ПА не превышал $\pm 2... \pm 5 \%$, а начальный сигнал и его температурный дрейф — 5 мВ в диапазоне температур -60...+80 °C.

Обсуждение результатов, выводы

В изготовленных и испытанных ПА реализованы эффективное воздушное демпфирование и необходимые вибро- и ударопрочность при высоких метрологических характеристиках. Авторы готовы к сотрудничеству с заинтересованными организациями в завершении представленных разработок как в существующем виде, так и в виде интегральных МЭМС-акселерометров. Расчеты показывают, что при толщине профилированных областей ЧЭ в 5 мкм размеры ЧЭ и измерительных модулей интегрального трехкомпонентного акселерометра (интегрального аналога ПФ-2) и ПА ПФ-3 не превысят 4 мм при реализации измеряемых диапазонов ускорения от 10 g и выше. Использование современных технологий соединения пластин измерительных модулей должно дополнительно существенно повысить временную и температурную стабильность характеристик ПА по сравнению с применяемым клеевым соединением.

Список литературы

1. Мокров Е. А., Папко А. А. Акселерометры НИИ физических измерений — элементы микросистемотехники // Мир электроники. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. 2005. С. 525—535.

2. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера. 2007. 384 с.

3. Амеличев В. В., Данилова Н. Л., Панков В. В., Тарасов В. А. Конструктивно-технологический базис многовариантного производства интегральных полупроводниковых тензопреобразователей // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 2—4.

4. Амеличев В. В., Павлов А. Ю., Погалов А. И. Конструктивно-технологическая оптимизация интегральных преобразователей физических величин // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С, 14—17.

5. Бобровник В. Н., Шелепин Н. А. Анализ собственной частоты и механических напряжений тензопреобрзователя балочного типа (ТКБ) // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 2. С. 25–27.

6. Галушков А. И., Панкратов О. В., Погалов А. И. и др. Методы проектирования и калибровки микроэлектронных пьезорезистивных преобразователей ускорения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 7. С. 45–58.

7. Галушков А. И., Сауров А. Н., Погалов А. И. Моделирование, динамический и прочностной анализ инерционных чувствительных наноэлементов // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 34—38.

8. **Пивоненков Б. И.** Интегральный чувствительный элемент датчика механических величин. АС № 690393 от 08.08.77.

9. Пивоненков Б. И., Бережнюк Б. И., Архарова Л. Г. и др. Тензоакселерометр. АС № 3009164 от 08.10.87.

УДК 623.4.084.2

С. П. Тимошенков, д-р техн. наук, проф., зав. каф., В. В. Калугин, д-р техн. наук, доц., А. С. Шалимов, аспирант, С. А. Анчутин, аспирант, Е. С. Морозова, аспирант, Московский институт электронной техники (технический университет), e-mail: spt@chem.miee.ru

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УСКОРЕНИЙ

Рассматривается одна из возможных реализаций микромеханического акселерометра, выполненная с использованием отечественной микросхемы ОАО "Ангстрем" ххххЧМ2Т. Приводятся результаты испытаний опытного образца.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, емкостные акселерометры

Емкостные преобразователи ускорений (ЕПУ) занимают важное положение в современной технике. Главная задача, решаемая ЕПУ, — оценка ускорений движущегося объекта — позволяет использовать их в составе систем навигации объектов как военного, так и гражданского назначения, что говорит об актуальности разработок ЕПУ и перспективности их применения для решения широкого круга задач.

ЕПУ состоит из двух основных частей — микромеханического элемента и электронного узла. Поскольку каждая их этих частей в равной степени влияет на выходные параметры ЕПУ, то представляется целесообразным провести отдельный анализ основных вопросов, касающихся разработки указанных частей.

Традиционные технологии производства микросхем стали основой для изготовления микромеханических элементов. Кремний является основным материалом при их изготовлении. Методы микрообработки кремния позволяют изготавливать микросистемы, размеры которых составляют доли миллиметра. Под микрообработкой понимается формирование трехмерных микроскопических механических структур внутри кремниевой пластины или на ее поверхности. Существуют две технологии микрообработки кремния: объемная, при которой элементы системы вытравливаются внутри кремниевой пластины, и поверхностная, когда микромеханические слои формируются из пленок, осажденных на поверхности пластины. Одним из основных показателей анизотропного травления кремния — одного из методов объемной технологии — является качество вытравливаемого

профиля, которое характеризуется дефектностью наклонных стенок и дна профиля. На различных образцах были обнаружены разного рода дефекты: в виде правильных геометрических фигур-пирамид, а также различного рода неровности в виде волнообразности, бугорков и т. п. В ходе проведения исследований были выявлены причины, вызывающие появление тех или иных дефектов. Было установлено, что форма и размер дефектов зависят, в первую очередь, от выбора состава травителя и технологических режимов травления, а также от технологии предварительной обработки кремниевых пластин перед травлением и даже от особенностей конструкции технологического оборудования. Проведенные исследования показали, что в основном дефекты появляются на поверхности дна профиля (в плоскости (100)), при этом на боковых стенках профиля (в плоскости (111)) дефекты, как правило, отсутствуют в широком диапазоне изменения технологических режимов травления. Эту особенность анизотропного травления кремния можно использовать при изготовлении микромеханических элементов путем разработки конструкций, в которых объемные элементы составлены лишь из наклонных стенок. Такой подход позволит значительно сократить количество дефектов в изготовляемых микромеханических элементах и тем самым улучшить их выходные параметры.

Второй составляющей частью ЕПУ является электронный узел, выполняющий съем сигнала с микромеханического элемента. Принципы построения этих электронных узлов различны, но особый интерес представляют решения в виде интегральных микросхем. Одним из таких решений является новая отечественная разработка ОАО "Ангстрем" — двухканальный преобразователь "емкость—напряжение" ххххЧМ2Т (рис. 1) [1].

Данная микросхема предназначена для однои двухосевых емкостных инерциальных сенсоров линейных ускорений, ударов, вибраций, углов наклона с выходным сигналом по напряжению (рис. 2).

Главными достоинствами преобразователя ххххЧМ2Т являются: низкое энергопотребление (<5 мВт); низкий уровень помех; встроенный генератор импульсов управления; возможность подключения внешнего управляющего генератора; регулируемый коэффициент преобразования; возможность прецизионной регулировки нулевого сигнала; однополярное питание; температурный диапазон –60...+125°С. Полоса пропускания этой микросхемы может задаваться либо внешним фильтром, либо одним конденсатором.



a — двухосевого; δ — одноосевого; ϵ — два одноосевых

В ходе проведения работ были изготовлены опытные образцы ЕПУ [2], для оценки параметров которых разработан измерительный стенд, его структурная схема представлена на рис. 3.

Работа стенда основана на проведении испытаний в поле сил тяжести Земли с помощью поворотного стенда, который позволяет располагать испытываемый ЕПУ в камере тепла-холода под заданным углом и тем самым подвергать воздействию ускорения в диапазоне от 0 до 1 g. Одновременно в камере тепла-холода могут находиться до шести испытываемых образцов. Выходной сигнал ЕПУ измеряется мультиметром, а выбор конкретного образца и подача питания осуществляются пультом контроля.

При каждой заданной температуре в диапазоне от -60...+125 °С испытываемые образцы поворачи-





Рис. 4. График зависимости нулевого сигнала от температуры



Рис. 5. График зависимости относительного отклонения масштабного коэффициента от значения при 25 $^\circ\!C$ от температуры

вались на 180° с шагом в 30°. В каждом заданном положении проводилось измерение выходного напряжения. Теоретическая зависимость между выходным сигналом и приложенным ускорением представляет собой следующее выражение:

$$U_{\rm BBIX} = K_0 + K_1 a_x + K_2 a_x^2, \qquad (1)$$

Результаты	испытаний	опытного	образца
------------	-----------	----------	---------

Температура,	атура, Масштабный Нелиней-		Чувстви-	
°С	коэффициент, мВ/g Ность, %		тельность, g	
$ \begin{array}{r} -60 \\ -30 \\ 0 \\ 25 \\ 50 \\ 75 \\ 100 \\ 125 \\ \end{array} $	167 158 151 150 152 157 159 151	2,15 0,19 2,21 1,57 0,94 2,21 2,15 3,19	$\begin{array}{c} 0,9\cdot 10^{-3}\\ 1,2\cdot 10^{-3}\\ 1,2\cdot 10^{-3}\\ 3,5\cdot 10^{-3}\\ 1,3\cdot 10^{-3}\\ 1,2\cdot 10^{-3}\\ 1,3\cdot 10^{-3}\\ 1,5\cdot 10^{-3}\\ \end{array}$	

где $U_{\rm вых}$ — выходной сигнал; K_0 — смещение нулевого сигнала; K_1 — крутизна выходной характеристики (масштабный коэффициент); K_2 — коэффициент нелинейности; a_x — измеряемое ускорение.

Для оценки выходных параметров ЕПУ необходимо записать систему уравнений на основе выражения (1) для каждого положения образца:

$$U_{\text{Bbix1}} = K_0 + K_1 a_1 + K_2 a_1^2;$$

$$U_{\text{Bbix2}} = K_0 + K_1 a_2 + K_2 a_2^2;$$

$$\dots$$

$$U_{\text{Bbix7}} = K_0 + K_1 a_7 + K_2 a_7^2.$$
(2)

Решая систему уравнений (2), получаем значения масштабного коэффициента, нулевого сигнала и нелинейности для каждой заданной температуры.

В данной работе приводятся результаты испытаний опытного образца с полосой пропускания 50 Гц (см. таблицу).

В результате проведенных испытаний было установлено, что температурный дрейф нулевого сигнала составляет 112 мg в диапазоне температур -60...+125 °С

(рис. 4).

Кроме того, было установлено, что максимальное относительное отклонение масштабного коэффициента от значения при 25 °C составляет 11 % (рис. 5).

Таким образом, в ходе проведенных работ были изготовлены опытные образцы ЕПУ, имеющие удовлетворительные параметры. Это позволяет говорить о перспективности проведения дальнейших работ для достижения лучших параметров в целях использования разработанных ЕПУ в различных областях современной техники.

Список литературы

1. Двухканальный С/V-преобразователь для емкостных чувствительных элементов ххххЧМ2Т. Документация на микросхему. ОАО Ангстрем.

2. Пат. 2251702 РФ; Опубл. 02.07.2004. Микромеханический акселерометр / Тимошенков С. П., Рубчиц В. Г., Калугин В. В. и др.

Молекулярная электроника

УДК 544.142

А. А. Потапов, д-р хим. наук, проф., Институт динамики систем и теории управления СО РАН, г. Иркутск, e-mail: matrimm@yandex.ru

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ СВЯЗИ ГОМОЯДЕРНЫХ МОЛЕКУЛ, ОБРАЗУЕМЫХ АТОМАМИ I ГРУППЫ ТАБЛИЦЫ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Предлагается для обсуждения механизм формирования химической связи на примере простейших гомоядерных молекул, образованных из атомов I группы таблицы Менделеева. Предложена двухцентровая модель молекулы. Получено уравнение для энергии связи между атомами, основанное на применении классических законов электростатики.

Ключевые слова: атом, молекула, химическая связь, электрон, остов атома, взаимодействие зарядов, нанотехнологии, атомно-молекулярная сборка.

В основе современной технологии в конечном итоге лежит атомно-молекулярная сборка. Очевидно, что эффективность той или иной технологии зависит от уровня понимания природы и механизмов формирования физических и химических связей между атомами и молекулами, которые и составляют теоретический и методический фундамент атомно-молекулярной сборки. Данное обстоятельство предопределяет значимость химической связи как в познавательном, так и в практическом отношениях. Сегодняшнее понимание природы химической связи опирается главным образом на представления об электростатическом характере межатомных взаимодействий [1-4]. Нерешенной остается задача корректного описания химической связи. Наиболее дискутируемыми в этом отношении остаются метод валентных схем и метод линейной комбинации атомных орбиталей [3, 5]. В настоящей работе предлагается для обсуждения альтернативный подход к описанию химической связи на примере простейших

двухатомных молекул, основанный на диполь-оболочечной модели атомов [6].

Согласно сформировавшимся на сегодняшний день представлениям образование химической связи обязано повышением электронной плотности в межатомном пространстве, которое сопровождается уменьшением потенциальной энергии системы и повышением устойчивости вновь образуемой структуры [1—5].

Одна из первых физических моделей молекулы была предложена Н. Бором, она представляет собой "систему, состоящую из двух ядер одинакового заряда и одного кольца электронов, вращающихся вокруг прямой, соединяющей ядро" [7, с. 133]. В случае кольца с двумя электронами такая система представляет собой молекулу водорода. В последующем к данной модели неоднократно обращались в целях совершенствования. Примером могут служить относительно недавние работы [8, 9]. Ценность модели молекулы в виде кольца электронов между протонами заключается в том, что с ее помощью была показана принципиальная возможность объяснения природы химической связи на основе классических законов электростатики.

К сожалению, модель Бора и ее последующие модификации не смогли дать удовлетворительного описания всей совокупности свойств молекул, в том числе и молекулы водорода. К числу основных недостатков модели следует отнести несостоятельность геометрического строения молекулы по данной модели. Действительно, следуя данной модели, оба протона оказываются открытыми (не экранированными), что предполагает высокую химическую активность в кулоновском взаимодействии молекул друг с другом и с другими заряженными микрочастицами. Данное обстоятельство резко ограничивает возможности настоящей модели.

Очевидно, что строение молекул причинно обусловлено электронным строением составляющих их атомов. Данное обстоятельство предъявляет к разрабатываемым теориям химической связи непременное условие, которое сводится к необходимости знания электронного строения атомов.





В этом отношении наиболее приемлемой для нашего рассмотрения может служить оболочечная модель атомов, предложенная Бором [7]. В настоящее время данная модель усовершенствована и доведена до уровня количественного описания [6]. Это так называемая диполь-оболочечная модель атома, согласно которой атом рассматривается как двухзарядовая система, образуемая положительно заряженным остовом и каждым из электронов внешней оболочки. В приложении к атомам I группы таблицы Менделеева эта модель представляет собой остов атома и электрон внешней оболочки. Их объединяет признак принадлежности к одноэлектронным системам. В приближении недеформируемых оболочек атомы щелочных металлов могут быть отнесены к классу водородоподобных атомов. Другим общим для них признаком является дипольное строение электрона: жестко связанные между собой заряды остова атома и электрона представляют дипольный момент. Дипольное строение атомов I группы предопределяет и объединяет их чрезвычайно высокую активность, а также объясняет тот факт, что время жизни атомов в их индивидуальном состоянии очень мало, и они стремятся объединиться в устойчивые молекулярные структуры.

Предельно простое строение имеет атом водорода. Можно ожидать, что и строение молекулы водорода будет также наипростейшим. На рис. 1, *а* показаны атомы, соответствующие модели Резерфорда—Бора. Штриховой линией показаны круговые орбиты атомов в их невозмущенном состоянии. Ядро и электрон жестко связаны между собой (энергия связи $\varepsilon_{\rm H} = 13,6$ эВ) и образуют дипольный момент (показаны стрелками).

На относительно больших расстояниях между атомами действуют дисперсионные силы притяжения, природа которых определяется флуктуациями

диполей атомов, а также электростатические силы, возникающие между двумя диполями, так что $U = -\frac{2p^2}{r^3}\cos\varphi$, где r — межатомное расстояние; $\cos\varphi$ — угол между осями диполей p [10]. По мере

сближения атомов диполи стремятся к взаимной ориентации типа "голова-хвост" (см. рис. 1, б). На расстоянии порядка $r \approx 1$ Å энергия притяжения атомов водорода достигает значения $u \approx 6...8$ эВ. Этой энергии достаточно для того, чтобы обеспечить взаимное проникновение атомов. На расстояниях между ядрами $r < 2a_{\rm B}$, при которых электронные оболочки перекрываются, взаимодействия приобретают характер заряд-зарядовых. Электрон одного атома попадает в поле притяжения ядра другого атома и наоборот; при дальнейшем сближении атомов возникают силы отталкивания между ядрами и электронами, принадлежащими разным атомам (рис. 1, в). При этом, для того чтобы обеспечить устойчивость вновь образуемой системы, электроны обоих атомов должны сохранить вращательное движение. Это возможно осуществить, если электроны обоих атомов перейдут на одну общую для них траекторию, как показано на рис. 1, в. Устойчивость образованной таким образом молекулы достигается благодаря балансу сил центробежного вращения электронов в кулоновском поле ядер, сил кулоновского притяжения каждого ядра электронами, а также сил кулоновского отталкивания ядер и электронов. В результате совокупного действия этих сил в системе устанавливается динамическое равновесие между ядрами и электронами, соответствующее минимальному расстоянию между ядрами и максимально удаленными друг от друга электронами, находящимися предположительно на эллиптической орбите. Именно



свойство эллипса, в фокусах которого находятся ядра, обеспечивает синхронизацию движения равноудаленных друг от друга электронов относительно центра системы и сохранение общей энергии неизменной в процессе вращательного движения электронов по эллиптической орбите (рис. 1, β).

Правомерность предлагаемой модели молекулы водорода с общей эллиптической орбитой может быть подтверждена следующими доводами: 1) атомы в составе молекулы (их внешние полусферы) сохраняют свою исходную электронную конфигурацию, что подтверждается, в частности, приблизительным равенством потенциалов ионизации атомов водорода и образуемой из них молекулы; 2) ядра и электроны атомов, образующие молекулу, представляют собой два одинаковых и разнонаправленных дипольных момента, которые дают результирующий нулевой дипольный момент, обеспечивая молекуле электрическую нейтральность и, соответственно, присущую молекулам водорода предельно высокую инертность; 3) устойчивость двухэлектронных орбит подтверждается электронным строением гелийподобных атомов [6]; круговые орбиты можно рассматривать как частный случай эллиптических орбит.

Исходя из данной модели молекулы, рассмотрим две характерные конфигурации электронов (рис. 2). Конфигурация с максимально разнесенными друг от друга электронами, расположенными вдоль оси молекулы, приведена на рис. 2, *а.* Устойчивость данной конфигурации достигается благодаря балансу внутримолекулярных сил: с одной стороны, сил кулоновского притяжения ядер к дальним электронам, т. е. притяжения ядра 1 к электрону 2 и ядра 2 к электрону 1, с другой стороны, — сил взаимного отталкивания ядер. В первом приближении энергию связи между атомами можно представить в виде

$$u_{\parallel} = \frac{-2e^2}{l+a} + \frac{e^2}{l} , \qquad (1)$$

где l — равновесное расстояние между ядрами; a — радиус атомов, составляющих молекулу водорода; e — элементарный заряд.

Первый член данного уравнения представляет собой энергию притяжения каждого из ядер 1 (2) электроном 2 (1) в соответствии с законом Кулона. Здесь коэффициент 2 учитывает одновременное действие сил со стороны обоих электронов, стремящихся удержать ядра в положении равновесия. Второй член представляет собой энергию кулоновского отталкивания ядер, находящихся на расстоянии *l*. Вклады кинетической энергии электронов центробежного отталкивания в этой схеме разнонаправлены и взаимно компенсируются.

Аналогичное уравнение можно записать для конфигурации с минимальным расстоянием между электронами (рис. 2, *б*).

$$u_{\perp} = -\frac{4e^2}{s}\cos\varphi + \frac{e^2}{l},\qquad(2)$$

где *s* — расстояние между каждым из электронов и ядрами; ϕ — угол между осью молекулы и направлением связи ядро—электрон.

Здесь первый член представляет собой результирующую энергию кулоновского притяжения ядра вдоль оси молекулы, обусловливаемую действием электронов. Замена $\cos \varphi = \frac{l}{2s}$ в формуле (2) дает

$$u_{\perp} = \frac{-2e^2l}{\left(a_{\rm B}\right)^2 + \left(l/2\right)^2} + \frac{e^2}{l}.$$
 (3)

Эффективная энергия связи атомов равна среднему по энергиям, так что

$$u^{-} = \frac{u_{\parallel} + u_{\perp}}{2} = -\frac{e^2}{l + a_{\rm B}} - \frac{e^2 l}{(a_{\rm B})^2 + (l/2)^2} + \frac{e^2}{l}.$$
 (4)

Подстановка в выражение (4) известных величин l = 0, 74 Å, $a_{\rm B} = 0, 53$ Å дает $\overline{u} = \frac{(3, 2+6, 2)}{2} =$ = 4,7 эВ, что неплохо согласуется в первом приближении с экспериментальным значением \mathcal{D} = = 4,74 эВ [2, 11] (фактически на уровне погрешности измерения величины D): при сравнении величин \overline{u} и \mathcal{D} надо учитывать, что кроме инструментальной погрешности измерения энергии диссоциации \mathcal{D} значительную погрешность вносит неопределенность конечного состояния молекулы, обусловленного внутримолекулярной перестройкой в процессе диссоциации молекулы. Энергия связи атомов в молекуле водорода получена в простой модели, описываемой в рамках классических законов электростатики. Согласие экспериментальной \mathcal{D} и рассчитываемой величины \overline{u} может служить обоснованием принятой модели химической связи.

В рамках настоящей модели представляется возможным также рассчитать энергию связи электрона в молекуле водорода. В соответствии с рис. 2, *а* запишем энергию связи электрона как сумму потенциальной энергии в поле обоих ядер с учетом их кинетической энергии, так что

$$\varepsilon = -\frac{e^2}{2a_{\rm B}} - \frac{e^2}{2(a_{\rm B}+l)} + \frac{e^2}{2(l+2a_{\rm B})},\tag{5}$$

где первый член — энергия связи электрона 1 с ядром 1, второй член — энергия связи электрона 1 с ядром 2, третий член — энергия взаимного отталкивания электронов друг от друга. Энергия связи электрона на эллиптической орбите является постоянной величиной, поэтому в принятом здесь приближении можно ограничиться одним уравнением. Подстановка известных значений величин $a_{\rm B}$ и *l* в (5) дает $\varepsilon = 15,3$ эВ, что в пределах погрешности измерения соответствует потенциалу ионизации молекулы водорода $\varepsilon_{\rm H} = 15,4$ эВ. Увеличение энергии связи электрона в молекуле по сравнению с энергией в атоме водорода $\varepsilon_{\rm H} = 13,6$ эВ объясняется появлением в молекуле дополнительного вклада в энергию притяжения электрона со стороны второго ядра.

Настоящая модель естественным образом объясняет эффект насыщаемости связи молекул водорода и связанную с этим эффектом их химическую инертность. Согласно принятой здесь модели электроны в молекуле располагаются на эллиптической орбите симметрично относительно центра масс. Электроны жестко связаны с ядрами и образуют диполи, равные значению и обратные по направлению. В результате молекула оказывается электрически нейтральной и химически неактивной. Подтверждением эллиптической модели молекулы водорода может служить равенство $(2b \approx 1,3 \text{ Å}, a + l \approx 1, 27 \text{ Å})$, представляющее одно из замечательных свойств эллипса: сумма расстояний от выделенной (любой) точки эллипса до фокусов есть величина постоянная [12]. Таким образом, предлагаемая модель молекулы водорода позволяет объяснить всю совокупность экспериментальных данных. Ее описание достигается исключительно на основании классических законов электростатики и привносит физический смысл в такие понятия, как "перекрывание электронных оболочек", "корреляция электронных спинов" (в методе валентных связей), "образование общей пары электронов" (в теории Льюиса) и т. д. Достаточность электростатического описания химической связи молекулы водорода подтверждается существованием устойчивой конфигурации молекулярного иона водорода H_2^+ ($D = 2,65 \Rightarrow B$), у ко-

Данные для расчета энергии химической связи между атомами в составе молекул и энергия диссоциации

Мо- леку- ла	<i>l</i> , Å [14]	<i>a</i> , Å [13]	σ [6]	<i>ū</i> , эВ по (4)	<i>и</i> ∥, эВ по (6)	<i>u</i> ⊥, эВ по (7)	Д, эВ [14]
H ₂	0,74	0,53	1	5,2	4,2	6,2	4,74
Li ₂	2,67	0,75	1,31	1,6	0,4	1,4	1,1
Na ₂	3,08	1,75	1,25	1,8	0,7	1,3	0,7
K ₂	3,9	2,14	1,29	1,5	0,6	1,1	0,5
Rb ₂	4,1	2,19	1,28	1,5	0,6	1,1	0,45
Cs ₂	4,3	2,38	1,35	1,2	0,5	0,7	0,4

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 1, 2010 -

торого химическая связь "по определению" может быть только электростатической.

Атомы I группы таблицы Менделеева структурно подобны атому водорода. Согласно диполь-оболочечной модели атома [6] и в приближении недеформируемых оболочек они могут быть сведены к двухзарядовой системе, образуемой положительно заряженным остовом с зарядом +e и электроном с зарядом -e. В этом случае полученные для молекулы водорода уравнения могут быть применены к молекулам, образуемым из атомов щелочных металлов.

Для оценки величины u обратимся к уравнению (1). Рассчитанные по (1) энергии связи атомов приведены в таблице. Все они систематически завышены по сравнению с экспериментальными данными по энергиям диссоциации D и различие между ними увеличивается с увеличением порядкового номера элемента в таблице Менделеева. Этого можно было ожидать, поскольку принятая в исходном пункте модель не учитывает ряд факторов в последующем приближении к описанию действительного объекта.

Во-первых, следует учесть эффект экранирования. Ранее [6] было установлено, что у атомов I группы таблицы Менделеева эффект экранирования проявляется в наибольшей степени. В таблице приведены полученные в работе [6] константы экранирования σ . Эта величина характеризует прозрачность оболочки остова атома и позволяет определить заряд остова $+e\sqrt{\sigma}$, соответствующий заданному радиусу *a* атома. Для этого в уравнения (4) и (3) следует ввести поправку на эффективный заряд остова $+e\sqrt{\sigma}$, так что

$$u_{\parallel} = -\frac{2e^2\sqrt{\sigma}}{l+a} + \frac{e^2\sigma}{l}; \qquad (6)$$

$$u_{\perp} = -\frac{2e^2 \sqrt{\sigma}l}{l^2 + a^2} + \frac{e^2 \sigma}{l}.$$
 (7)

Рассчитанные по (6) и (7) энергии u_{\parallel} и u_{\perp} приведены в таблице. Величины u_{\parallel} молекул достаточно близки к экспериментальным данным \mathcal{D} ; в этом ряду явно выпадает энергия u_{\parallel} , что, по-видимому, связано с особенностями двухэлектронной оболочки его остова. Значения величины u_{\perp} систематически завышены по сравнению со значениями энергии диссоциации \mathcal{D} и энергии u_{\parallel} . Наблюдаемое различие связано с несовершенством модели эллиптической орбиты молекулы, проявляющимся в изменении межъядерного расстояния в процессе вращательного движения электронов. В этом отношении можно предположить, что периодические колебания ядер относительно друг друга являются ничем иным, как "нулевыми" колебаниями.

Другой неучтенной погрешностью определения энергии *и* по (4) является конечная упругость остова атома. Ее можно найти с помощью выражения

для индукционной энергии атома [10]
$$u_d = -\frac{\alpha_0 e^2}{2a^4}$$

где *е* — элементарный заряд; α_0 — поляризуемость остова атома; *а* — радиус атома. В приложении к молекуле это выражение принимает вид

$$u_d = -\frac{2\alpha_0 e^2}{2(l+a)^4},$$
 (8)

где α_0 — поляризуемость остова каждого из атомов молекулы; (l + a) — эффективное расстояние между одним из электронов и остовом второго атома; коэффициент 2 в числителе учитывает вклад в энергию *и* обоих электронов.

Оценка вклада u_d в общую энергию u дает численные значения величины u_d , не превышающие 0,1 эВ, что позволяет на данном этапе исследований пренебречь данной поправкой.

Отличие рассчитанных значений \overline{u} от экспериментальных u_{2} в ряде случаев достаточно большое, хотя очевидна корреляция между ними. Наблюдаемое различие обусловлено конечными размерами остовов атомов, а также погрешностью измерения величин, используемых при расчете \overline{u} . В принципиальном отношении уравнения (1) и (3) можно уточнять введением соответствующих поправок. Вместе с тем, измерение энергии диссоциации D молекул методом их разрыва сопряжено с систематической погрешностью, возникающей в связи с неопределенностью энергетического состояния молекулы в момент ее разрыва. Это означает, что для установления корректности уравнений (1) и (3) необходимо иметь точные данные по энергиям связи атомов в молекулах типа X_2 (X = H, Li, Na, K, Rb, Cs).

Таким образом, для гомоядерных молекул, образованных из атомов I группы таблицы Менделеева, приемлема двухцентровая модель, согласно которой оба электрона вращаются на общей эллиптической орбите; такая система удерживается в устойчивом состоянии в поле ядер, которые располагаются в фокусах воображаемого эллипса. Энергия связи между атомами, представляющая химическую связь, определяется исключительно электростатическими взаимодействиями между зарядами ядер и электронов. Тем самым продемонстрирована принципиальная возможность на основе простых выражений выполнять инженерные расчеты для гомоядерных молекул и давать количественную оценку прочности таких молекул. Очевидно, что аналогичные модели и теоретические построения могут быть разработаны и для более сложных атомно-молекулярных систем. Полученные соотношения применимы и для оценки энергии связи атомов при выполнении операции замещения в процессе атомно-молекулярной сборки.

Список литературы

1. Химическая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. С. 234—236.

2. Краснов К. С. Молекулы и химическая связь. М.: Высш. школа, 1977. 280 с.

3. **Степанов Н. Ф.** Квантовая механика и квантовая химия. М.: Мир, 2001. 519 с.

4. Бейдер 3. Атомы в молекулах. М.: Мир, 2001. 532 с.

5. Татевский В. М. Строение молекул. М.: Химия, 1977. 512 с.

6. Потапов А. А. Электронное строение атомов // Регулярная и хаотическая динамика. Москва—Ижевск, 2009. 264 с.

7. **Бор Н.** Избранные научные труды. М.: Наука, 1970. Т. 1. С. 318—375.

8. Голубев А. Н. Динамика химической связи. Кирово-Чепецк: Изд-во ОАО Кировочепецкий химический комбинат, 2004. 202 с.

9. Ганкин В. Ю., Ганкин Ю. В. Как образуется химическая связь и протекают химические реакции. М.: Граница, 2007. 320 с.

10. Каплан И. Г. Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Наука, 1982. — 312 с.

11. Флайгер У. Строение и динамика молекул. М.: Мир, 1982. Т. 2. 872 с.

12. Барсуков О. А., Ельяшевич М. А. Основы атомной физики. М.: Научный мир, 2006. 648 с.

13. **Немченко К. Э.** Аналитическая геометрия. М.: Эксмо, 2007. — 352 с.

14. Потапов А. А. Энергия связи и радиусы атомов и ионов // Нанотехника. (В печати)

15. Бацанов С. С. Структурная химия. Факты и зависимости. — М.: Диалог-МГУ, 2000. 292 с.



CONTENTS

Keywords: mathematical modeling, thermoelectricity, thermo-electrical units, semiconductors, Peltier effect, bismuth telluride, reliability, diffusion.

Keywords: field, Poisson process, algorithm, probability distribution, majorant, multimodal probability density, stochastic process.

Tarnavsky G. A. *Implantation of Doping Impurities in Silicon Substrate with Unplanar Surface* 21 The investigation of technological process parameters effect (sighting angle and energy of implantation) on concentrations distributions of doping impurities in silicon substrate are conducted by computer simulation. **Keywords:** computer simulation, doping in silicon, implantation, donor and acceptor impurities.

Researches of morphostructure layers of resistive structures on the basis of chrome-nickel alloys on lowdimensional level. Mechanisms of layer formation by means of clusters are established. On the basis of thermodynamic and fractal aspects the physical and mathematical model controlling the cluster size by means of layers condensation conditions used for a method of thermal evaporation in vacuum is developed.

Keywords: morphostructure, a layer, resistive structure, a surface, fractal dimension, cluster, model, lowdimensional level, information-measuring device, condensation.

Keywords: micromechanical accelerometer, level sensor, pyrometric sensor, magnetic sensor, inertial navigational microsystem, rate sensor.

The paper presents the analysis of MEMS-based gyro triad errors that was carried out in order to refine conventional signal models for the sensors of such kind. The research has been performed by using a small-sized two-axis rotary test table developed by department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint-Petersburg Electrotechnical University by request of Center of Microelectronics and Diagnostics. **Keywords:** inertial navigation, error model, micromechanical gyro, small-sized two-axis test table.

Pivonenkov B. I., Shkolnikov V. M. *Single- and Three-Axis Piezoresistive Accelerometers with Air Damping* . . . 42 Constructions of three kinds of piezoresistive accelerometers with air damping are described: single- and threeaxis accelerometers with separate inertia mass and integral single-axis accelerometer (MEMS-accelerometer). Experimental data are given. Accelerometers have high dynamic and strength properties. An advisability of production of MEMS-three-axis piezoresistive accelerometer is shown.

Keywords: piezoresistive accelerometer, sensor, MEMS (Microelectromechanical systems), three-axis accelerometer, air damping, vibration strength, shock resistance.

Keywords: atom, a molecule, a chemical bond, electron, an atom frame, interection charges, nanotechnology, atom-molecular assemblage.

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999. Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru; http://www.microsystems.ru

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 06.11.2009. Подписано в печать 21.12.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,03. Заказ 22. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15

– НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, № 1, 2010 –