

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 11 ✧ 2006

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.

Асеев А. Л.

Гапонов С. В.

Каляев И. А.

Климов Д. М.

Ковальчук М. В.

Лифшиц В. Г.

Мокеров В. Г.

Никитов С. А.

Сигов А. С.

Чаплыгин Ю. А.

Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.

Антонов Б. И.

Астахов М. В.

Быков В. А.

Волчихин В. И.

Гоев А. И.

Горнев Е. С.

Градецкий В. Г.

Гурович Б. А.

Журавлев П. В.

Захаревич В. Г.

Кальнов В. А.

Карякин А. А.

Квардаков В. В.

Кузин А. Ю.

Мокров Е. А.

Норенков И. П.

Панич А. Е.

Панфилов Ю. В.

Петросянец К. О.

Петрунин В. Ф.

Путилов А. В.

Пятьшев Е. Н.

Сауров А. Н.

Сухопаров А. И.

Телец В. А.

Тодуа П. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Шевченко В. Я., Самойлович М. И. Геометрия, информация и строение наномира 2

Груздев А. О. Создание учебной нанолaborатории на основе СЗМ "Nanoeducator" для платформы Apple 8

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Амеличев В. А., Вернер В. Д., Ильков А. В., Сауров А. Н. Совместимость технологии микросистемной техники с технологией микроэлектроники. 10

Щеглов П. А., Никишина Е. Е., Дробот Д. В., Лебедева Е. Н. Перспективная технология металлических и оксидных наноматериалов на основе редких элементов 15

Павлов С. В. Влияние электрического поля, примесей и граничных электромеханических напряжений на поляризационный профиль тонкой сегнетоэлектрической пленки 18

Шауцуков А. Г., Кизилов И. М., Кузнецов Г. Д. Моделирование процесса формирования легированных атомами отдачи слоев 21

Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Рембеза С. И., Комарова А. С., Дырда Н. Н. Нанокomпозиты $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ для микроэлектронных датчиков газов. 23

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Афонин С. М., Афонин П. С. Моделирование характеристик пьезоэлектрических блочных актюаторов для нано- и микроманипуляторов. 25

Абрамов И. И., Дворников О. В. Маршрут моделирования биполярно-полевых аналоговых интегральных схем в программах типа "Spice" 30

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Тихонов Р. Д. Двухколлекторный магнитотранзистор: отрицательная чувствительность, абсолютная чувствительность и шумы 36

Годовицын И. В. Расчет деформации электростатических ВЧ переключателей аналитическим и конечно-элементным методами. 41

СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

Яшин К. Д., Лацапнев Е. В. Англо-русский терминологический справочник по микро- и наносистемной технике 47

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 52

Contents 56

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

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

ПОДПИСКА:

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

УДК

В. Я. Шевченко*, акад. РАН,
М. И. Самойлович**, д-р техн. наук, проф.

*Институт химии силикатов
им. И. В. Гребенщикова РАН,
г. Санкт-Петербург,
**ОАО ЦНИТИ "Техномаш", г. Москва

ГЕОМЕТРИЯ, ИНФОРМАЦИЯ И СТРОЕНИЕ НАНОМИРА

Дискутируются обобщенные принципы структурной химии нанообъектов. Обращается внимание на необходимость расширенного трактования симметрии, что связано с необходимостью перехода к рассмотрению особых конструкций алгебраической геометрии. Рассматривается концепция геометрических структурных комплексов.

Президент Международного союза кристаллографов Ю. Охаша, выступая в журнале IUCr Newsletter [1] отметил, что последние десять лет свежий ветер пронесся в кристаллографии, особенно в структурной биологии и нанонауке. Такое, немного запоздалое, признание подвело итог многолетним усилиям выдающихся концептуалистов науки о строении вещества (Дж. Бернал, А. Маккей и И. Пригожин) обратить внимание на необычный и не во всем соответствующий классическим канонам мир нанообъектов. Можно утверждать, что мир переживает концептуальную революцию в области изучения строения вещества, вызванную, в свою очередь, инструментальной революцией, связанной с развитием методов электронной и атомной микроскопии высокого разрешения, а также методов спектральных исследований фемтосекундных физических и химических процессов. Возможность прямого исследования нанометрических объектов позволила открыть новый уровень организации материи, находящийся (по размерам) между макроскопическим и микроскопическим уровнями.

Наночастицы, в частности, биологические, органические, металлоорганические и другие, представлены в большинстве случаев индивидуальными образованиями. Даже неорганические наночастицы не являются "вырезанными" из кристаллической решетки и в большинстве случаев имеют специфическое строение, не соответствующее классическому описанию кристаллических материалов. Уместно проиллюстрировать данное положение такими примерами, как семейство углеродных наночастиц — фуллерены [2], икосаэдрические уг-

леродные [3] и алмазоподобные [4] кластеры, нанотрубки, конусовидные наночастицы и аналогичные. Например, необычное строение имеют металлические кластеры, кеплераты, колеса, чешуйчатые структуры, спирали, геликоиды и подобные кластеры. Более подробное описание их строения можно найти, например, в работе [5].

Важным этапом в познании принципиальных свойств наномира было открытие в 1999 г. [6] когерентных границ в наночастицах (названных *кентаврами* [5]), из которого следует, что "многофазные" наночастицы не имеют стандартных (для кристаллов) границ раздела (впоследствии, было показано [7], что стандартное понятие фазового или агрегатного состояния неприменимо к наночастицам). Для химии и биологии диссипативные структуры, как указал И. Пригожин [8], представляют особый интерес. Поэтому появление нового типа динамических состояний материи свидетельствует о когерентных процессах, идущих на надмолекулярном уровне, что находит отражение в своеобразности их свойств [9].

В своей знаменитой лекции на 10-й конференции Югославского центра кристаллографии в 1975 г. А. Маккей определил круг проблем обобщенной кристаллографии: "Кристаллография становится наукой о структурах на определенном уровне организации, структурах, больших, чем атомы, их составляющие, но меньших, чем нечто, уже сформированное как целое" [10]. Поэтому, необходимо обсудить вопрос о терминах, используемых различными авторами, но часто не согласующихся друг с другом. В Большом энциклопедическом словаре [11] структурой называется "совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе, т. е. сохранение основных свойств при различных внутренних и внешних изменениях". В толковом словаре Webster's [12] под структурой понимают "соответствующий порядок всех частей целого". Международный союз кристаллографов много лет обсуждает проблему определения кристаллического состояния. Последнее из определений заключается в том, что "кристаллическими структурами являются системы, для которых знание положений нескольких атомов позволяет вычислить положение всех атомов на любом удалении друг от друга". Как видно из приведенных примеров, использование терминов "кристалл", "структура", "кристаллическая структура", "строение" и аналогичные, может быть не тождественным у разных авторов и на определенных этапах развития науки. В литературе имеется множество других определений, связан-

ных с тем или иным объектом структурных исследований.

В работе [13] А. Маккей отметил, что ключевыми концепциями в обобщенной кристаллографии являются иерархия, самоорганизация и описание, но первыми геометрическими шагами будут аperiodичность и кривизна пространства. Отсюда следует, что вопросы строения нанообъектов связаны с геометрией пространства, в котором указанные частицы образуются и существуют. Огромная, определяющая роль геометрии в существовании объектов природы отмечалась также Д. Гильбертом (18-я проблема) [14], Э. Вигнером [15], Б. Кадомцевым [16] и другими. Однако для нанометрических объектов существуют понятные, прямые математические методы описания строения. Общая ситуация представлена на рис. 1 (здесь использованы идеи работы [17]).

Удивительно, но такие сложные формы и структуры можно создать на основе ясных и достаточно простых базовых конструкций алгебраической геометрии. Следует иметь в виду, что последнее возможно только в рамках аппарата расслоенных пространств и локального подхода, а именно, при построениях, учитывающих такие требования как калибровочная *инвариантность*, согласование связности с метрикой, особенности характеристических топологических классов и ряд других. Для наноструктур, представленных конечными решетками, для которых требование *трансляционной инвариантности* может и не иметь места, чтобы не получить бесконечного разнообразия элементов симметрии, надо наложить граничные условия. Необходимо, чтобы указанные элементы возникали, как особенности решений для физических систем, с которыми соотносятся или в которых образуются наноструктуры. Решения должны быть *инвариантны* относительно элементов симметрии, а физические свойства — описываться борелевыми алгебрами, и как ниже будет рассмотрено, необходимо использовать решения для гамильтоновых систем (к которым относится большинство наших задач), при условии их согласования с метрическими и топологическими свойствами физического пространства. Таким требованиям, в частности, удовлетворяют минимальные (локально или глобально) поверхности, являющиеся решениями уравнений, относящихся к стационарным гамильтоновым системам и характеризующихся средней кривизной $H \equiv 0$.

Переход к алгебраическим конструкциям в рамках такого подхода обусловлен целым рядом причин [20], среди которых можно отметить тот факт, что совокупности функций — интегралов (решений) для гамильтоновых систем — образуют алгебры Ли (алгебраические группы, используемые для описания систем с дифференцируемыми функциями координат). Подробное обоснование перехода

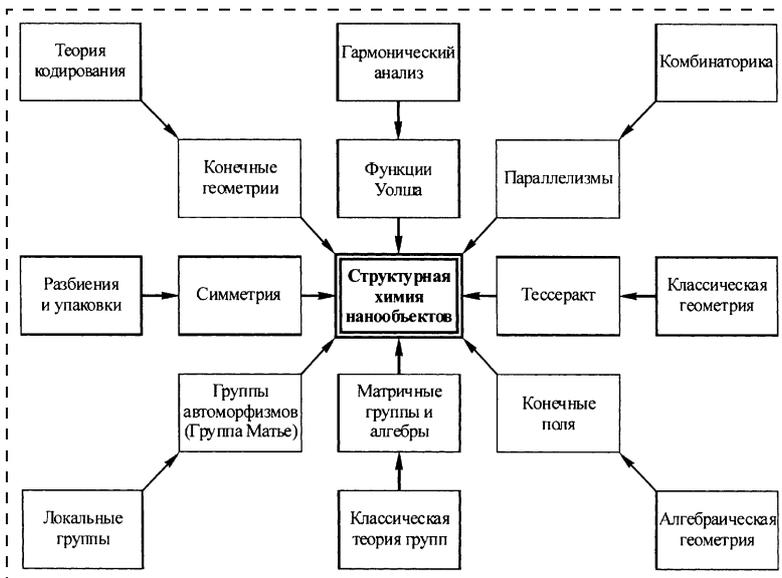


Рис. 1. Схема расширенного трактования симметрии в структурной химии нанообъектов

к алгебраическим конструкциям для наноструктур приведено в работах [21, 22]. Применяемые в работах [23—28] построения учитывают указанные факторы (что не всегда лежит на поверхности, а скрывается за требованием использования только полупростых алгебр и их решеток корней).

Трехмерное евклидово пространство E^3 само по себе образует алгебру Ли (относительно операции векторного произведения), в связи с чем вполне естественным представляется применение общих конструкций алгебраической геометрии для исследования симметрий упорядоченных подструктур. Например, в самом простом случае для описания системы точек, образующих примитивную кубическую решетку, казалось бы, достаточно Федоровской группы $Pm\bar{3}m$. Однако сама Федоровская группа определяется нулевым элементом второй группы кохомологии $H^2(P, m\bar{3}m)$, а следовательно, представляет собой конструкцию алгебраической геометрии [22].

Использование конструкций алгебраической геометрии — единственная возможность для адекватного определения наноструктур, которые принципиально не сводятся к объединению фрагментов кристаллов, а представляют собой единый комплексный объект [23]. В рамках развиваемого нами локального подхода, нанообъекты собираются из набора особых подструктур — *геометрических структурных комплексов* (ГСК) — по закону, определяемому самим таким набором. Такого рода комплексы соотносятся с топологическими характеристиками фундаментальных (в частности, проективных) многообразий, которым могут быть поставлены в соответствие определенные подмножества векторов в пространстве E^3 . Поскольку возможности построения единых сложных объектов в E^3 ограничены и только при соответствующих (для нанообъектов) допущениях можно в общих

чертах определить общий алгоритм вывода симметрично-возможных *геометрических структурных комплексов* и соотносящихся с ними кодов и таким образом определить строение того или иного неорганического простого соединения по его генотипу.

В основу теории строения "идеальных" наночастиц может быть положен принцип соответствия структуры наночастицы локально-минимальным многообразиям, вкладываемым в расслоенное пространство, определяемое, в свою очередь, выбором базиса из наборов (в частности, решеток) корней различных алгебр и топологическими свойствами расслоения. Особую роль среди таких конструкций играет уникальная 8-мерная исключительная полупростая алгебра E^8 и ее кристаллографическая решетка корней, которая отображается на себя точечной группой отражений порядка $696\,729\,600 = 2^{14} \cdot 3^5 \cdot 5^2 \cdot 7$ [24]. Если ограничиться клеточными комплексами, тогда для решения поставленной задачи достаточно использовать пространство E^8 , в котором плотнейшая упаковка сфер S^7 определяет особый набор векторов — решетку корней (векторов) алгебры E^8 . Любая подструктура пространства E^3 всегда может быть разбита на симплексы (тетраэдры), которые объединяются по целым граням в симплициальные комплексы. Поэтому в качестве алгебраических многообразий достаточно рассмотреть многообразия симплициальных комплексов, так что, если симплициальный комплекс из E^n может быть отображен на S^{n-1} , ему может быть поставлена в соответствие некоторая алгебраическая конструкция.

Наиболее общей конструкцией единого составного объекта является конструкция расслоенного пространства [20], позволяющая, в частности, задавать *геометрические структурные комплексы* в слое, а в базе расслоения — их свойства, в частности, законы сборки. Например, наноструктурам можно поставить в соответствие различные алгебраические конструкции, полученные [23, 24] с использованием расслоений Хопфа вида

$$S^7 \rightarrow S^4 \text{ (слой } S^3) \text{ или } S^3 \rightarrow S^2 \text{ (слой } S^1), \quad (1)$$

которое является главным расслоением для структурной группы $G = SU(2)$, ассоциированным расслоением группы для $G = SO(4)$ в первом случае и главным для $G = U(1)$ во втором случае.

Изучение свойств решеток и упаковок в n -мерных пространствах напрямую связано с проблемой кодирования и декодирования при передаче информации [24]. Известно, в частности, что проектирование оптимальных кодов во многих случаях эквивалентно задаче упаковки шаров. При этом определение информационной возможности различных кодов требует знания параметров наилучших упаковок шаров в пространствах больших размерностей. Рассмотрим, например, особенности порождения решетки E^8 соответствующим двоич-

ным кодом. Код [7, 4, 3] — код Хэмминга H_7 или двоичный код длины 7, который включает семь слов веса 3, семь слов веса 4, и по одному слову веса 0 и 7. Сокращенно приведенные данные записываются в виде $0^{13}7^47^1$ и означают, что $H_7 = \{(000000), 1101000, \dots (1011100), \dots (1111111)\}$, так что группа автоморфизмов $\text{Aut}(H_7)$ — группа Клейна порядка $4 \cdot 6 \cdot 7 = 168$. Расширенный код [8, 4, 4] — код Хэмминга H_8 — получается добавлением к H_7 проверки на четность. Весовой спектр кода H_8 равен $0^{14}1^48^1$, а группа автоморфизмов $\text{Aut}(H_8)$ — аффинная группа порядка $8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 4 = 1344$. С использованием алгоритма, сопоставляющего код упаковки [24], из кода Хэмминга H_7 получим $E_7 \cong \Lambda_7$ — плотнейшую решетчатую упаковку в пространстве E^7 с контактным числом $\tau = 2 \cdot 7 + 16 \cdot 7 = 126$. Аналогично, из кода Хэмминга H_8 получим $E_8 \cong \Lambda_8$ — плотнейшую решетчатую упаковку в пространстве E^8 с $\tau = 2 \cdot 8 + 16 \cdot 14 = 240$.

Таким образом, можно утверждать, что информация явно входит в структуру материи. Действительно, связь ДНК с протеином, диалектическая связь между чертежом и изделием, — это ключевое открытие XX века, оно означает, что кристаллография должна быть объединена с информатикой, теориями роста и формирования различных твердотельных систем, общим морфогенезом, включающем статику и динамику структуры в пространстве. Некоторые структуры, состоящие из атомов, содержат информацию о других структурах из атомов [10]. На рис. 2 представлены схематически шаги по переходу из пространства представлений в реальное пространство [13].

В материальной структуре правила строения написаны языком геометрии и межатомных сил и, как отмечено в работе [29]: "Мы не можем пока составить весь язык и должны использовать все наше хитро-



Рис. 2. Описание создания неорганических структур

умие, и даже тогда у нас нет полных доказательств; мы должны определить структуру как редкую, исключительную, уникальную в своей сложности".

Как показал К. Шеннон [24], любой сигнал с ограниченной полосой (а именно, когда вся энергия сосредоточена в ограниченном интервале — внутри сферы радиуса R с центром в начале координат) может быть представлен точкой в евклидовом пространстве. Различные алгоритмы, позволяющие для заданной решетки и любой точки $x \in E^n$ отыскать ближайшие в заданной точке точки решетки, подробно представлены в работе [24]. К указанной задаче примыкает задача об определении среднего значения квадрата расстояния от случайной точки до ближайшей точки решетки, поскольку она связана с построением многогранников Вороного, характеризующихся безразмерным нормализованным вторым моментом. Очевидно, что нижняя граница $G(P)$ будет соответствовать сфере. Сказанное можно проиллюстрировать на примере задач кодирования и декодирования. Дело в том, что величина $G(P)$ равна средней квадратичной ошибке на символ при использовании решеток в качестве квантизаторов (связь решеток с плотнейшими упаковками хорошо известна [24]). Поэтому, если предположить равномерное распределение значений x (а именно, положений точек или атомов в атомно-порожденной решетке) по большой области E^n , тогда среднюю квадратичную ошибку, определяемую величиной $N(x - P_i(x))$, где $P_i(x)$ — ближайшая к x точка P_j , можно минимизировать, если каждая точка P_j будет лежать в центре тяжести своего многогранника Вороного $V(P_j)$.

Поскольку такого рода системы обусловлены выбором различных базисов для корневых систем соответствующих алгебр и подрешетками решеток корней алгебр [30], соотносящимися с различными упаковками в E^n , возможно параллельное рассмотрение кодов с заданным множеством элементов — слов над конечными полями, для которых строятся аналогичные упаковки. Формально, такой подход связан с переходом от рассмотрения групп преобразований над полем \mathbf{K} характеристики нуль (например, над полем комплексных чисел) к использованию полей с характеристикой $p > 0$ (конечных) с выделением p -групп (где p — простое число) и последующим построением *геометрических структурных комплексов*. Структурные особенности таких комплексов связаны со строением указанных групп и соответствующими наборами корневых векторов (поскольку в комбинаторно-топологическом смысле, свойства многогранников определяются числом вершин), при сохранении большей части топологических свойств исходных многообразий. Таким образом, задача выделения геометрических структурных комплексов и соотносящихся с ними кодов, сводится к построению алгебраических конструкций над конечными полями. Связь p -групп с группами

многогранников можно продемонстрировать на примере групп отражений (Коксетера) с заданными генетическими кодами, соответствующими автоморфизмам (взаимоотношениям между его элементами) многогранников. Так, значениям $p = 2, 3, 5$ соответствуют группы [2, 3, p] тетраэдра, октаэдра и икосаэдра, соответственно, а для $p = 7$ данная группа бесконечна и для ее определения необходимо вводить дополнительные соотношения [31].

При рассмотрении разложимости корневой системы алгебры E_8 или ее решетки корней (отображения или вложимости подрешеток), необходимо иметь в виду, что под этим подразумевается k -разложимость или квазиразложимость групп тора (вложенных в подгруппу Бореля) для данной полупростой алгебры [30]. В указанном смысле в группу Коксетера (отражений) E_8 вкладываются подгруппы отражений (при стратификации или разбиении соответствующих пространств корневых векторов) нижеперечисленных алгебраических групп: E_i, D_j, A_k , где $i = 7, 6; j = 7, 6, 5, 4; k = 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1$. Учет квазиразложимости позволяет рассматривать группы Коксетера для других алгебраических групп ($E_6 \rightarrow F_4, D_n \rightarrow B_{n-1}, A_{2n-1} \rightarrow C_n, A_{2n} \rightarrow BC_n, E_7 \rightarrow C_3$). Некристаллографические решетки H_4, H_3 и H_2 также могут быть получены как представления, определяемые представлениями групп E_8, D_6 и A_4 соответственно [33]. Однако поскольку рассматриваются наноразмерные структуры и связь алгебраических конструкций с кодами, следует учесть, что над конечными полями всякая алгебраическая группа G становится квазиразложимой (k -разложимой) [30].

Проиллюстрируем особенности изложенного подхода примером. В соответствии с квазиразложимостью возможен такой выбор корней системы алгебры E_7 , который можно соотнести с корневой системой алгебры C_3 , представляющей собой 18 векторов, которые можно рассматривать как набор векторов, соответствующих второй координационной сфере гранцентрированной кубической решетки. В аналогичной решетке корней D_3 можно выбрать подсистему шести векторов $\{\alpha_i | i = 1, 2, \dots, 6\}$, которая также может быть получена из системы корней D_4 занулением (что эквивалентно рассмотрению преобразований, относительно которых данный вектор инвариантен или неподвижен [30]) фундаментального вектора α_4 . Система корней D_4 соотносится с системой корней H_4 , которая, в свою очередь, определяется представлениями группы E_8 . Данный подход можно проиллюстрировать следующей схемой для случая поля Галуа F_2 :

$$\begin{array}{ccccccc}
 E_8 & \rightarrow & E_7 & \rightarrow & C_3 & \rightarrow & PGL(n, q) \rightarrow PGL(n-1, q) \rightarrow PGL(2, q) \\
 \uparrow & & \uparrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 H_8 & & H_7 & & & & (q = 2, 3, 4) \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 S(2, 3, 7) & & S(3, 4, 8) & & & & \text{ГСК} \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \uparrow \\
 \text{код [7, 4, 3]} & & \text{код [8, 4, 4]} & & (2, 3, 7) & & (7_3) & & \text{конфигурация}
 \end{array} \quad , \quad (2)$$

где введены следующие обозначения: $S(2, 3, 7)$ — замкнутое подмножество из семи слов кода H_7 ; $S(3, 4, 8)$ — замкнутое подмножество из 14 слов кода H_8 , образующие t -схемы как системы Штейнера ($\lambda = 1$, блоки одного типа) [24]. Группа $GL(n, q)$ является группой линейных автоморфизмов (аффинных коллинеаций) n -мерного векторного пространства (оставляющих выделенную точку на месте) над полем F_q^n , которая однозначно определяет конечные проективные геометрии $PG(2, q)$ (где $q = 2, 3, 4$), что позволяет выделить графы и конфигурации, соответствующие геометрические структурные комплексы. С учетом размерности коммутанта для указанной группы $PGL(2, K)$ можно, например, от группы $PSL(3, 2) = L_3(2)$ перейти к подгруппе ее автоморфизмов $L_2(7) \cong L_3(2)$, с которой связана проективная конфигурация 7_3 , а также выделить 7- и 14-вершинные ГСК [23, 34, 35].

Еще один подход связан с использованием редуктивных групп, поскольку для полупростых (которые одновременно и редуктивные) и редуктивных групп, корни группы G и коммутанта (G, G) находятся во взаимно однозначном соответствии. Для полупростых групп коммутант (G, G) совпадает с G , а сама редуктивная группа G (при определенных условиях), порождается своими унипотентными подгруппами U_α ($\alpha \in \Delta$ -базе), при этом каждая такая подгруппа содержится в некоторой борелевской подгруппе. Необходимость использования редуктивных групп, действующих на многообразии, которые строятся из коммутативной части группы и множества неподвижных точек на таком многообразии, в виде произведения коммутанта (G, G) и своего центра $Z(G)$ связана с задачей выделения и описания коммутаторной части в виде алгебры с делением и замкнутой подгруппы (коммутант (G, G) является замкнутой подгруппой и позволяет построить алгебру с необходимыми свойствами). Действительно, коммутант множества (например, матриц), заданного над полем k , образует k -алгебру (коммутаторную или присоединенного типа), которая есть алгебра с делением, а также простая группа, и обладает регулярным представлением (точным и неприводимым).

Таким образом, при построении геометрических структурных комплексов и соответствующих им кодов, используются конечные расширения полей Галуа k , их соотношение с векторными и проективными пространствами и соответствующими алгебрами, а также связь присоединенных алгебр (автоморфизмов алгебры, соотносящихся с автоморфизмами групп симметрии при локальном рассмотрении) с автоморфизмами кода и, соответственно, с автоморфизмами поля k . С различными кодами связаны упаковки шаров в пространстве E^n и соответствующие им решетки корней $\Lambda(C)$, так что группа $\text{Aut}(\Lambda(C))$ содержит $2^n \text{Aut}(C)$. Действительно, группы линейных преобразований мож-

но рассматривать над произвольными полями, в частности, используются поля Галуа F_q^n , являющиеся гомоморфным образом кольца целых чисел. При этом можно получить конечные подгруппы $PGL(n, q)$ (для $q = p^n$) общей линейной группы $GL(n, K)$, которые, в свою очередь, можно представить как группы аффинных коллинеаций проективного пространства $PG(n, q)$ группы $PGL(n, q)$. Группы $PGL(n, q)$, $GL(n, q)$ являются конечными аналогами соответствующих бесконечных групп, используемых при построении кристаллографических решеток. Приведенные выше зависимости позволяют использовать различные алгебраические конструкции (группы тора, их централизаторы, редуктивные группы) и определяют связь конечных расширений полей (над которыми заданы конечные подгруппы), соответствующих геометрических структурных комплексов, а также кодов с проективными конфигурациями, которые возникают при построении расслоений, связанных с корневой системой алгебры E_8 .

Определению геометрических структурных комплексов с использованием конечных проективных геометрий $PG(2, q)$ посвящены работы [23, 34, 35]. В частности, ранее были подробно рассмотрены сборки наночастиц ZrO_2 с когерентными границами между областями с моноклинной и тетрагональной структурой, так что каждая из таких областей собирается из 7-вершинных и 8-вершинных геометрических структурных комплексов, удовлетворяющих соотношениям (2). При их выводе в качестве стартовой конструкции для расслоенного пространства можно использовать не только векторы из первой координационной сферы решетки корней E_8 , но и векторы из ее последующих координационных сфер. Сказанное относится к расслоениям различных типов для других полупростых алгебр.

Взаимодействие наночастиц, образующих большие системы и структуры — кристаллы, квазикристаллы, спирали, колеса, оболочечные частицы и т. п., — будет определяться самоорганизацией таких систем (более подробно указанные вопросы проработаны, например, Ю. Третьяковым [36]). Бакминстер Фуллер (частное сообщение) саркастически заметил, впрочем, что химики вынуждены признать существенными такие процессы, поскольку каждый раз, когда они пытаются выделить один элемент из комплекса или изолировать атомы или молекулы из соединения, отдельные части или их отдельные свойства не объясняют целого. Однако работы И. Пригожина показывают глубокую, фундаментальную основу самоорганизации, правда, до сих пор описание этих процессов носит феноменологический характер. Таким образом, главная дилемма самоорганизации наносистем состоит в определении ее причин: либо строение определяется достижением минимума свободной энергии, либо принципом максимального заполнения

пространства правильными, неправильными, непериодическими и тому подобными структурами.

Большая часть работ по выводу генетических алгоритмов образования неорганических материалов основана на оптимизации строения частиц из заданного числа атомов исходя из принципа минимизации его энергии [37], при фактическом игнорировании особенностей взаимодействия с окружением и геометрическими свойствами "вмещающего" пространства. Непоследовательность такого подхода достаточно очевидна, если обратить внимание на многообразие структур, в состав которых входят, например, элементарные координационные многогранники. Общий подход заключается в учете как геометрических свойств первообразующих "строительных" единиц в форме геометрических структурных комплексов, чьи локальные свойства могут быть записаны в виде кода, так и топологических характеристик вмещающего его пространства. Формально такой подход реализуется при использовании геодезических многообразий, являющихся решениями соответствующих гамильтоновых систем (в частности, при использовании корневых систем полупростых алгебр [38—41], что, собственно, и делается при выводе ГСК) при согласовании построений с метрикой пространства.

Хорошо известно высказывание А. Эйнштейна о том, что он не верит, что "природа играет в кости". Тем не менее, описываемые построения в рамках терминов принятых в теории игр можно рассматривать (в определенном смысле), как игры с *инвариантами* [42], по крайней мере, для систем, в которых можно определить одновременно и точно координаты образующих их элементов (атомов).

Список литературы

1. Letter from the President // IUCr Newsl. 2005. Vol. 13. N 3. P. 1.
2. Kroto H. W. Symmetry, space, stars and C_{60} // Rev. Mod. Phys. 1997. Vol. 69. N 3. P. 703—722.
3. Terrones H., Terrones M. Curved nanostructured materials // New J. Phys. 2003. Vol. 5. P. 126.1—126.37.
4. Shevchenko V. Ya., Madison A. E. Icosahedral diamond // Glass Phys. Chem. 2006. Vol. 32. N 1. P. 118—121.
5. Shevchenko V. Ya., Madison A. E., Shudegov V. E. The structural diversity of the nanoworld // Glass Phys. Chem. 2003. Vol. 29. N 6. P. 577—582.
6. Shevchenko V. Ya., Malochkin O. V., Popov V. S., Barinov S. M. Size effect in synthesis of ultrafine ytterbia-stabilized zirconia by the sol-gel method // Dokl. Phys. Chem. 1999. Vol. 365. Nos. 4—6. P. 112—115.
7. Rusanov A. I. Striking world of nanostructures // Russ. J. Gen. Chem. 2002. Vol. 72. N 4. P. 495—511.
8. Prigogine I. Time, structure and fluctuations // Science. 1978. Vol. 201. N 4358. P. 777—785.
9. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. New York: Wiley-Interscience, 1977.
10. Mackay A. L. Generalised crystallography // Izv. Jugosl. Centr. Krist. (Zagreb). 1975. Vol. 10. P. 15—36.
11. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Большая Российская энциклопедия. 2000. С. 1157.
12. Webster's new world dictionary / Ed. D. Guralnik. 1981. P. 957.
13. Mackay A. L. Generalised crystallography // J. Mol. Struct. (Theochem). 1995. Vol. 336. P. 293—303.

14. Hilbert D. Mathematische Probleme // Göttinger Nachrichten, 1900. P. 253—297.
15. Wigner E. P. The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences // Comm. Pure Appl. Math. 1960. Vol. 13. N 1. P. 1—14.
16. Kadomtsev B. B. Dynamics and information // Phys. Usp. 1994. Vol. 37. N 5. P. 425—499.
17. Cullinane S. H. Symmetry invariance in a diamond ring // Not. Amer. Math. Soc. 1979. P. A193—A194.
18. Moody R. V. Model sets: A survey // From Quasicrystals to More Complex Systems / Eds. F. Axel, F. Dénoyer, J. P. Gazeau. Berlin: EDP Sciences & Springer, 2000. P. 145—166.
19. Delone B. N., Dolbilin N. P., Shtogrin M. I., Galiulin R. V. A local criterion for regularity of a system of points // Sov. Math. Dokl. 1976. Vol. 17. N 2. P. 319—322.
20. Dubrovin B. A., Fomenko A. T., Novikov S. P. Modern Geometry. Methods and Applications. Part 2: The Geometry and Topology of Manifolds. Springer (Graduate Texts in Mathematics. Vol. 104), 1985.
21. Andersson S., Wadsley A. D. On the description of complex inorganic crystal structures // Nature (London). 1966. Vol. 211. P. 581—591.
22. Shafarevich I. R. Basic Notions of Algebra. Springer (Encyclopedia of Mathematical Sciences, Vol. 11), 3-rd ed., 2005.
23. Shevchenko V. Ya., Samoilovich M. I., Talis A. L., Madison A. E. Nanostructures with coherent boundaries and the local approach // Glass Phys. Chem. 2004. Vol. 30. N 6. P. 537—550.
24. Conway J. H., Sloane N. J. A. Sphere Packings, Lattices and Groups / Springer-Verlag, New York, 1998.
25. Kleman M. Curved crystals, defects and disorder // Adv. Phys. 1989. Vol. 38. N 6. P. 605—657.
26. Manton N. S. Connections on discrete fiber bundles // Commun. Math. Phys. 1987. Vol. 113. P. 341—351.
27. Shevchenko V. Ya., Samoilovich M. I., Talis A. L., Madison A. E. / On the structure of a Pd_{561} giant palladium cluster // Glass Phys. Chem. 2005. Vol. 31. N 2. P. 259—263.
28. Shevchenko V. Ya., Samoilovich M. I., Talis A. L., Madison A. E. On the structure of icosahedral Keplerates and their derivatives // Glass Phys. Chem. 2005. Vol. 31. N 3. P. 402—406.
29. Chaitin G. J. Randomness and mathematical proof // Sci. Amer. 1975. N 5. P. 47—52.
30. Humphreys J. E. Linear algebraic groups. Springer (Graduate Texts in Mathematics. Vol. 21), 1975.
31. Coxeter H. S. M. Self-dual configurations and regular graphs // Bull. Amer. Math. Soc. 1950. Vol. 56. P. 413—455.
32. Weyl H. The Classical groups: Their invariants and representations. Princeton Univ. Press, 1997.
33. Shcherbak O. P. Wavefront and reflection groups // Russ. Math. Surv. 1988. Vol. 43. N 3. P. 149—194.
34. Shevchenko V. Ya., Samoilovich M. I., Talis A. L., Madison A. E., Shudegov V. E. Geometrical structural complexes of ZrO_2 nanoparticles // Glass Phys. Chem. 2005. Vol. 31. N 2. P. 187—200.
35. Shevchenko V. Ya., Samoilovich M. I., Talis A. L., Madison A. E. Theory of the structure of coherent boundaries in ZrO_2 nanoparticles // Glass Phys. Chem. 2005. Vol. 31. N 4. P. 407—419.
36. Tretyakov Yu. D. Self-organization processes in the material chemistry // Russ. Chem. Rev. 2003. Vol. 72. N 8. P. 731—763.
37. Poteau R., Pastor G. M. Genetic algorithms for determining the topological structure of metallic clusters // Europ. Phys. J. D, 1990. Vol. 9. P. 235—241.
38. Daniel M., Viallet C. M. The geometrical setting of gauge theories of the Yang-Mills type // Rev. Mod. Phys. 1980. Vol. 52. P. 175—197.
39. Mosseri R., Di Vincenzo D. P., Sadoc T. F., Brodsky M. H. Polytope model and electronic and structural properties of amorphous semiconductors // Phys. Rev. B. 1985. Vol. 32. N 6. P. 3974—3986.
40. Самойлович М. И., Талис А. Л. Аппарат алгебраической геометрии (8-мерная решетка E_8 , расслоенные пространства, алгебраические особенности волновых фронтов) и алмазоподобный квазикристалл с бесконечной точечной группой // Высокые технологии в промышленности России / Материалы VIII Международной научно-технической конференции. М.: ОАО ЦНИТИ "Техномаш". 2002. С. 92—108.
41. Samoilovich M. I., Talis A. L. Nanostructures and photon crystals // Collective monograph after materials of plenary reports of the 10th International conference "High Technology In Russian Industry" (Russia, Moscow, 2004). P. 5—114
42. Blackwell D. A., Girshick M. A. Theory of games and statistical decisions. Wiley, New York, 1954.

А. О. Груздев,
Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)

СОЗДАНИЕ УЧЕБНОЙ НАНОЛАБОРАТОРИИ НА ОСНОВЕ СЗМ "NANOEDUCATOR" ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ APPLE

Описаны основные этапы работ по модернизации сканирующего зондового микроскопа "Nanoeducator" и его перевода под управление компьютером типа IMac с операционной системой MacOS X. Рассматриваются основные проблемы и методы их решения, а также перспективы развития проекта.

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется вопросу подготовки квалифицированных кадров по специальности "Нанотехнология". неотъемлемой частью такого образования является лабораторный практикум на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ), который является сложным и дорогим прибором, поэтому при использовании его в образовательном процессе возникает ряд трудностей. Во-первых, не каждое образовательное учреждение может позволить себе приобрести такое устройство. Во-вторых, процесс сканирования занимает относительно длительное время, поэтому оборудование и обслуживающего его лаборанта необходимо надолго отрывать от научно-исследовательской работы. В-третьих, все действия студентов, работающих на СЗМ, необходимо жестко контролировать, чтобы избежать поломки дорогостоящего оборудования, а такой контроль только уменьшает интерес обучаемого к предмету и, как следствие, эффективность самого обучения.

С целью решить данную проблему рядом фирм были выпущены специальные СЗМ для обучения нанотехнологии. В качестве примера можно привести СЗМ "Nanoeducator" фирмы NT-MDT [1] и сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) "Умка", разработанный в Институте нанотехнологий Международного фонда конверсии (ИНАТ МФК) [2]. Данные устройства по цене доступны даже для школы, имеют относительно простую конструкцию, но в то же время позволяют овладеть методами сканирующей зондовой микроскопии.

Учебная лаборатория Nanoeducator

СЗМ "Nanoeducator" состоит из сканирующей головки, блока электроники и управляющего компьютера Apple IMac (см. рисунок). ПК IMac пред-

ставляет собой моноблок: в одном корпусе совмещен 20-дюймовый монитор с системным блоком на базе PowerPC G5 с тактовой частотой 2 ГГц, 2 Гбайт ОЗУ, с жестким диском 232 Гбайт, DVD-RW приводом, а также с различными проводными и беспроводными интерфейсами. Форм-фактор IMac позволяет рационально использовать пространство рабочего места, что хорошо видно на рисунке. Также стоит отметить, что сканирующая головка устанавливается на специальный виброзащитный стол.

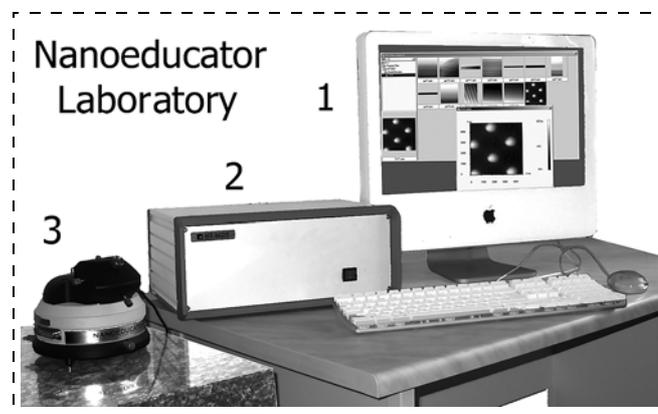
Сканирующая головка может комплектоваться цифровым микроскопом, упрощающим операцию подвода зонда, а также устройством автоматической идентификации головки. Блок электроники, микроскоп и устройство идентификации подключены к ПК по интерфейсу USB [3].

В настоящее время уже установлено несколько десятков нанообразовательных классов на базе СЗМ "Nanoeducator" в России и за рубежом. Для дальнейшего успешного развития данной системы было принято решение о разработке альтернативно управляющего ПО для платформы Apple [4], имеющей следующие преимущества:

- высокая надежность операционной системы MacOS X;
- удобный пользовательский интерфейс;
- широкие возможности интеграции с другими системами;
- распространенность в научных и образовательных кругах;
- простота настройки и эксплуатации.

Программные компоненты системы

Первой задачей было написание драйвера USB устройства для новой платформы. С помощью программы *USB Monitor* [5] был проанализирован протокол обмена устройства с *Windows*-программой и написана библиотека для MacOS X. За основу был взят интерфейс *Windows* библиотеки, а также добавлен ряд функций, ранее не доступных приложению пользователя и выполнявшихся с по-



Учебная лаборатория на базе СЗМ "Nanoeducator":
1 — компьютер Apple IMac; 2 — блок электроники СЗМ "Nanoeducator"; 3 — сканирующая головка микроскопа

мощью специального ПО. Функции библиотеки можно разделить на три группы: базовые функции микроскопа, интерфейс с внутренней файловой системой, управление цифровым осциллографом.

Данная библиотека будет использоваться в управляющей программе, основной функцией которой является управление устройством, автоматизация процесса его настройки, тестирования и подготовки к работе. Управляющая программа представляет сетевой сервер, позволяющий подключение клиентского приложения как с локальной машины, так и удаленно. Клиентское приложение предоставляет пользователю графическую оболочку управления устройством и обработкой полученных данных, причем обработка может осуществляться также серверным приложением.

Проблемы, возникающие при переводе программного обеспечения на платформу Apple

Основная проблема при написании ПО для MacOS X — это необходимость поддержки двух платформ: PowerPC от IBM и новой платформы *Intel* на основе процессора *Core Duo*. В разрабатываемой программе должно быть учтено, что данные в PowerPC представляются в прямом порядке (старший — младший), а в процессорах *Intel* — в обратном (младший — старший). Данный момент следует учитывать при обмене данными с различными системами. Например, при сохранении двоичных результатов в файл (чтении из файла) необходимо строго определить порядок хранения байтов в словах. Другим примером является работа с шиной USB. По стандарту слова данных в протоколе USB передаются по шине в обратном порядке. При работе с USB необходимо четко представлять, когда необходимо поменять порядок байтов для получения правильного результата. Например, при передаче (получении) параметров функции стандартной библиотеки работы с USB устройствами порядок байтов менять не нужно в любом случае. Если же формируется пакет с пользовательскими данными, адресованными непосредственно устройству, то порядок байтов в слове необходимо учитывать.

При работе с устройствами USB также стоит отметить ряд моментов. Основная рекомендация — необходимо подбирать высококачественные компоненты, строго соответствующие USB стандартам. Если устройство работает в *Windows*, это не означает, что оно будет работать под *Apple*. Например, дешевые цифровые камеры, использованные в микроскопах, просто не обнаруживались системой, а некоторые даже вышли из строя. Вероятнее всего проблема была в несоответствии реального энергопотребления устройства с тем, которое устройство сообщило системе при идентификации, поскольку подсвечивающий светодиод был запитан от USB хоста вместе с устройством без внесе-

ния изменений об энергопотреблении в прошивку камеры.

Кроме того, при подключении контроллера "Nanoeducator" к iMac устройство определилось неверно (один из интерфейсов не был доступен), что было обусловлено ошибкой в формировании таблицы интерфейсов устройства. После анализа кода, отвечающего за идентификацию устройства, выполненного с помощью IDA [6], было внесено исправление в программу контроллера USB блока электроники для его корректной работы с MacOS X.

Планы дальнейшего развития проекта

В дальнейшем планируется усовершенствовать блок электроники СЗМ. Во-первых, провести замену интерфейса USB на Ethernet. В таком случае клиентское приложение подключается по сети непосредственно к устройству. Данный вариант имеет следующие преимущества.

1. Нет необходимости в написании драйвера устройства и как следствие — простота подключения к различным платформам.

2. При закупке малого числа приборов заказчик может установить любое число рабочих мест, с которых будет осуществляться доступ к СЗМ, причем устройствам не нужен собственный управляющий компьютер, а пользователь работает с управляющей программой точно так же, как и при непосредственной близости устройства.

Заключение

Результатом проведенной работы явилось создание программной основы для создания наноразового класса на основе СЗМ "Nanoeducator" под управлением MacOS X. В статье описан ряд проблем, возникающих при работе с USB устройствами в данной операционной системе.

Принципы, заложенные в основу разрабатываемой системы, позволяют непосредственно интегрировать ее в дистанционное нанобучение. Платформа *Apple* благодаря таким качествам, как перспективность, мощность и надежность, широко распространена в научных и образовательных кругах во всем мире, что делает востребованным как сам прибор, под управлением MacOS X, так и услуги дистанционного образования на его базе.

Список литературы

1. http://ru.ntmdt.ru/Products/Scanning_Probe_Microscopes/product79.html
2. <http://www.nanotech.ru/cn/r/tech8.php>
3. <http://www.usb.org/home>
4. <http://www.apple.com>
5. <http://www.hhdssoftware.com/usbmon.html>
6. <http://www.datarescue.com/>

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.3.049.77

В. А. Амеличев, канд. техн. наук,
В. Д. Вернер, д-р физ.-мат. наук, **А. В. Ильков**,
А. Н. Сауров, д-р техн. наук, проф.,
НПК "Технологический центр МИЭТ", г. Москва

СОВМЕСТИМОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ С ТЕХНОЛОГИЕЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

В микросистемной технике применяют более 20 технологий микрообработки. Для массового производства основной технологией остается технология микрообработки кремния. На примере технологии формирования упругих элементов МЭМС рассмотрены пути приближения методов их изготовления к технологии КМОП интегральных микросхем. Оптимальным должно быть одновременное изготовление общих технологических слоев, на основе которых в едином производстве формируются структуры КМОП и МЭМС компонентов.

Классический пример изделия микросистемной техники (ИМСТ), например, микроэлектромеханической системы (МЭМС) содержит три элемента. До принятия стандартизированных наименований, условно обозначим их следующим образом:

- чувствительный элемент (ЧЭ), воспринимающий внешние воздействия (физические, химические, биологические) и преобразующий их в электрический или оптический сигнал;
- процессорный элемент (ПЭ), который обрабатывает и преобразует сигнал от ЧЭ по определенной программе;
- выходной элемент (ВЭ), который преобразует сигнал ПЭ в воздействие на окружающую среду (актюатор) или формализованный сигнал внешнего интерфейса.

Для создания каждого из этих элементов можно использовать различные виды микрообработки, совокупность которых составляет технологию микросистем (ТМС).

Изготовление интеллектуального ПЭ целесообразней всего осуществлять по технологии микроэлектроники, чаще всего это КМОП-технология. Поэтому согласование технологий изготовления ЧЭ и ВЭ с КМОП-технологией ПЭ является часто критерием выбора конкретных ТМС при производстве ИМСТ.

Наиболее просто проблема решается, когда все элементы микросистемы (МС) планарны и имеют единую природу функционирования, например, на базе электронных явлений. К таким МС можно отнести интегральные магниточувствительные датчики. Трудности возникают при разнородности компонентов МС, например, в МЭМС.

Далее мы будем обсуждать совместимость технологии производства МЭМС с КМОП-технологией. Из многообразия МЭМС мы ограничимся теми из них, функционирование которых связано с наличием упругих элементов. Это достаточно широкий класс изделий, включающий датчики силы, датчики давления, акселерометры, гироскопы, насосы, дозаторы, ключи, фильтры, варакторы и т. д.

Следующим этапом ограничения будет выбор формы упругого элемента. Мы ограничимся двумя элементами: консолью и мембраной. Формирование этих элементов можно осуществлять различными видами ТМС и из различных материалов. Очевидно, что наибольшей степени совместимости с КМОП можно достичь, если использовать материалы и виды микрообработки из арсенала собственно КМОП-технологии, т. е. монокристаллический кремний, поликристаллический кремний, его соединения, металлы и их соединения. Выбор кремния в качестве материала механических компонентов служит принципиальной основой такой совместимости.

Кремниевые технологии создания интегральных схем (ИС) и МЭМС часто имеют одинаковые по названию объекты и процессы, но их содержание может различаться. ИС — чисто электронные планарные конструкции. МЭМС — часто комплексные изделия, включающие помимо электронных также механические, оптические, химические и другие компоненты. Их создание и размещение требует не только планарной, но и объемной компоновки. Совершенно отличны требования к корпусированию, тестированию, эксплуатации ИС и МЭМС. По этой причине следует говорить о кремниевой технологии МЭМС как самостоятельной области микрообработки. Это отражается в специфических требованиях к подложкам, новым технологиям их двусторонней обработки, процессам высокоаспектного травления и т. д. (см. также табл. 1). Специфичность технологии МЭМС выразилась в появлении фирм, специализирующихся на создании оборудования (EVG, Süss и т. д.) или пакетов САПР (Coventor, MEMScap и т. д.) для производства МЭМС. Изготовители МЭМС разработали

Сравнение требований химико-механической полировки для МЭМС и ИС [1]

Параметр	МЭМС	ИС	Примечания
Типичная толщина пленок	1—10 мкм	<1 мкм	
Удаляемая часть	1—20 мкм	200—1000 нм	
Необходимая скорость удаления	>0,5 мкм/мин	0,2—0,5 мкм/мин	
Однородность	<5 %	<5 %	
Производительность	<10 пластин/ч	20—60 пластин/ч	
Начальная топография	1—10 мкм	Максимум 1 мкм	
Требуемая планарность	>100 нм	<50 нм	ЛОПТО: $<\lambda/10$ Для соединения пластин 0,5 нм
Шероховатость, Ra	10 нм	Несколько нм	
Ширина структур	>0,25 мкм	<0,25 мкм	
Однородность	>100 нм	<100 нм	Большой рельеф
Эрозия	>100 нм	<100 нм	Большой рельеф
Критический размер частиц	Некритично	<0,1 мкм	
Плотность частиц	Некритично	$<1/\text{см}^2$	Соединение пластин $<1 \text{ см}^2$
Металлические примеси	Некритично	$<1 \times 10^{12}/\text{см}^2$	Соединение — чистая поверхность
Диаметр подложки	100—200 мм	200—300 мм	
Материал подложки	Кремний, металл, стекло, керамика	Si III—V	
Пленки	SiO ₂ , полиSi, Si, металлы, керамики, полимеры	SiO ₂ , полиSi, Si	

целое ожерелье фирменных технологических процессов МЭМС (рис. 1).

Обычно процесс интеграции ЧЭ и ПЭ частей МЭМС характеризуют временным этапом изготовления других составляющих относительно электронной ПЭ: "до-КМОП" (for-CMOS) или "после-КМОП" (post-CMOS). В объединении двух составляющих МС существует две проблемы. Размещение их на одном кристалле имеет несомненные преимущества с точки зрения уменьшения влияния межсоединений на шумы и увеличение надежности, однако существуют аргументы против такого объединения. Это, во-первых, разные принципы взаимодействия с окружающей средой: чувствительная часть должна обязательно взаимодействовать с окружающей средой, процессорная часть должна быть максимально изолирована от ее воздействия. Во-вторых, разработка однокристалльной конструкции связана с дополнительными затратами, которые окупаются только при достаточной серийности производства и продаж. Вторая проблема косвенно связана с первой. До 90 % стоимости МС связана с ее корпусированием. И в этом случае решение проблемы, прежде всего, связано с тиражностью изделия. Специалисты фирмы STMicrosystems считают оправданной интеграцию на кристалле при тиражности 100 млн шт./год. Поэтому они так же, как фирма Texas Instruments, предпочитают использовать гибридную сборку МЭМС. В этом случае возможно независимое масштабирование ЧЭ и ПЭ составляющих МЭМС. Даже фирма ADI, которую называют адвокатом СнК МЭМС, в своей новой серии приборов iCMOS на базе БиКМОП-технологии стала использовать технологию СвК.

МЭМС с упругими элементами (датчики давления, датчики силы, акселерометры, микрофоны и т. д.) относятся к серийным изделиям, и поэтому для них вопросы интеграции являются актуальными.

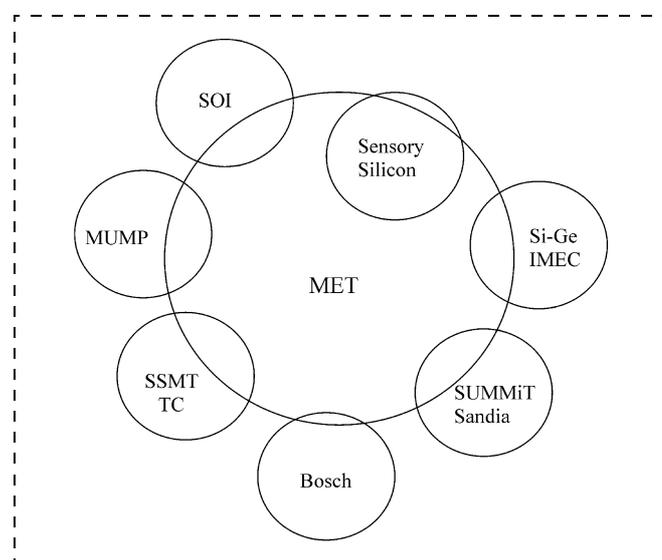


Рис. 1. Технологии МСТ на базе технологии микроэлектроники

Обычно выделяют два вида кремниевой микрообработки: объемная и поверхностная. При объемной обработке по определенной топологии с помощью травления с лицевой и обратной сторон пластины удаляются участки монокремния. В случае поверхностной обработки первоначально формируются участки так называемого опорного, или "жертвенного", слоя, поверх которого наносится слой функционального материала. После операций формообразования рабочего элемента жертвенный слой удаляется. В объемной микрообработке превалирует вариант "до-КМОП". В поверхностной обработке возможны оба варианта, но предпочтительнее является вариант "после-КМОП". Тогда изготовитель МЭМС имеет возможность заказать подложечную заготовку с ИС на микроэлектронном предприятии. Чаще всего в качестве

функционального материала при поверхностной обработке используется поликремний.

Впечатляющим примером поверхностной обработки на базе поликремния являются технологии IMEMS и SUMMIT [2, 3], в которых при использовании варианта "до-КМОП" создавались МЭМС-структуры с 3–5 рабочими слоями. Проблема совместимости технологии поликремниевого слоя МЭМС-структуры изучалась в бельгийском Межуниверситетском центре микроэлектроники (IMEC) с 1994 г. [4].

Преимущество схемы "до-КМОП" они видят в возможности использования любых режимов температурной обработки МЭМС-составляющей. Однако на подложке с встроенной МЭМС-структурой труднее формировать компоненты ИС. Одновременное создание этих структур считают практически невозможным из-за рассогласовывания технологических режимов, поэтому единственной возможностью может быть только схема "после-КМОП". Она может быть реализована различными путями. IMEC предложил решать проблему заменой полиSi на полиSiGe. При этом температуры термических процессов могут быть снижены от 800 °С (нижняя граница) до 450–520 °С. Более того, в этом случае можно перейти от планарного расположения ИС и МЭМС-структур (рядом) к объемному (ИС над МЭМС). Такая идеология была заложена в проекте SIGEM [5] (рис. 2, см. третью сторону обложки). Сложность задачи иллюстрируется тем, что несмотря на впечатляющий состав участников проекта (IMEC, Bosch, ASM, IMSE-CNM, Philips) на ее решение отводилось три года (2002–2005 гг.).

Следует отметить, что конкурирующая 3D-структура, образованная из подложек монокремния, соединенных с помощью сквозных отверстий (Бош-процесс), уже освоена в микроэлектронике. Этому способствует также разработка технологии создания сверхтонких (в том числе — гибких) кремниевых подложек [6]. Пока такие 3D-структуры можно считать экзотикой и рассматривать 2D-планарную интеграцию ИС и МЭМС как основной метод создания микросистем на кристалле (СнК) для поверхностной микрообработки по варианту "после-КМОП" для серийного производства и "до-КМОП" в опытном производстве.

В микроэлектронике поликремний обычно осаждается из газовой фазы методами LPCVD. Этот метод был перенесен и в технологию микросистем. В этом случае толщина поликремния обычно 1...5 мкм и зазор под структурой после удаления жертвенного слоя того же порядка [7]. Известно, что из-за наличия внутренних напряжений при сравнительно больших линейных размерах упругих элементов они деформируются. Консоли изгибаются и скручиваются, мембраны вздуваются (буклетирование — buckleting). При малых зазорах возможно явление технологического залипания (stiction) при попадании жидкости в зазор. Если

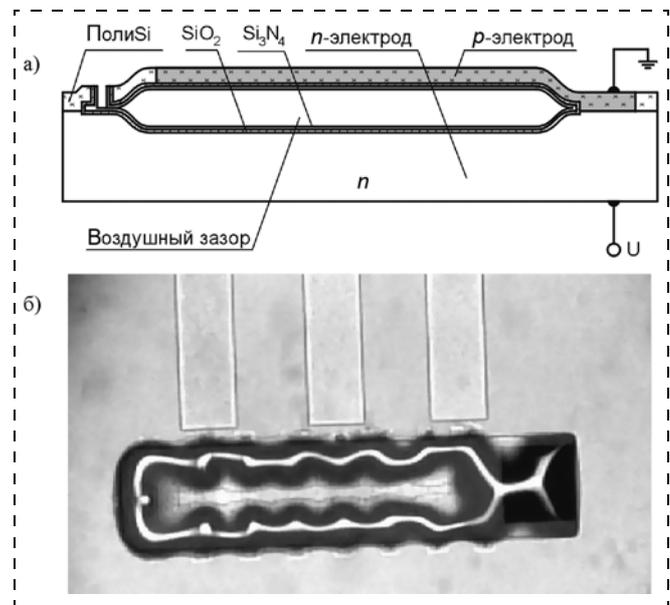


Рис. 3. Тестовая поликремниевая мембрана: а — схема разреза структуры; б — фотография деформированной мембраны

для возбуждения колебаний используется электростатический метод, то возможно конструкционное залипание (pull-in эффект) из-за потери механической устойчивости при критическом напряжении [9].

Для исследования технологических ограничений при поверхностной обработке поликремниевых мембран в НПК "Технологический центр МИЭТ" были сформированы тестовые кристаллы с мембранами длиной 200 мкм и с разной шириной (50, 75, 100 мкм) мембран. На рис. 3 представлена схема разреза экспериментальной структуры и фотография деформированной мембраны. Только часть мембраны была с гладкой или частично деформированной поверхностью ("вздутость"). Мембраны этого типа электростатически возбуждались. Результаты измерений представлены в табл. 2. Однако большая часть мембран была деформирована (буклетирование) из-за наличия внутренних напряжений. Изменение режимов осаждения поликремния и введение дополнительных слоев нитрида кремния не ликвидировали этот дефект. В то же время для диэлектрической мембраны из слоев оксида и нитрида, полученных методом объемной обработки, удается полностью устранить деформацию.

Проблема может быть решена отказом от формирования мембраны методом поверхностной об-

Таблица 2

Результаты измерения управляющего напряжения

Ширина микропровода, мкм	Критическое напряжение, В	
	При освещении	Без освещения
100	35–40	55–60
75	55–60	70–75
50	65–70	80–85

работки поликремния или переходом к другим методам формирования слоя поликремния. Такой способ был найден в форме эпитаксиального осаждения поликремния до толщин 10–20 мкм [8]. Например, так создаются слои поликремния (технология TELMA) для изделий фирмы STMicrosystems [10]. Другим способом может быть использование слоя поликремния в структуре КНИ.

Наконец, можно вообще отказаться от использования поликремния в качестве материала упругого элемента МЭМС. Исследователи из "Карнеги Меллон" университета CMU после 10 лет работ при финансировании 30 млн долл. [11, 12] предложили технологию изготовления упругого элемента на базе структуры из слоев металла (Al) и оксида кремния (SiO₂). Эти структуры были составной частью структуры ИС с тремя уровнями металлизации. Схема формирования совместной структуры представлена на рис. 4.

Ее можно использовать для конструирования различных датчиков механических величин и актюаторов. Особое значение имеет наличие трех слоев металлизации для электростатического преобразования механического перемещения в элект-

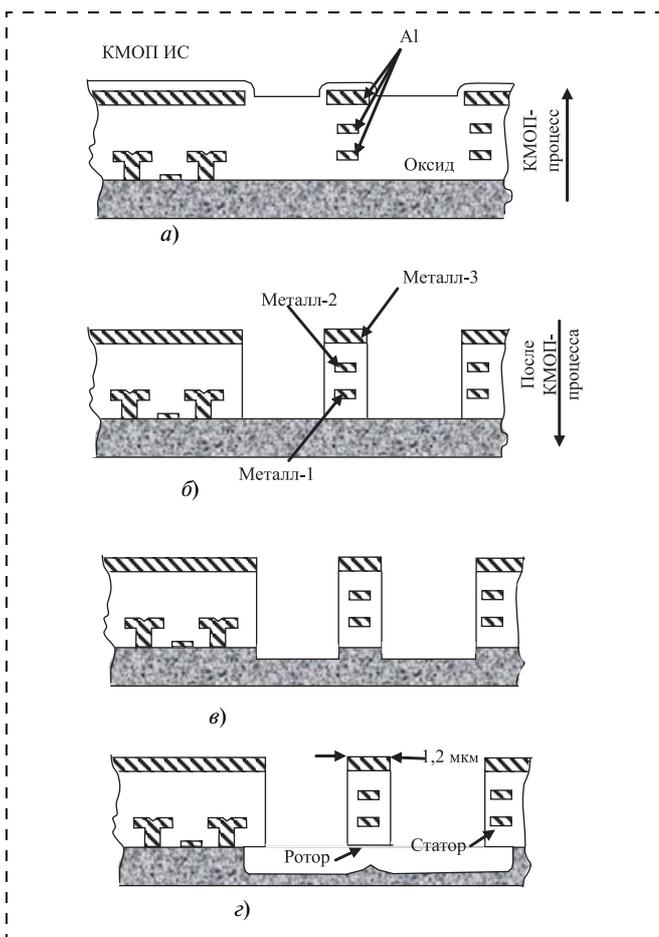


Рис. 4. Схема формирования совместной структуры:

а — схема структуры после завершения КМОП ИС процессов; *б* — анизотропное травление оксида; *в* — анизотропное травление кремния; *г* — анизотропное травление кремния для создания подвешенной структуры

рический сигнал (датчик) или наоборот (актюатор). Комбинируя включение разных слоев, можно варьировать действие преобразователя (рис. 5, см. третью сторону обложки) [13].

Фирма Acustica [14] использовала по лицензии принципы формирования структур CMU для разработки фирменной технологии Sensory Silicon™, с помощью которой изготавливаются мембраны для серийного производства микрофонов. Создается композитная мембрана с арматурной решеткой из материалов слоев ИС с заполнением полимером. Для уменьшения влияния внутренних напряжений (буклетирование) "арматура" имеет балочную структуру из меандров. Это позволило уменьшить длину звеньев "арматуры" и уменьшить вздутие мембраны [15]. Формально этот процесс относится к "после-КМОП", но он связан только с процессами "сухого" травления для создания МЭМС-структуры и не оказывает термического воздействия на структуру ИС. Поэтому возможно полное изготовление МЭМС-прибора на микроэлектронном производстве [14].

Для упругих элементов МЭМС существенное значение имеет выбор размера зазора между подвижным упругим элементом и неподвижными элементами конструкции. Малый зазор может ограничивать амплитуду смещения упругого элемента и, как отмечалось выше, способствовать появлению залипания при деформации под действием электростатических сил.

Вместе с тем, при электростатическом возбуждении колебаний увеличение межэлектродного зазора вызывает необходимость повышения разности потенциалов, что обычно нежелательно. Для сохранения размера зазора при деформации из-за внутренних напряжений приходится вводить дополнительные компенсирующие элементы конструкции.

В технологии, описанной в [14], так же как в КНИ-технологии, зазор под мембраной образуется путем травления кремниевой пластины через технологические отверстия в мембране. Таким образом, область подложки служит "жертвенным" слоем. При этом мембрана как бы подвешена над полостью в подложке, образованной ее травлением сверху.

В НПК "Технологический центр МИЭТ" формирование таких подвешенных структур на основе различных материалов проводилось при исследованиях применимости метода самоформирования (МСФ) [16], разработанного ранее для создания элементов ИС [17], в технологии МСТ [18].

Упругие компоненты МЭМС сами по себе представляют собой интегрированную композицию механического упругого элемента с электрическим элементом (пьезорезистивным, магниторезистивным, электростатическим, пьезоэлектрическим и т. д.).

Иногда такая интеграция заложена в самой природе материала, например, в пьезоэлектрике или

электрете. В этом случае необходимо просто обеспечить электрическое соединение упругого элемента с процессорным. В других случаях, например, в пьезорезистивном чувствительном элементе на (или в) теле механического элемента нужно дополнительно сформировать электрический элемент (например, мостовую схему Уитстона) и уже его включать в соединение с КМОП-схемой процессорной части МЭМС. Это формирование может осуществляться до или после процесса создания геометрии упругого элемента или непосредственно во время этого процесса. В эффективных "после-КМОП" технологиях операции создания ИС, упругого элемента, его электрической части и межсоединения между ними должны осуществляться в едином технологическом производстве, как, например, в технологиях SIGEM и Sensory Silicon™. Как уже отмечалось, интеграция элементов МЭМС и других МС на уровне СнК не всегда целесообразна по экономическим или временным соображениям. Более широкие возможности предоставляет гибридная сборка [19]. С этой точки зрения определенное значение имеет разработка в "Технологическом центре" универсальной коммутационной подложки для многокристальных микросистем (МКСМ). Она содержала два уровня поликремневой и три уровня металлической разводки к 128 контактными площадкам. В этом случае можно отдельно оптимизировать составляющие МС. Для компонентов ИС эта оптимизация идет в направлении создания полужаказных схем обработки сигнала на базе аппаратного или программного принципа индивидуализации. В частности, это можно делать на основе базовых матричных кристаллов (БМК).

С 1992 г. НПК "Технологический центр МИЭТ" ведет разработку базовых матричных кристаллов (БМК) [20]. На их основе могут быть созданы различные электронные схемы, в том числе схемы обработки сигнала. В настоящее время они выпускаются по технологии КМОП и по КНИ-технологии. Для эффективной интеграции МЭМС-составляющих существенное значение имеет наличие общих принципов формирования этих составляющих. Данная задача решается использованием в части конструкций и технологического цикла изготовления ЧЭ и ПЭ конструктивно-технологических приемов метода самоформирования. Комплексное применение приемов МСФ для создания элементов интегральных микросистем позволяет получать самосовмещенные мембраны для ЧЭ датчиков и микрофонов, микронасосов, клапанов и т. п. Таким образом, интеграция БМК с МЭМС-элементами позволит на основе метода самоформирования создать полужаказные МЭМС. Структуры механических элементов могут быть созданы на базе различных материалов и способов, обсуждаемых выше. Интеграция таких МЭМС возможна на уровне СнК или СвК. Разработка полужаказных

МЭМС позволит решить основную проблему интеграции МЭМС на кристалле — необходимость их производства в больших сериях. При этом сохраняются все преимущества твердотельной технологии. В обеспечение указанных работ:

- разработаны конструкции интегрального тензопреобразователя ускорений, микротермоанометра, чувствительного элемента датчика взрывоопасных газов, емкостного преобразователя ускорений, емкостного преобразователя давления, магниторезистивного преобразователя с четной характеристикой;
- разработаны технологические процессы формирования тензопреобразователей балочного типа, тонкопленочных элементов на диэлектрических мембранах толщиной не более 1 мкм, газочувствительного слоя на тонкой (не более 1 мкм) диэлектрической мембране с помощью кремниевого трафарета, тонкопленочных магниторезистивных структур.

Список литературы

1. **Advanced MEMS Fabrication Using CPM.** www.peter-wolters.com
2. <http://www.mdl/sandia.gov/>
3. **Мальцев П. П., Телец В. А., Никифоров А. Ю.** Интегрированные технологии микросистемной техники // Микросистемная техника. 2001. № 11. С. 22—24.
4. **Witfrouw A.** Semiconductor technology // *Electro-mechanics and Silicon Electronica magazine*. November 2004. P. 56—58.
5. **Project SiGem.** <http://www.imec.be>
6. **Вернер В. Д., Ковалев А. А., Тарасов В. А.** Выставка-2002 как зеркало мировой электроники // Изв. вузов. Сер. Электроника. 2003. № 2—3. С. 96—102.
7. **Madou M. I.** *Fundamentals of Microfabrication CRC PRESS // The Science of Miniaturization, 2nd Ed., Boca Raton, FL. 2002.*
8. **Lange P., Kirsten M., Riethmuller W., Wenk B.** Polycrystalline Silicon for Surface Micromechanical characterization. *Tranducers-95. Stockholm. 1995. P. 202—205.*
9. **Драгунов В. П.** Влияние формы упругого элемента на характеристики микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 1. С. 20—26.
10. <http://www.st.com>
11. **Parameswaran P., Balters H. P., Ristic L., Dhaded A. C., Robinson A. M.** A new approach for fabrication of micromechanical structures // *Sensor and Actuators*. 1989. V. 19. N 3. P. 289—307.
12. **Fedder G. K., Santhanam S., Reed M. L., Eagle S. C., Guilou D. F., Lu M. S.-C., Carley L. R.** Laminated High-Acceptance CMOS Process // *IEEE*. 1996. 0-7803-2985-6/96. P. 13—18
13. **Xie H., Felder G. K.** Vertical comb-finger capacitive actuation and sensing for CMOS-MEMS // *Sensor and Actuators*. 2002. A95. P. 212—221.
14. <http://www.akustica.com>
15. **Neumann Y. Y., Cabrier Yr. and Cabrier K. Y.** CMOS-MEMS membrane for audio-frequency acoustic actuation // *Sensor and Actuators*. 1995. A95. P. 175—182.
16. **Янушонис С. С.** Применение метода самоформирования для получения планарных структур // *Электронная промышленность*. 1980. Вып. 1 (85). С. 16—18.
17. **Сауров А. Н.** Метод самоформирования в микроэлектронике // Изв. вузов. Сер. Электроника. 1997. № 5. С. 41—47.
18. **Вернер В. Д., Сауров А. Н.** Метод самоформирования в технологии микросистем // Изв. вузов. Сер. Электроника. 2000. № 4—5. С. 118—123.
19. **Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А.** Синергетика миниатюризации: микроэлектроника, микросистемная техника, наноэлектроника // *Микросистемная техника*. 2004. № 7. С. 23—29
20. <http://www.tcen.ru>

П. А. Щеглов, канд. хим. наук,
Е. Е. Никишина, канд. хим. наук,
Д. В. Дробот, д-р хим. наук, проф.,
Е. Н. Лебедева, канд. хим. наук
 Московская государственная академия тонкой
 химической технологии им. М. В. Ломоносова

ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ОКСИДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлен обзор работ, направленных на создание методов получения металлических и оксидных наноматериалов на основе редких элементов (Nb, Ta, Re, Mo, W, редкоземельных элементов) с комплексом управляемых свойств. Основная идея состоит в получении порошков термическим разложением фаз прекурсора (моно- и полиметаллических оксогидроксо- или оксоалкоксосоединений). Предлагаемая технология позволяет получать наноразмерные порошки тугоплавких металлов и сплавов, оксидов, сложнооксидных фаз и их твердых растворов, перспективных для использования в нано- и микротехнике.

Введение

Рынок нанотехнологий и наноматериалов — динамично развивающийся и перспективный сектор мировой экономики, годовой объем которого к 2015 г. по оценкам превысит один триллион долларов. Ожидаемые достижения в области нанотехнологий приведут к стремительному росту спроса на соответствующие материалы. Согласно прогнозу американской бизнес-аналитической компании *Freedonia Group Inc.* (www.freedoniagroup.com), мировой спрос на наноматериалы в денежном выражении в 2008 г. составит 3,7 млрд долл., а к 2020 г. достигнет 90 млрд долл. Значительная доля текущего потребления наноматериалов приходится на электронную и оптическую отрасли. Так, по данным аналитического отчета, представленного в 2004 г. исследовательской компанией *Аберкейд Консалтинг* (*Abercade Consulting*, www.abercade.ru), потребление в этих отраслях составляет 41 % от валового мирового объема производства нанопорошковых материалов. Важным фактором, определяющим развитие нанотехнологий в компьютерной, электронной и оптоэлектронной технике, является создание новых технологий получения известных и перспективных материалов.

Металлические и оксидные материалы, обладающие особыми электрофизическими, электрооптическими, электромеханическими, магнитными и другими свойствами, составляют существенную часть материальной базы в указанных отраслях и привлекают пристальное внимание научных исследователей и промышленников. В частности, лидирующие на рынке американские компании, обладающие производственными мощностями для

получения нанопорошков партиями объемом до нескольких тонн и более (среди них *Nanophase Technologies Corp.*, *Nanostructured & Amorphous Materials Inc.*, *Altair Nanotechnologies Inc.*, *NanoGram Corp.*, *Nanomat Inc.*, *NanoProduct Corp.* и др.), ведут научно-исследовательские работы и имеют реализованные технологические разработки в области получения металлических и оксидных материалов на основе редких элементов, в том числе сложного состава. Получение наноматериалов сложного состава (сплавов, лигатур, сложных оксидов и т. д.), содержащих несколько элементов, осложнено тем, что помимо контроля гранулометрического состава порошков необходимо обеспечить заданный химический и фазовый состав при высокой степени их однородности, от которых существенно зависят функциональные свойства материалов.

Данная статья посвящена результатам работ, направленных на создание методов получения металлических и оксидных материалов на основе редких элементов, в том числе ниобия, тантала, рения, молибдена, вольфрама, редкоземельных элементов (РЗЭ) с комплексом управляемых свойств.

Основная идея разрабатываемого подхода состоит в получении металлических и оксидных порошков методом термического разложения в контролируемой атмосфере прекурсорных (т. е. исходных) систем, включающего в себя:

- управляемый синтез прекурсоров;
- их термодеструкцию в инертной, окислительной или восстановительной атмосфере;
- зарождение и рост кристаллических наночастиц новых (целевых) фаз.

Реализация и развитие этого метода получения материалов невозможны без анализа химических и структурных особенностей прекурсорных систем.

Основы химии прекурсоров

Ключевым принципом является то, что исходная система, используемая для получения материалов сложного состава, должна содержать несколько металлов в необходимом отношении. В результате целенаправленного поиска нами предложены два типа прекурсорных систем, способных удовлетворить данному требованию: оксогидроксо- и оксоалкоксосоединения металлов [1, 2]. Состав прекурсоров приведен в таблице и на рис. 1.

Основные физико-химические свойства предлагаемых систем состоят в способности связывать между собой различные металлы с помощью оксо-, гидроксо- или алкоксогрупп, что иллюстрирует пример структуры гетерометаллического соединения рения, ниобия и тантала, представленный на рис. 2. Эта способность позволяет получать гетерометаллические фазы как в случае изоморфного замещения близких по свойствам металлов, так и в случае значительных различий в их свойствах. Для оксогидроксосоединений (маловодных гидроксидов) ниобия и тантала дополнительная возможность образования гетерометаллических систем

Примеры получения металлических и оксидных материалов

Прекурсоры	Условия термообработки	Продукты
$\text{Re}_4\text{O}_{6-y}(\text{OCH})_{12+y}$, $\text{Re}_4\text{O}_6(\text{OC}_3\text{H}_7^{\text{изо}})_{10}$	150–400 °С, нагрев 10 °С/мин, на воздухе	Кубический ReO_3
$\text{Re}_4\text{O}_{6-y}(\text{OCH}_3)_{12+y}$	120–400 °С, 0,5–1 ч, в вакууме	Моноклинный ReO_2
$\text{ReMoO}_2(\text{OCH}_3)_7$	400 °С, 1 ч, в водороде	Сплав Re-Mo (σ -фаза)
$\text{Re}_{3,90}\text{Mo}_{0,10}\text{O}_6(\text{OCH}_3)_{12}$	500 °С, 1 ч, в аргоне	Ромбический твердый раствор $(\text{Re},\text{Mo})\text{O}_2$
$\text{Re}_{3,90}\text{Mo}_{0,10}\text{O}_6(\text{OCH}_3)_{12}$	500 °С, 1 ч, в водороде	Сплав Re-Mo (твердый раствор на основе рения со структурой ГПУ)
$\text{Re}_{1,18}\text{Mo}_{2,82}\text{O}_6(\text{OCH}_3)_{12}$	500 °С, 1 ч, в водороде	Сплав Re-Mo (твердый раствор на основе молибдена со структурой ОЦК)
$\text{Re}_{4-x}\text{W}_x\text{O}_{6-y}(\text{OCH}_3)_{12+y}$	200–240 °С, 0,5–1 ч, на воздухе	Фаза $(\text{Re},\text{W})\text{O}_3$ со структурой типа ReO_3
$\text{Nb}_4\text{O}_2(\text{OCH}_3)_{14}(\text{ReO}_4)_2$, $\text{Ta}_4\text{O}_2(\text{OCH}_3)_{14}(\text{ReO}_4)_2$	900 °С, нагрев 10 °С/мин, в азоте	Фазы $\text{Re}_2\text{M}_4\text{O}_{12 \pm \delta}$ ($\text{M} = \text{Nb}$ или Ta) со структурой $L\text{-Ta}_2\text{O}_5$
$\text{Nb}_{4-x}\text{Ta}_x\text{O}_2(\text{OCH}_3)_{14}(\text{ReO}_4)_2$	160–170 °С, 3,6–8,3 ч, в вакууме	Фаза $\text{Re}_2(\text{Nb}_{4-x}\text{Ta}_x)\text{O}_{12 \pm \delta}$ со структурой $L\text{-Ta}_2\text{O}_5$
$\text{Nb}_2(\text{OCH}_3)_8(\text{ReO}_4)_2$	900 °С, нагрев 10 °С/мин, в азоте	Фаза $\text{Re}_2\text{Nb}_2\text{O}_{12+\delta}$ со структурой $L\text{-Ta}_2\text{O}_5$
Продукт сорбции Mg^{2+} на $\text{NbO}_{0,5-2,0}(\text{OH})_{1-4} \cdot z\text{H}_2\text{O}$	900 °С, 3 ч, на воздухе	MgNb_2O_6
Продукт сорбции Mg^{2+} и Pb^{2+} на $\text{NbO}_{0,5-2,0}(\text{OH})_{1-4} \cdot z\text{H}_2\text{O}$	800–850 °С, 3 ч, на воздухе	$\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$
Продукты сорбции Nd^{3+} или Sm^{3+} на $\text{NbO}_{0,5-2,0}(\text{OH})_{1-4} \cdot z\text{H}_2\text{O}$	850–900 °С, 3–4 ч, на воздухе	$\text{MNb}_5\text{O}_{14}$ ($\text{M} = \text{Nd}$ или Sm)
Продукт сорбции Eu^{3+} на $\text{NbO}_{0,5-2,0}(\text{OH})_{1-4} \cdot z\text{H}_2\text{O}$	850–900 °С, 4–5 ч, на воздухе	$\text{EuTa}_7\text{O}_{19}$
Продукты сорбции Eu^{3+} или Yb^{3+} на $(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_{0,5-2,0}(\text{OH})_{1-4} \cdot z\text{H}_2\text{O}$	900 °С, 2 ч, на воздухе	$\text{M}(\text{Nb},\text{Ta})_5\text{O}_{14}$ ($\text{M} = \text{Eu}$ или Yb) $\text{M}(\text{Nb},\text{Ta})_7\text{O}_{19}$ ($\text{M} = \text{Eu}$ или Yb)

Примечание: ГПУ — гексагональная плотноупакованная (структура); ОЦК — объемноцентрированная кубическая (структура).

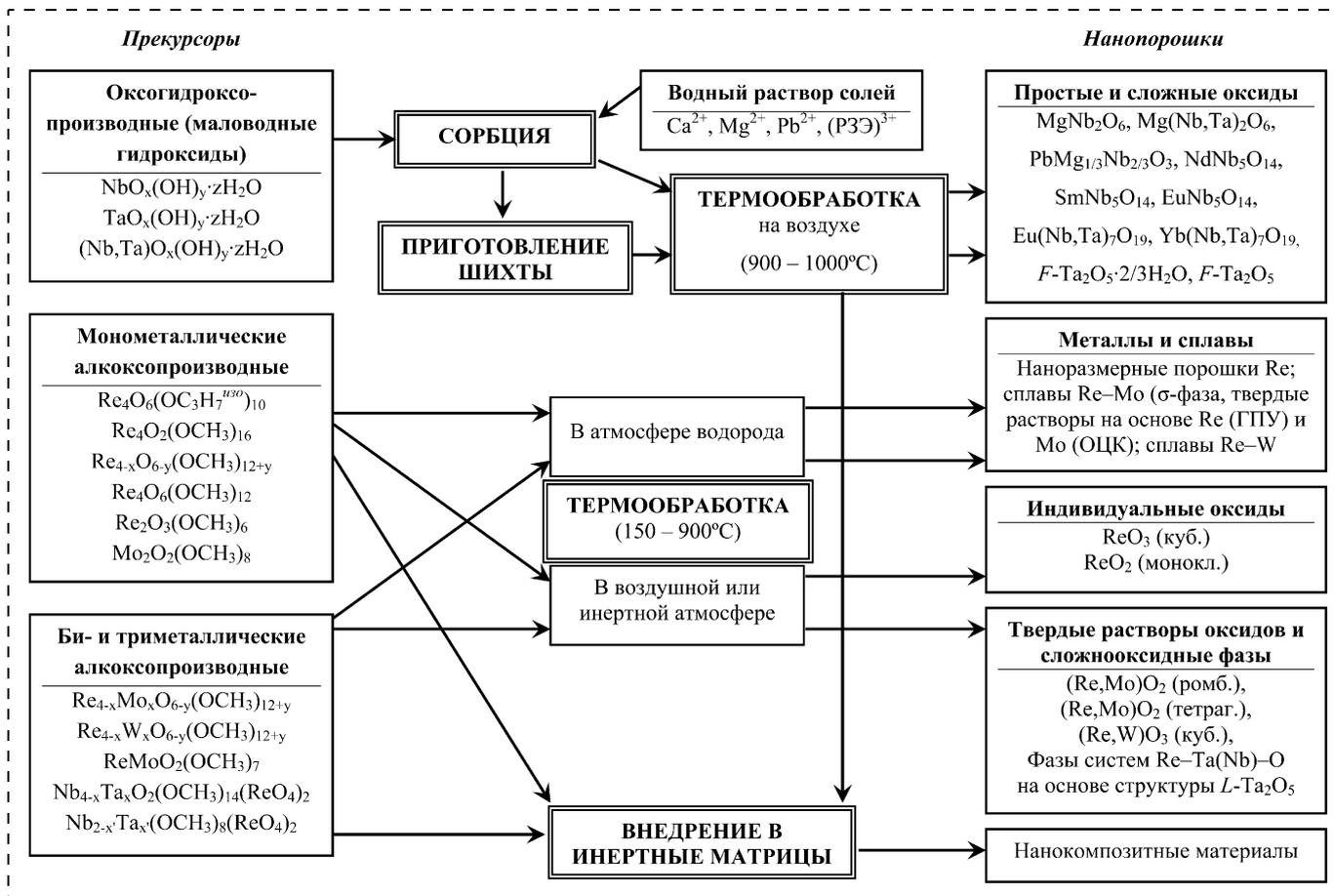


Рис. 1. Схема получения материалов с использованием оксоалкокси- и оксигидроксо соединений редких металлов

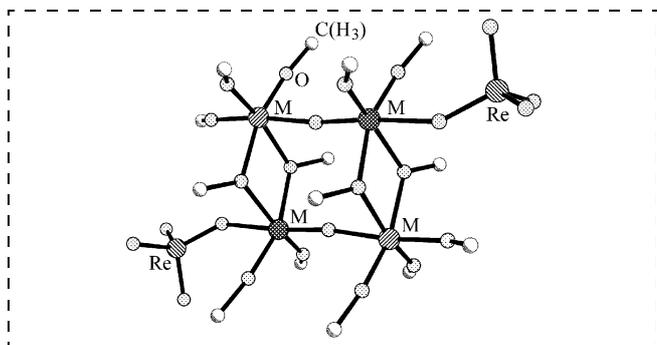


Рис. 2. Структура оксоалкоксопроизводного рения $Nb_{4-x}Ta_xO_2(OCH_3)_{14}(ReO_4)_2$ ($M = Nb, Ta$)

состоит в их сорбционных свойствах по отношению к катионам металлов II–IV групп.

Методы синтеза прекурсоров

Нами разработаны следующие методы получения прекурсорных систем:

- электрохимический метод получения оксоалкоксопроизводных металлов, заключающийся в анодном растворении металлов в спиртах [1, 3–5];
- метод получения оксоалкоксопроизводных металлов взаимодействием оксида рения (VII) с алкоксопроизводными других металлов [1, 5–9];
- гетерофазный метод получения маловодных гидроксидов металлов, основанный на взаимодействии твердых хлоридов с концентрированным водным раствором аммиака [2, 10, 11].

Главные преимущества этих методов, в отличие от традиционных процессов получения соединений рассматриваемого класса, состоят в технологической гибкости, снижении трудоемкости и числа стадий, возможности синтеза гетерометаллических систем заданного состава.

Термическое разложение прекурсоров

Исследование термических свойств оксоалкоксопроизводных показало, что разложение алкоксосоединений, протекающее при относительно низкой температуре (100–300 °С), в зависимости от условий процесса ведет к образованию оксидных или металлических фаз (см. рис. 1 и таблицу).

При разложении индивидуальных и гетерометаллических оксоалкоксопроизводных на воздухе или в инертной атмосфере образуются индивидуальные оксиды, их твердые растворы, сложнооксидные фазы в виде высокодисперсных порошков со средним размером частиц менее 30 нм. Разложение оксоалкоксопроизводных в атмосфере водорода позволяет получать наноразмерные порошки металлов или соответствующих сплавов [1, 4, 6, 9, 12, 13].

Термообработка на воздухе при 800–1000 °С оксогидроксосоединений (маловодных гидроксидов) металлов, их смесей и продуктов сорбции катионов металлов II–IV групп приводит к образованию индивидуальных оксидов, сложных оксидов и их твердых растворов [2, 10, 14–17].

Варьирование условий термообработки дает возможность управлять микроструктурой синтезированных продуктов и получать образцы с размером частиц от нескольких нанометров до нескольких микрометров. Внедрением прекурсоров в инертную матрицу получены нанокompозитные материалы, в которых размер наночастиц определен свойствами матрицы [18].

Таким образом, предлагаемые методы позволяют получать наноразмерные порошки тугоплавких металлов (Re, Mo, W) и их сплавов, оксидов и их твердых растворов с особыми электрофизическими свойствами ReO_3 , ReO_2 , $(Re, Mo)O_2$, обладающих металлическим типом проводимости, диэлектрических материалов Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , $(Nb, Ta)_2O_5$, сегнетоэлектрических фаз магнониобата свинца $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$, ниобата магния $MgNb_2O_6$, твердых растворов ниобата-танталата магния $Mg(Nb, Ta)_2O_6$, сложнооксидных фаз на основе ниобатов и танталатов редкоземельных металлов $NdNb_5O_{14}$, $SmNb_5O_{14}$, $EuNb_5O_{14}$, $Eu(Nb, Ta)_7O_{19}$, $Yb(Nb, Ta)_7O_{19}$, обладающих особыми люминесцентными и электрооптическими свойствами и других материалов, перспективных для использования в нано- и микротехнике.

Заключение

Процессы термического разложения оксогидроксо- и оксоалкоксосоединений металлов составляют основу получения материалов на основе редких металлов и дают возможность получать материалы с воспроизводимым комплексом заданных свойств. Основные особенности этих процессов состоят в следующем.

- ♦ Относительно низкая температура разложения указанных соединений позволяет получать тонкодисперсные (в том числе с размером частиц в несколько нанометров) оксидные и металлические фазы. Это открывает новые возможности применения материалов в сравнении с поликристаллическими образцами с размером зерен более 200 нм, полученными традиционным твердофазным методом.
- ♦ В случае би- и триметаллических систем применение описанной технологии позволяет достигнуть сохранения заданного состава (соотношения металлов) и высокой степени однородности на протяжении всего технологического процесса. Разложение гетерометаллических прекурсоров с составом, переменным в широком диапазоне соотношения металлов, позволяет получать материалы заранее заданного состава, а следовательно, обладающих требуемыми функциональными свойствами.
- ♦ Низкая температура разложения алкоксопроизводных в сочетании с высокой степенью их химической однородности позволяет существенно снизить температуру и продолжительность получения оксидных и металлических материалов. В частности, данный подход существенно снижает энергоемкость отдельных стадий синтеза сплавов на основе тугоплавких металлов по сравнению с традиционными методами. Однофазные образцы сплавов на основе рения

удаётся получить при температуре, которая более чем на 2000 °С ниже температуры плавления рения. Температура получения сложнооксидных фаз на основе ниобатов и танталатов снижается на 200—500 °С по сравнению с традиционными методами.

Работа проведена при поддержке РФФИ (проекты № 03-03-32750, 06-03-32444).

Список литературы

1. Шеглов П. А., Дробот Д. В. Алкоксипроизводные рения // Известия Академии наук. Сер. Химическая. 2005. № 10. С. 2177—2188.
2. Никишина Е. Е., Лебедева Е. Н., Дробот Д. В., Коровин С. С. Маловодные гидроксиды ниобия и тантала как прекурсоры для синтеза сложных оксидов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2000. № 3. С. 28—31.
3. Shcheglov P. A., Seisenbaeva G. A., Drobot D. V., Kessler V. G. The electrochemical synthesis and X-ray single crystal study of $\text{Re}_4\text{O}_6(\text{O}^i\text{Pr})_{10}$ — a new Rhenium(V, VI) cluster with an unprecedented arrangement of metal—metal bonds // Inorganic Chemistry Communications. 2001. Vol. 4, N 5. P. 227—229.
4. Шеглов П. А., Дробот Д. В., Сыров Ю. В., Мальцева А. С. Алкоксотехнология оксидных и металлических материалов на основе рения и молибдена // Неорганические материалы. 2004. Т. 40. № 2. С. 220—227.
5. Seisenbaeva G. A., Shevelkov A. V., Tegenfeldt J., Kloo L., Drobot D. V., Kessler V. G. Homo- and hetero-metallic rhenium oxomethoxide complexes with a $\text{M}_4(\mu\text{-O})_2(\mu\text{-OMe})_4$ planar core — a new family of metal alkoxides displaying a peculiar structural disorder. Preparation and X-ray single crystal study // J. of the Chemical Society. Dalton Transactions. 2001. N 19. P. P. 2762—2768.
6. Shcheglov P. A., Drobot D. V., Seisenbaeva G. A., Gohil S., Kessler V. G. Alkoxide route to mixed oxides of rhenium, niobium, and tantalum. Preparation and X-ray single-crystal study of a novel rhenium—niobium methoxo complex, $\text{Nb}_2(\text{OMe})_8(\text{ReO}_4)_2$ // Chemistry of Materials. 2002. Vol. 14. N 5. P. 2378—2383.
7. Shcheglov P. A., Seisenbaeva G. A., Gohil S., Drobot D. V., Kessler V. G. Preparation of trimetallic alkoxide complexes exploiting the isomorphous substitution approach. Synthesis, X-ray single

crystal and mass-spectrometric study of $\text{NbTa}(\text{OMe})_8(\text{ReO}_4)_2$ and $\text{Nb}_2\text{Ta}_2\text{O}_2(\text{OMe})_{14}(\text{ReO}_4)_2$ // Polyhedron. 2002. Vol. 21. N 22. P. 2317—2322.

8. Шеглов П. А., Дробот Д. В., Сейсенбаева Г. А., Кесслер В. Г. Способ получения оксометилатных комплексов рения, ниобия и/или тантала. Патент РФ № 2227788. Приоритет от 21.05.2002.

9. Шеглов П. А. Моно-, би- и триметаллические оксоалкоксипроизводные рения (синтез, свойства и применение): Дис. канд. хим. наук. М., МИТХТ. 2002. 198 с. (с прил.).

10. Никишина Е. Е. Управляемый синтез новых модификаций пентаоксидов Nb (Ta), бинарных и тройных оксидных фаз с использованием маловодных гидроксидов Nb (Ta) в качестве прекурсоров: Дис. канд. хим. наук. М., МИТХТ. 2004. 149 с. (с прил.).

11. Дробот Д. В., Лебедева Е. Н., Коровин С. С., Никишина Е. Е. Способ получения гидроксида ниобия. Патент РФ № 2155160. Приоритет от 17.06.1999.

12. Дробот Д. В., Шеглов П. А., Сейсенбаева Г. А., Кесслер В. Г. Оксоалкоксосокомплексы рения — прекурсоры для получения неорганических материалов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2002. № 6. С. 32—37.

13. Сейсенбаева Г. А., Дробот Д. В., Кесслер В. Г. Способ получения высокодисперсного порошка сплава рения и молибдена. Патент РФ № 2113528. Приоритет от 09.11.1995.

14. Дробот Д. В., Никишина Е. Е., Лебедева Е. Н. Способ получения порошка оксидного состава — $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)$. Патент РФ № 2223225. Приоритет от 25.06.2002.

15. Никишина Е. Е., Дробот Д. В., Филоненко В. П., Зибров И. П., Лебедева Е. Н. Особенности кристаллизации аморфного пентаоксида тантала при атмосферном и высоком давлениях // Ж. неорганической химии. 2002. Т. 47, № 1. С. 14—17.

16. Филоненко В. П., Зибров И. П., Дробот Д. В., Никишина Е. Е. Структура гидрата высокого давления $\text{Ta}_2\text{O}_5 \cdot 2/3\text{H}_2\text{O}$ и производного от него метастабильного оксида Ta_2O_5 // Ж. неорганической химии. 2003. Т. 48, № 4. С. 543—550.

17. Дробот Д. В., Лебедева Е. Н., Никишина Е. Е. Способ получения гептатанталата европия. Заявка на патент РФ № 2005141183 от 29.12.2005.

18. Kustov A. L., Kessler V. G., Romanovsky B. V., Seisenbaeva G. A., Drobot D. V., Shcheglov P. A. Supported Re and Mo oxides prepared using binuclear precursors: synthesis and characterization // Journal of Molecular Catalysis: A. 2004. V. 216, N 1. P. 101—106.

УДК 537.226.33

С. В. Павлов, канд. физ.-мат. наук,
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ПРИМЕСЕЙ И ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ПРОФИЛЬ ТОНКОЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ

На основе модели Ландау—Каганова—Омельянчука проведены теоретические исследования влияния внешних электрических полей, примесей и электромеханического взаимодействия с материалом подложки на поляризационный профиль тонкой сегнетоэлектрической пленки. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными исследований поляризационного профиля в тонких пленках цирконата-титаната свинца (ЦТС) с примесью PbO. Обсуждается физический смысл отрицательной экстраполяционной длины.

Теория фазовых переходов все чаще обращается к модельным объектам, учитывающим, по возможности, больше свойств реальных материалов, исследуемых экспериментально.

На свойства реальных объектов, влияет в частности, наличие примесей, облучения, различного рода дефектов и дислокаций, двойникования, а также конечные размеры исследуемого образца. Это относится также и к тонким пленкам сегнетоэлектриков.

Развитие феноменологической теории фазовых переходов в тонких пленках впервые проведено в работе Каганова и Омельянчука [1]. В этой работе обоснована формула поверхностной энергии, а также исследована зависимость температуры фазового перехода от толщины пленки для предельных случаев на примере фазового перехода второго рода в ферромагнитной пластине.

Свободная энергия тонкой пленки представляется в виде функционала F с двумя слагаемыми:

$$F = \Phi_{об} + \Phi_{пов},$$

где $\Phi_{об}$ — объемная часть свободной энергии тон-

кой пленки; а $\Phi_{\text{пов}}$ — вклад поверхностной энергии в свободную энергию. Объемная энергия для фазового перехода первого рода имеет вид:

$$\Phi_{\text{об}} = \int_{-l/2}^{l/2} \left\{ \frac{\alpha}{2} P^2 + \frac{\beta}{4} P^4 + \frac{\gamma}{6} P^6 + \frac{\kappa}{2} \left(\frac{dP}{dz} \right)^2 - EP \right\} dz, \quad (1)$$

где P — спонтанная поляризация тонкой пленки; $\alpha, \beta, \gamma, \kappa$ — феноменологические коэффициенты, причем $\alpha = \alpha'(T - T_C)$, $\alpha' > 0$, $\kappa > 0$ и $\gamma > 0$, $\beta < 0$, T_C — температура Кюри; E — деполяризующее и внешнее поля; коэффициент κ определяет степень неоднородности спонтанной поляризации в тонкой пленке; l — толщина тонкой пленки; ось z перпендикулярна к поверхностям. В первом приближении считаем значение деполяризующего поля однородным по всей тонкой пленке.

Поверхностная энергия в общей форме

$$\Phi_{\text{пов}} = \Psi_1 + \Psi_2,$$

где Ψ_1 и Ψ_2 — вклады каждой из границ пленки в поверхностную энергию.

Минимизация функционала (1) приводит к краевой задаче:

$$\begin{cases} \frac{d^2 P}{dz^2} = (\alpha P + \beta P^3 + \gamma P^5 - E) \frac{1}{\kappa}, \\ \kappa \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \Big|_{z=+l/2} + \frac{d\Psi_1}{dP} \Big|_{+l/2} = 0, \\ \kappa \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \Big|_{z=-l/2} - \frac{d\Psi_2}{dP} \Big|_{-l/2} = 0, \end{cases}$$

где $P_{+l/2}$ и $P_{-l/2}$ — значения спонтанной поляризации на границах пленки. Если предположить, что тонкая пленка симметрична и имеет свободные поверхности, то вклад в свободную энергию каждой из поверхностей одинаков:

$$\Psi_1 = \Psi_2 = \Psi = \kappa \delta^{-1} P_{\pm l/2}^2, \quad (2)$$

здесь δ — экстраполяционная длина [1].

Для $\Psi_{1,2}$ определяемой формулой (2), граничные условия будут выглядеть так:

$$\frac{dP}{dz} \Big|_{\pm l/2} + \delta^{-1} P_{\pm} = 0.$$

Краевая задача для тонкой пленки:

$$\begin{cases} \frac{d^2 P}{dz^2} = (\alpha P + \beta P^3 + \gamma P^5 - E) \frac{1}{\kappa}, \\ \frac{dP}{dz} \Big|_{\pm l/2} + \delta^{-1} P_{\pm l/2} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Решение задачи (3) численными методами определяет поляризационные профили тонкой пленки. На рис. 1 приведены кривые поляризационного профиля для разных значений экстраполяционной длины.

Однако учет того, что пленка покоится на подложке, приводит к неодинаковому вкладу поверхностей пленки в поверхностную энергию. При соприкосновении с материалом подложки на поверхности пленки могут возникать дополнительные электрические поля, а также механические напряжения.

В работах [2, 3] получено семейство кривых поляризационного профиля для тонких пленок ЦТС с примесью РbО при приложении различных электрических полей и было обнаружено, что при смене знака электрического поля происходит инвертирование поляризационного профиля (рис. 2). Следует заметить, что компьютерная обработка сигнала в работе [2] проводилась в предположении, что поляризация обращается в нуль на границах пленки, хотя реально это могло быть не так.

Теоретически полученные в работах [2, 3] экспериментальные результаты можно обосновать следующим образом. Предположим, что одна из поверхностей пленки свободна, а вторая испытывает влияние подложки, тогда вклад свободной и несвободной поверхностей пленки в поверхностную энергию будет неодинаков. Влияние примеси в модели учитывалось дополнительным членом μP^2 , содержащим химический потенциал примеси μ . Тогда с учетом электрострикционного эффекта

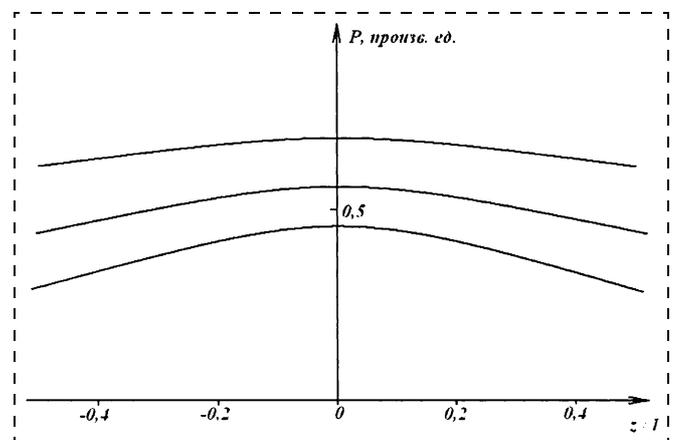


Рис. 1. Поляризационные профили в тонкой сегнетоэлектрической пленке, полученные из модели (2)

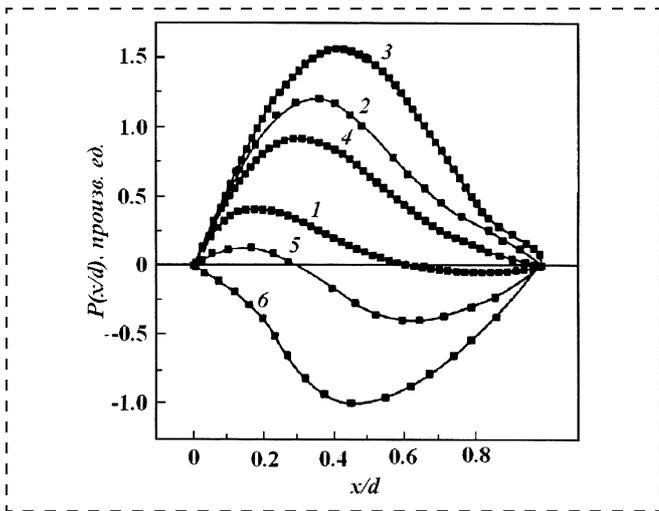


Рис. 2. Профили распределения поляризации по толщине пленки ЦТС, полученные в результате приложения к пленке постоянного электрического поля [2]: 1 — 0 В; 2 — 8 В; 3 — 15 В; 4 — после отжига в течение 24 ч; 5 — (-8 В); 6 — (-15 В)

и внешнего поля как внутри, так и на границах пленки получаем

$$\Psi_1 = \kappa \delta^{-1} P_{+\frac{1}{2}}^2 - a_+ E_{+\frac{1}{2}} P - \mu P_{+\frac{1}{2}}^2;$$

$$\Psi_2 = \kappa \delta^{-1} P_{-\frac{1}{2}}^2 - a_- E_{-\frac{1}{2}} P_{-\frac{1}{2}} - \mu P_{-\frac{1}{2}}^2 - Q\varepsilon P_{-\frac{1}{2}}^2;$$

$$\Phi_{\text{об}} = \int_{-l/2}^{l/2} \left\{ \frac{\alpha}{2} P^2 + \frac{\beta}{4} P^4 + \frac{\gamma}{6} P^6 + \frac{\kappa}{2} \left(\frac{dP}{dz} \right)^2 - EP - \mu P^2 - Q\varepsilon P^2 \right\} dz,$$

где Ψ_1 — вклад от свободной поверхности пленки; Q — электрострикционный коэффициент; ε — деформации поверхности; μ — химический потенциал примеси; $E_{+\frac{1}{2}}$ и $E_{-\frac{1}{2}}$ — значения напряженностей электрического поля на границах тонкой пленки;

a_+ и a_- — феноменологические коэффициенты, имеющие физический смысл диэлектрических восприимчивостей на границах пленки.

Граничные условия будут иметь вид:

$$\left. \frac{dP}{dz} \right|_{-\frac{l}{2}} + \delta_1^{-1} P_{-\frac{l}{2}} = a_- E_{-\frac{l}{2}};$$

$$\left. \frac{dP}{dz} \right|_{+\frac{l}{2}} - \delta_1^{-1} P_{+\frac{l}{2}} = a_+ E_{+\frac{l}{2}},$$

где $\delta_1^{-1} = \delta^{-1} - \mu - Q\varepsilon$ — перенормированная обратная величина экстраполяционной длины. Таким образом, учет электрострикционного эффекта, а также влияния примеси приводит к измене-

нию экстраполяционной длины. Кроме того, δ_1^{-1} зависит от деформации поверхности, а деформация может зависеть от температуры. Следовательно, нельзя исключить, что δ_1^{-1} зависит от температуры, а при $\delta^{-1} > \mu + Q\varepsilon$ может стать отрицательной величиной.

Нелинейное дифференциальное уравнение с неоднородными граничными условиями записывается так:

$$\begin{cases} \frac{d^2 P}{dz^2} = (\alpha_1 P + \beta P^3 + \gamma P^5 - E) \frac{1}{\kappa}, \\ \left. \frac{dP}{dz} \right|_{-\frac{l}{2}} + \delta_1^{-1} P_{-\frac{l}{2}} = a_- E_{-\frac{l}{2}}, \\ \left. \frac{dP}{dz} \right|_{+\frac{l}{2}} - \delta_1^{-1} P_{+\frac{l}{2}} = a_+ E_{+\frac{l}{2}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\alpha_1 = \alpha - \mu - Q\varepsilon$.

При расчетах краевой задачи (4) за исходные параметры брались значения феноменологических коэффициентов, а также экстраполяционной длины, известные из эксперимента для PbTiO_3 : $\delta = 3 \text{ нм} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ см}$, $\alpha' = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ ед. СГСЭ}$, $\beta = -2 \cdot 10^{-12} \text{ ед. СГСЭ}$, $\gamma = 5,8 \cdot 10^{-21} \text{ ед. СГСЭ}$, $\kappa = 5 \cdot 10^{-16} \text{ ед. СГСЭ}$ [4]. Остальные параметры, *a priori* неизвестные, подбирались в ходе численного эксперимента.

Решение задачи (3) показало, что на картину поляризационного профиля существенно влияет

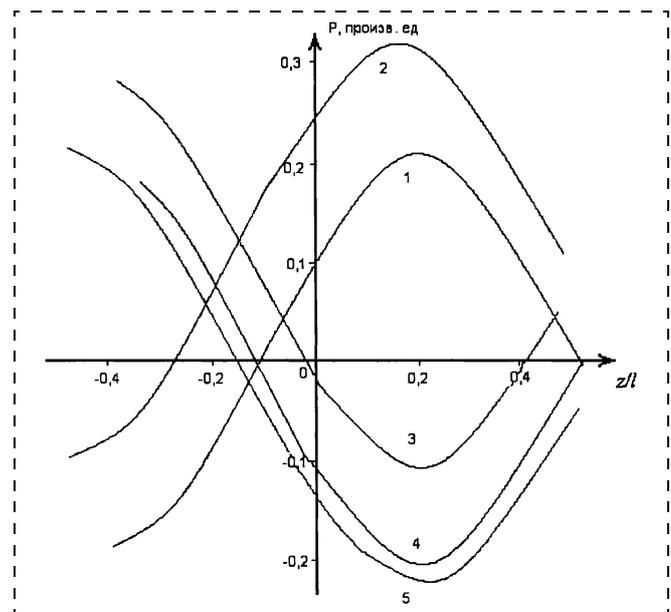


Рис. 3. Теоретические кривые поляризационного профиля в тонкой сегнетоэлектрической пленке для различных значений внешнего электрического поля, полученные из модели (3). Кривые 1 и 2 соответствуют положительным значениям напряженности электрического поля E ; 3–5 — отрицательным значениям

электрическое поле на границах пленки. Влияние внутреннего электрического поля при этом незначительно, а химический потенциал примеси и электрострикционное взаимодействие изменяет значения экстраполяционной длины и приводит к несимметричной картине поляризационного профиля.

Полученные из решения задачи (4) результаты (рис. 3) свидетельствуют о качественном соответствии теоретических расчетов с экспериментом. Кривые 1 и 2 соответствуют положительным значениям напряженности электрического поля, направленной вдоль вектора спонтанной поляризации. Кривые 3—5 получены для случая, когда вектора P и E антипараллельны. Если сравнить данные рис. 3 и рис. 2 для однородных граничных условий, то становится ясно, что изменение знака поляризации может быть обусловлено неоднородностью граничных условий, в частности влиянием материала подложки.

Таким образом, из полученного семейства кривых поляризационного профиля и сопоставлений

их с экспериментальными результатами видно, что изменение поляризационного профиля обусловлено в основном электрическими граничными условиями при изменении приложенного поля, а также влиянием электрострикционного эффекта, преимущественно на границе с подложкой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 05-02-16873-а).

Список литературы

1. Каганов М. И., Омелянчук А. Н. К феноменологической теории фазового перехода тонкой ферромагнитной пластины // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. (№ 10) Вып. 4. С. 1680—1685.
2. Пронин И. П., Каптелов Е. Ю., Тараканов Е. А., Шапльгина Т. А. и др. Самополяризация и миграционная поляризация в тонких пленках цирконата-титаната свинца // ФТТ. 2002. Т. 44. № 4. С. 739—744.
3. Пронин И. П., Каптелов Е. Ю., Тараканов Е. А., Афанасьев В. П. Влияние отжига на самополяризованное состояние в тонких сегнетоэлектрических пленках // ФТТ. 2002. Т. 44. № 9. С. 1659—1664.
4. Zhong W. L., Wang Y. G., Zhang P. L., Qu B. D. Phenomenological study of the size effect on phase transitions in ferroelectric particles // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. N 2. P. 698—703.

УДК 621.382

А. Г. Шауцуков, канд. техн. наук, **И. М. Кизилев**, Кабардино-Балкарский Государственный Университет, г. Нальчик,
Г. Д. Кузнецов, д-р техн. наук, Московский государственный институт стали

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ АТОМАМИ ОТДАЧИ СЛОЕВ

Разрабатываются алгоритмы моделирования процесса формирования слоев, легированных атомами отдачи. По разработанным алгоритмам путем проведения численного эксперимента определяются параметры слоев, полученных для различных режимов проведения процесса.

Введение

Требования по улучшению качества, надежности, быстродействия интегральных схем, расширение их функциональных возможностей определяют необходимость дальнейшего совершенствования технологии формирования тонких ионно-легированных слоев. В работах [1, 2] показано, что бомбардировка структур пленка—подложка позволяет формировать тонкие высоколегированные атомами отдачи слои толщиной порядка нескольких сотых долей микрометра. В настоящей работе разработаны алгоритмы моделирования процесса формирования наноразмерных слоев, легированных атомами отдачи. Алгоритмы предусматривают моделирование процесса внедрения атомов отдачи

в слои с заданными параметрами и моделирование степени перераспределения внедренных атомов отдачи с учетом пространственно-временной зависимости коэффициента радиационно-ускоренной диффузии. Проводится численный эксперимент и определяются параметры легированных атомами отдачи кислорода и алюминия слоев.

Разработка алгоритмов моделирования

Алгоритмы моделирования процесса внедрения атомов отдачи в слой с заданными параметрами разрабатывались на основе методики расчета профилей распределения атомов отдачи в подложке, описанной в работе [2]. Определив согласно этой методике спектр энергий атомов отдачи на границе пленка—подложка, нетрудно построить профиль распределения атомов отдачи в подложке, представив его как сумму профилей, соответствующих выбранным энергиям из спектра энергий атомов отдачи.

Алгоритмы программы предусматривают построение профилей распределения атомов отдачи в подложке для ряда доз и энергий бомбардирующих ионов и сравнение каждого профиля с заданным (сравниваются концентрации внедренных атомов отдачи на поверхности и на глубине, равной толщине слоя). На глубине, равной толщине слоя, она должна быть равной исходной концентрации примеси в подложке. При рассмотрении профилей легирования параметры распределения внедренной примеси R_p и ΔR_p рассчитываются на основе коэффициентов $\Delta R_p/\Delta E$ и $\Delta(\Delta R_p)/\Delta E$, предварительно рассчитанных из табличных значений R_p и ΔR_p работы [3].

На втором этапе моделируется процесс фотон-

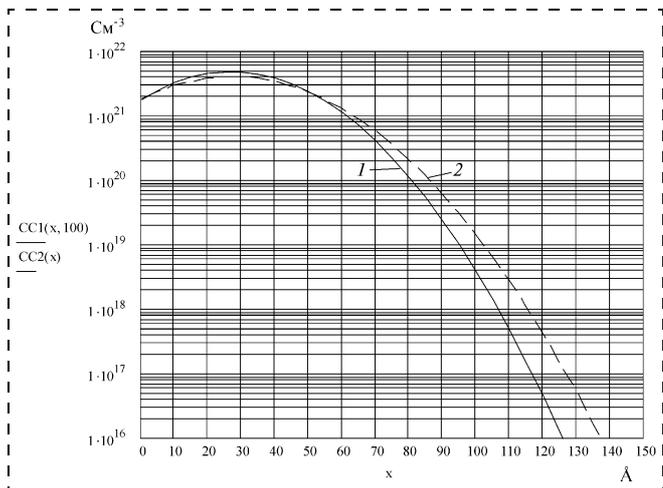


Рис 1. Профили распределения атомов отдачи кислорода в кремнии в случае бомбардировки ионами аргона системы $\text{SiO}_2\text{—Si}$:
1 — после ионной бомбардировки; 2 — после фотонного отжига

ного отжига легированных атомами отдачи слоев. Согласно данным ряда работ максимальная активация имплантированной примеси и максимальный отжиг дефектов осуществляется при фотонном отжиге длительностью 1...10 с, обеспечивающем нагрев кремниевой пластины до температуры 1100 °С. На основании сказанного выше алгоритмы моделирования этого процесса предусматривают: определение плотности потока мощности излучения галогенных ламп, обеспечивающего стационарную температуру пластины кремния 1100 °С; расчет средней температуры пластины кремния, соответствующей заданному режиму фотонного отжига и остывания согласно работе [4]; моделирование степени перераспределения внедренных атомов отдачи в процессе фотонного отжига с учетом коэффициента радиационно-ускоренной диффузии (согласно работе [5]). Для определения степени перераспределения внедренной примеси рассчитывается профиль их распределения после отжига и проводится сравнение его с исходным.

Численный эксперимент

Согласно разработанным алгоритмам путем моделирования на ЭВМ были проведены исследования процесса легирования кремния атомами отдачи кислорода и алюминия в случае бомбардировки структур $\text{SiO}_2\text{—Si}$; структур Al—Si ионами Ar соответственно. Исходными данными для проведения численного эксперимента явились: тип и исходный уровень легирования подложки; тип и толщина пленки; диапазон и шаг изменения энергии дозы бомбардирующих ионов; коэффициенты $\Delta R_p/\Delta E$ и $\Delta(\Delta R_p)/\Delta E$; стационарная температура подложки, равная 1100 °С; время отжига; коэффициент отношения площадей излучения и поглощения, равный двум; приведенная излучательная способность кремниевой пластины и стенок рабочей камеры установки фотонного отжига "ИТО-18М", равная 0,65; коэффициенты R_d/R_p и $\Delta R_d/\Delta R_p$;

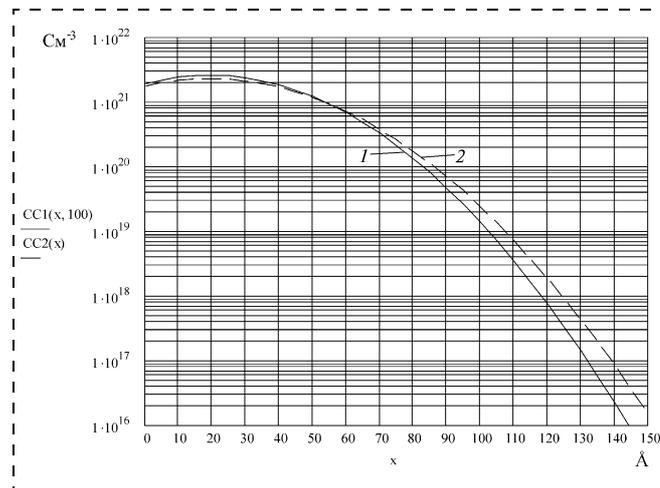


Рис 2. Профили распределения атомов отдачи алюминия в кремнии в случае бомбардировки ионами аргона системы Al—Si :
1 — после ионной бомбардировки; 2 — после фотонного отжига

диффузионная длина дефектов, равная 0,5 мкм; постоянная времени спада для фотонного отжига, равная 4,4 с.

Результаты численного эксперимента представлены на рис. 1 и 2. Как видно из представленных данных в кремнии с исходным уровнем легирования 10^{17} см^{-3} образуется легированный атомами отдачи слой (толщина слоя для O_2 и Al равна 132 Å (13,2 нм) и 118 Å (11,8 нм) соответственно). При этом на глубине 120 Å (12 нм) степень перераспределения внедренных атомов отдачи равна 5 Å (0,5 нм) и 10 Å (1 нм) для O_2 и Al соответственно.

Выводы

1. Разработаны алгоритмы моделирования процесса формирования легированных атомами отдачи слоев с заданными параметрами.
2. Проведен численный эксперимент и показано, что путем имплантации атомов отдачи кислорода и алюминия в кремний можно формировать наноразмерные слои, легированные этими атомами отдачи. При этом показано, что при последующем фотонном отжиге этих слоев степень перераспределения внедренных атомов отдачи не превышает 1 нм.

Список литературы

1. Шауцков А. Г. Моделирование процесса легирования атомами отдачи // Материалы V международной научной конференции "Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии", г. Кисловодск, Россия, 2004 г.
2. Шауцков А. Г., Кузнецов Г. Д. Моделирование процесса одновременного легирования атомами отдачи и бомбардирующими ионами при бомбардировке структур пленка—подложка // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 9. С. 36—39.
3. Буренков А. Ф. и др. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. Минск: Изд-во БГУ, 1980. С. 352.
4. Шауцков А. Г., Кузнецов Г. Д. Моделирование нагрева пластин кремния в процессе фотонного отжига их ионно-легированных слоев // Электронный журнал "Исследовано в России".
5. Шауцков А. Г., Загидулин Ю. С. Моделирование процессов радиационно-стимулированной диффузии в ионно-легированных слоях // Микросистемная техника. 2004. № 4. С. 7—12.

Е. С. Рембеза¹, канд. физ.-мат. наук,
Т. В. Свистова, канд. техн. наук, С. И. Рембеза, д-р физ.-мат. наук,
А. С. Комарова, Н. Н. Дырда,
Воронежский государственный технический университет
¹Воронежский государственный университет

НАНОКОМПОЗИТЫ $\text{SnO}_x\text{:MnO}_y$ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ ГАЗОВ

Рассмотрена возможность применения пленок нанокompозитов $\text{SnO}_x\text{:MnO}_y$ в качестве газочувствительных слоев для датчиков газов. Нанокompозиты на основе SnO_2 были изготовлены методом реактивного ионно-лучевого распыления составных мишеней в атмосфере $\text{Ar} + \text{O}_2$. Исследован элементный состав пленок, их электрофизические свойства и газовая чувствительность. Показано, что добавка к диоксиду олова оксида марганца снижает температуру максимальной газовой чувствительности пленок нанокompозитов к наличию паров этанола, ацетона, аммиака, пропанола и формальдегида в воздухе. Сделан вывод о перспективности применения пленок нанокompозитов $\text{SnO}_x\text{:MnO}_y$ для газовой сенсорики.

Введение

В связи с поиском новых материалов для твердотельных газовых сенсоров активно изучается влияние адсорбции молекул газов на электрофизические свойства полупроводниковых оксидов SnO_2 , ZnO , WO_3 , In_2O_3 , а также сложных соединений, например $\text{Cr}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$, FeNbO_4 и др. Среди изученных веществ наиболее широкое применение нашел нанокристаллический диоксид олова, так как он является широкозонным полупроводником n -типа, вследствие чего электропроводность SnO_2 оказывается чрезвычайно чувствительной к состоянию поверхности как раз в той области температур 200...500 °С, для которой на поверхности оксидов наблюдаются окислительно-восстановительные реакции [1].

Существенным недостатком газовых сенсоров на основе SnO_2 является их низкая селективность. Одним из путей повышения селективности является введение в высокодисперсную оксидную матрицу легирующих добавок, как правило, переходных металлов или их оксидов, которые могут влиять на электронные и каталитические свойства поверхности. В качестве легирующих примесей в диоксиде олова опробовано большое количество металлов и их оксидов. Эти при-

меси обычно подразделяют на две группы: каталитические (Pt, Pd, Ru, Rh) и электроактивные (In, Sb, Cu, Ni, Mn). Наиболее активно изучаются каталитические примеси [2]. В качестве одного из методов получения высокоэффективных газочувствительных пленок можно использовать синтез многокомпонентных оксидов, не образующих химических соединений и твердых растворов между собой. Такими нанокompозитами могут быть, например, $\text{SnO}_2\text{:SiO}_2$, $\text{SnO}_2\text{:ZrO}_2$, $\text{SnO}_x\text{:MnO}_y$, $\text{SnO}_2\text{:Y}_2\text{O}_3$ и другие [3].

Целью работы является исследование газовой чувствительности нанокompозита $\text{SnO}_x\text{:MnO}_y$ к различным газам-восстановителям для использования его в качестве материала для чувствительных элементов микроэлектронных датчиков газов. Выбор оксидов олова и марганца обусловлен тем, что они не образуют ни сплавов, ни твердых растворов. Присутствие оксида марганца предотвращает рост больших зерен поликристаллов, как это было обнаружено нами ранее в других нанокompозитах — $\text{SnO}_2\text{:SiO}_2$ и $\text{SnO}_2\text{:ZrO}_2$ [3].

Образцы и методика эксперимента

Пленки $\text{SnO}_x\text{:MnO}_y$ были изготовлены методом ионно-луче-

вого реактивного распыления составной мишени на основе олова с вставками марганца в атмосфере $\text{Ar} + \text{O}_2$. Напылительная установка была изготовлена на основе вакуумного напылительного поста УВН-2М [4]. В зависимости от выбора состава мишени можно было изготавливать пленки с различным соотношением оксидов Sn и Mn.

Элементный состав пленок $\text{SnO}_x\text{:MnO}_y$ определяли с помощью рентгеновского микроанализатора JXA-840. Было установлено процентное содержание элементов Sn, Mn и O. Изготовлена серия образцов с содержанием Mn от 0,4 до 5,0 ат. % [5]. К сожалению, эта методика не позволяет определить точный фазовый состав исследуемых образцов, поэтому соотношение оксидов оценивалось расчетным путем по содержанию олова, кислорода и марганца в разных образцах ($x \leq 2$, $y < 2$). Толщину пленок измеряли на интерференционном микроскопе МИИ-4, в зависимости от состава пленок она имела значение от 0,6 до 1,8 мкм.

Газовая чувствительность S_g пленок определялась как отношение сопротивления пленки на воздухе R_B к сопротивлению пленки при напуске исследуемого газа известной концентрации в герметичную кювету R_T : $S_g = R_B/R_T$ [6]. Объем кюветы составлял 10 л, концентрацию исследуемых газов в воздушной среде рассчитывали по формуле Клапейрона — Менделеева.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В результате выполненных исследований установлено, что пленки после изготовления имеют преимущественно аморфную структуру. При высокотемпературном отжиге происходит их кристаллизация и стабилизация электрических параметров. В результате трехступенчатого изотермического отжига при температурах 300, 400 и 500 °С в течение 10 ч структура пленок становится мелкокристаллической, о чем свидетельствуют прямые наблюдения

морфологии поверхности с помощью атомного силового микроскопа [3].

Исследовалась газовая чувствительность пленок на основе SnO_2 к парам этанола, пропанола, ацетона, аммиака и формальдегида в воздухе. Обнаружено, что нелегированные пленки SnO_2 обладают максимальной чувствительностью к парам этанола при температуре 330 °С, а пленки-наноконкомпозиты $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ обнаруживают максимальную чувствительность к парам этанола при более низких температурах, чем пленки нелегированного диоксида олова. Например, наноконкомпозиты $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ с процентным содержанием Mn 0,4 % ат. имеют максимальную чувствительность к парам этанола при температуре 220 °С. Пленки $\text{SnO}_2:(1,7 \text{ ат.}) \text{ Mn}$ имеют максимальную чувствительность к парам этанола при 180 °С, а пленки $\text{SnO}_2:(5 \text{ ат.}) \text{ Mn}$ — при 200 °С (рис. 1).

Установлено, что пленки SnO_2 имеют максимальную чувствительность к парам ацетона при температуре 360 °С, а пленки-наноконкомпозиты $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ обнаруживают пары ацетона при более низких температурах, чем пленки нелегированного диоксида олова. Например, наноконкомпозиты $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ с процентным содержанием Mn 0,4 % ат. имеют максимальную чувствительность

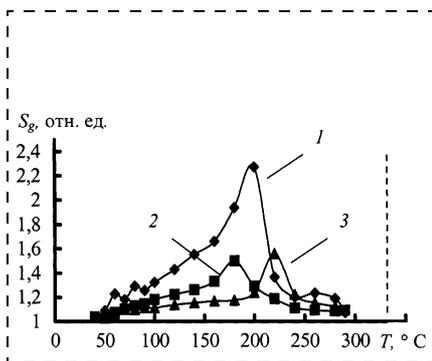


Рис. 1. Температурные зависимости газовой чувствительности пленок SnO_2 , легированных Mn, к парам этанола (7000 ppm) в воздухе:

1 — $\text{SnO}_2:(5 \text{ ат.}) \text{ Mn}$; 2 — $\text{SnO}_2:(1,7 \text{ ат.}) \text{ Mn}$; 3 — $\text{SnO}_2:(0,4 \text{ ат.}) \text{ Mn}$. Штриховой линией обозначена температура максимальной газовой чувствительности нелегированной пленки SnO_2

к парам ацетона при температуре 160 °С. Пленки $\text{SnO}_2:(1,7 \text{ ат.}) \text{ Mn}$ имеют максимальную чувствительность к парам ацетона при 100 °С, а пленки $\text{SnO}_2:(5 \text{ ат.}) \text{ Mn}$ — при 260 °С (рис. 2).

Нелегированные пленки SnO_2 чувствуют пары аммиака при 360 °С, пары формальдегида при 300 °С, пары пропанола при 400 °С, а пленки SnO_2 , легированные марганцем, определяют эти вещества при более низких температурах. Например, пленки с содержанием марганца 5 % ат. чувствуют пары аммиака при 260 °С, пары формальдегида при 240 °С, а пары пропанола при 180 °С.

Установлено, что увеличение количества марганца в составе пленок от 0 до 0,4 % ат., а затем до 1,7 % ат., приводит к снижению температуры максимальной газовой чувствительности пленок к этанолу, аммиаку, ацетону, пропанолу, формальдегиду (рис. 3 и 4), причем этот эффект для каждого газа проявляется по-разному, это можно использовать для повышения селективности пленки к различным газам. Затем наблюдается незначительный рост температуры максимальной газовой чувствительности. Этот результат показывает, что исследованные пленки при их применении в датчиках газов позволят уменьшить потребляемую мощность датчика при контроле примесей исследо-

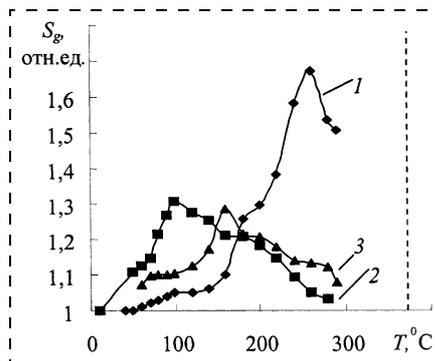


Рис. 2. Температурные зависимости газовой чувствительности пленок SnO_2 , легированных Mn, к парам ацетона (6500 ppm) в воздухе:

1 — $\text{SnO}_2:(5 \text{ ат.}) \text{ Mn}$; 2 — $\text{SnO}_2:(1,7 \text{ ат.}) \text{ Mn}$; 3 — $\text{SnO}_2:(0,4 \text{ ат.}) \text{ Mn}$. Штриховой линией обозначена температура максимальной газовой чувствительности нелегированной пленки SnO_2

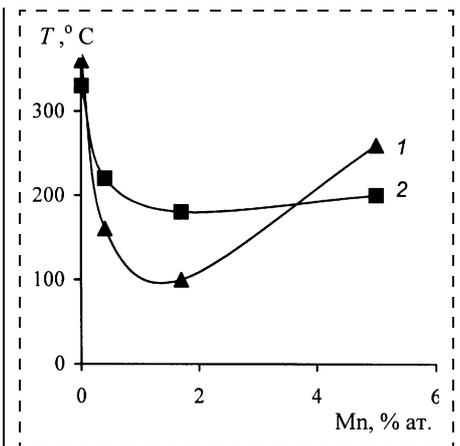


Рис. 3. Зависимость температуры максимальной газовой чувствительности пленок $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ к парам ацетона (1) и этанола (2) в воздухе от процентного содержания марганца в пленках

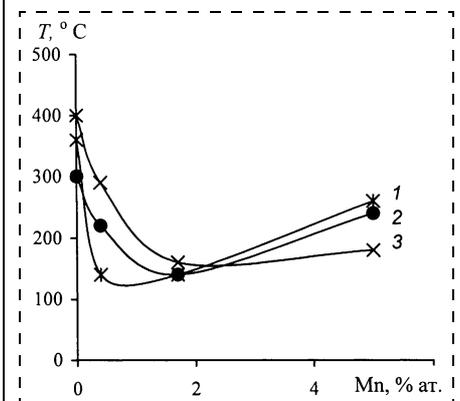


Рис. 4. Зависимость температуры максимальной газовой чувствительности пленок $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ к парам аммиака (1), формальдегида (2) и пропанола (3) в воздухе от процентного содержания марганца в пленках

ванных газов в воздухе. А легирование марганцем до 5 % ат. не только снижает температуру максимальной газовой чувствительности, но и увеличивает чувствительность пленок ко всем исследуемым газам.

Исследование наноконкомпозитов на основе $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ позволяет получить почти такие же результаты по снижению температуры максимальной газовой чувствительности пленок, как и при использовании легирующих примесей металлов-катализаторов Pt, Pd, Ag. Следовательно, повышение селективности газочувствительных пленок к различным газам можно осуществить не только за счет их легирования металлами-катализаторами, но и

путем синтеза металлооксидных наноконкомпозитов.

Заклучение

Методом реактивного ионно-лучевого напыления были изготовлены пленки-наноконкомпозиты $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ с различным содержанием примеси марганца, от 0,4 до 5 % ат.

Исследованы газовая чувствительность пленок-наноконкомпозитов $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ к различным газам-восстановителям, а также зависимость температуры максимальной газовой чувствительности пленок $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ к парам различных газов в воздухе от процентного содержания примеси марганца. Увеличение концентрации Mn приводит к снижению температуры максимальной

газовой чувствительности наноконкомпозита, что может быть использовано для улучшения селективности пленок к различным газам.

Таким образом, пленки $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ являются перспективным материалом для чувствительных элементов микроэлектронных датчиков газов, так как имеют хорошую чувствительность и селективность к разным газам и позволяют контролировать газы при более низких температурах по сравнению с нелегированными пленками SnO_2 .

Авторы благодарят А. В. Ситникова и Ю. Е. Калинина за помощь в изготовлении образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 06-02-96500.

Список литературы

1. Göpel W., Schierbaum K. D. SnO_2 sensor: current status and future prospects // Sensor and Actuators. 1995. Vol. B 26–27. P. 1–12.
2. Румянцева М. Н., Сафонова О. В., Булова М. Н., Рябова Л. И., Гаськов А. М. Газочувствительные материалы на основе диоксида олова // Сенсор. 2003. № 2. С. 8–33.
3. Рембеза Е. С., Рембеза С. И., Домашевская Э. П., Гречкина М. В., Агапов Б. Л. Влияние атомного состава оксидных наноконкомпозитов на основе SnO_2 на их структуру // Нано- и микро-системная техника. 2005. № 7. С. 25–28.
4. Золотухин И. В., Калинин Ю. Е., Стогней О. В. Новые направления физического материаловедения. Воронеж: Изд. ВГУ, 2000, 360 с.
5. Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Рембеза С. И., Комарова А. С., Дырда Н. Н. Структура и электрофизические свойства наноконкомпозита $\text{SnO}_x:\text{MnO}_y$ // Нано- и микро-системная техника. 2006. № 4. С. 27–29.
6. Watson J., Ihokura K., Coles G. S. V. The tin dioxide gas sensor // Meas. Sci. Technol. 1993. N 4. P. 717–719.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.315

С. М. Афонин, канд. техн. наук, П. С. Афонин, Московский государственный институт электронной техники

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БЛОЧНЫХ АКТЮАТОРОВ ДЛЯ НАНО- И МИКРОМАНИПУЛЯТОРОВ

Исследованы статические и динамические характеристики пьезоэлектрических актюаторов при продольном и поперечном пьезоэффектах. Проведено моделирование характеристик простых, блочных и секционных пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов.

Нано- и микроманипуляторы с пьезоэлектрическими актюаторами решают задачи пространственного прецизионного позиционирования объектов в оборудовании для нанотехнологии, микроэлектроники [1, 2]. Пьезоактюаторы для приводов нано- и микроперемещений имеют диапазон перемещения от нескольких нанометров до десятков микрометров, чувствительность менее 1 нм/В, нагрузочную способность до 1000 Н, мощность на

выходном валу до 100 Вт и полосу пропускания порядка нескольких десятков герц.

Так как предельные разрушающие механические напряжения в пьезокерамике промышленных марок ЦТС или PZT на сжатие в среднем в 10 раз по значению превышают предельные разрушающие напряжения на растяжение, то из соображений прочности целесообразно осуществлять предварительное поджатие пьезоактюатора с помощью пружины или мембраны. Усилие предварительного поджатия должно превышать максимальную растягивающую нагрузку, чем обеспечивается гарантированное рабочее сжатие пьезоактюатора [3, 4]. Пьезопреобразователь для пьезоактюатора нано- и микроперемещений собирается следующим образом: предварительно сжатый для выбора зазоров составной пьезопреобразователь стягивается также предварительно деформированным упругим элементом в виде шпильки или мембраны. Удельное усилие сжатия выбирается порядка $(5...8) \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$. При этом усилие выбираются зазоры, и зависимость деформации от внешнего усилия принимает линейный характер.

Основным параметром внешней нагрузки пьезоактюатора является жесткость нагрузки, т. е. отношение значения силы упругой реакции нагрузки

к значению деформации нагрузки. В зависимости от жесткости и массы нагрузки проектируются конструктивные параметры пьезоактюатора.

Статические характеристики пьезоактюатора определяются с учетом уравнения обратного пьезоэффекта и механической нагрузки. Динамические характеристики пьезоактюатора рассчитываются на основе совместного решения волнового уравнения, уравнения пьезоэффекта при нулевых начальных и соответствующих граничных условиях. При упругоинерционной нагрузке и массе объекта, существенно превышающей массу пьезоактюатора, получаем математическое описание пьезоактюатора как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами в виде колебательного звена [4, 5].

Пьезоактюатор (пьезодвигатель нано- и микроперемещений) работает на основе обратного пьезоэффекта, в котором эффект перемещения достигается за счет деформации пьезоэлемента при приложении внешнего электрического напряжения. Увеличение диапазона перемещений до десятков микрометров достигается при использовании блочного (составного) пьезоактюатора. Применение простых и блочных пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов с пьезоприводами позволяет решить задачи точного совмещения в микроэлектронике, нанотехнологии, астрономии и адаптивной оптике [1–4].

Статическая механическая характеристика пьезоактюатора [4, 5] при продольном пьезоэффекте и управлении по напряжению имеет вид

$$S_3 = d_{33} E_3 + s_{33}^E T_3,$$

где $S_3 = \xi/l$ — относительная деформация пьезоактюатора; ξ — перемещение; $l = nh$ — длина блочного пьезоактюатора; n — число пьезопластин; d_{33} — пьезомодуль; $E_3 = U/h$ — напряженность электрического поля в пьезоактюаторе по оси 3 (рис. 1); U — напряжение на электродах пьезоактюатора; $s_{33}^E = \frac{1}{E_{ю}}$ — упругая податливость при

$E_3 = \text{const}$ и управлении от источника напряжения; $E_{ю}$ — модуль Юнга пьезоэлектрической керамики при $E_3 = \text{const}$; $T_3 = -F/S_0$ — механическое напряжение в пьезоактюаторе; F — внешняя сила; S_0 — площадь сечения пьезоактюатора.

Рассмотрим простой пьезоактюатор при продольном пьезоэффекте (рис. 1) с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, максимальным напряжением питания $U = 300$ В, толщиной пьезопластины $h = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, упругой податливостью $s_{33}^E = 1,25 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, радиусом $R_{п} = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Для нахождения в статике максимального перемещения Δh_{max} воспользуемся зависимостью [2, 4]

$$\Delta h_{\text{max}} = d_{33} U.$$

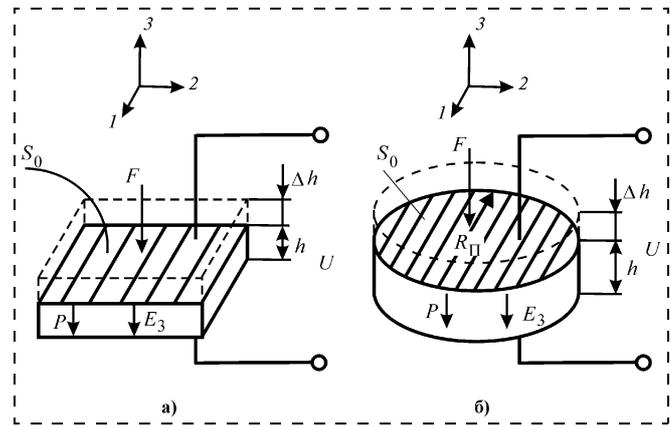


Рис. 1. Простой пьезоактюатор при продольном пьезоэффекте с прямоугольным (а) и круглым поперечным сечением (б):

F — рабочее усилие; 1, 2 — координатные оси; 3 — ось поляризации; E_3 — напряженность электрического поля; S_3 — относительная деформация по оси 3; Δh — перемещение; h — толщина

Соответственно максимальное рабочее усилие F_{max} можно найти из выражения

$$F_{\text{max}} = \frac{\Delta h_{\text{max}} S_0}{s_{33}^E h} = \frac{d_{33} U S_0}{s_{33}^E h},$$

где площадь сечения пьезоактюатора S_0 находится из соотношения

$$S_0 = \pi R_{п}^2.$$

Подставив численные значения данных величин, получим (рис. 2) для простого пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте площадь сечения $S_0 = 1,77 \cdot 10^{-4}$ м², максимальное перемещение $\Delta h_{\text{max}} = 120$ нм, максимальное рабочее усилие $F_{\text{max}} = 2,83 \cdot 10^3$ Н.

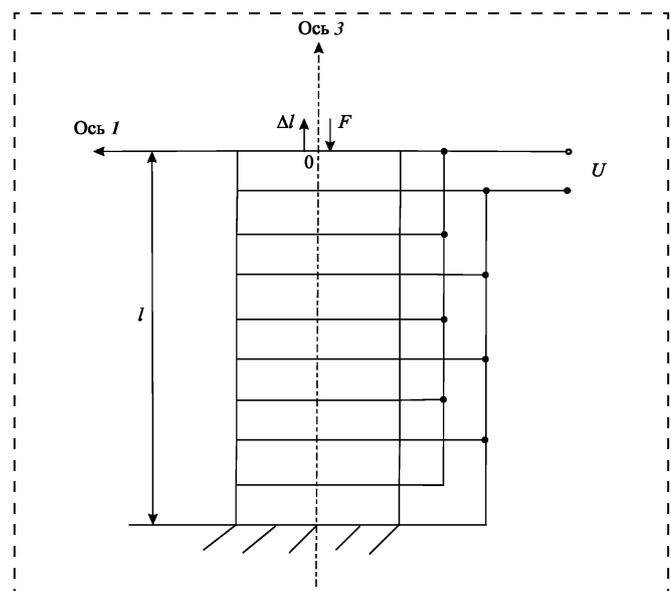
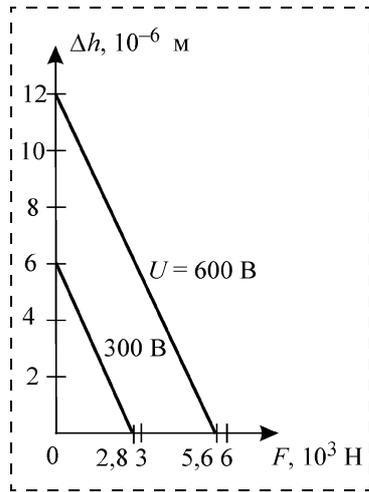


Рис. 2. Блочный пьезоактюатор при продольном пьезоэффекте:

l — длина пьезоактюатора; Δl — перемещение

Рис. 3. Статическая механическая характеристика блочного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте



Рассмотрим блочный пьезоактюатор при продольном пьезоэффекте (рис. 2) с пьезомодулем $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В, максимальным напряжением питания $U = 300$ В, толщиной пьезопластины $h = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, упругой податливостью $s_{33}^E = 1,25 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, радиусом $R_{\text{п}} = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м, числом пьезоэлементов $n = 50$ при параллельном управлении, когда пьезопластины механически соединены последовательно, а электрически — параллельно.

Для нахождения в статике максимального перемещения Δl_{max} воспользуемся зависимостью [2–4]

$$\Delta l_{\text{max}} = d_{33} n U,$$

чтобы найти максимальное рабочее усилие F_{max} , воспользуемся формулой

$$F_{\text{max}} = \frac{\Delta l_{\text{max}} S_0}{s_{33}^E l}.$$

Подставляя численные значения, получаем механическую характеристику блочного пьезоактюатора (рис. 3), где $F_{\text{max}} = 2,83 \cdot 10^3$ Н, $\Delta l_{\text{max}} = 6$ мкм.

Рассмотрим простой пьезоактюатор при поперечном пьезоэффекте, аналогичный приведенному на рис. 1, а, причем напряженность электрического поля направлена по оси 3, а деформация — по оси 1, с пьезомодулем $d_{31} = 2 \cdot 10^{-10}$ м, максимальном напряжении питания $U = 300$ В, толщиной пьезопластины $h = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, упругой податливостью $s_{11}^E = 1,15 \cdot 10^{-11}$ м²/Н, длиной $l = 3 \cdot 10^{-2}$ м, шириной $b = 1 \cdot 10^{-2}$ м.

Для нахождения в статике максимального перемещения Δl_{max} воспользуемся зависимостью

$$\Delta l_{\text{max}} = \frac{d_{31} U l}{h}.$$

Соответственно максимальное рабочее усилие F_{max} найдем из выражения

$$F_{\text{max}} = \frac{d_{31} U S_0}{s_{11}^E h},$$

где площадь сечения пьезоактюатора S_0 рассчитывается из соотношения

$$S_0 = h b.$$

Подставив известные численные значения данных величин, получим механическую характеристику пьезоактюатора, где $\Delta l_{\text{max}} = 3$ мкм; $S_0 = 6 \cdot 10^{-6}$ м²; $F_{\text{max}} = 52$ Н.

Полученные выражения отражают статические механические характеристики пьезоактюаторов и позволяют выбирать параметры пьезоактюатора в зависимости от внешней нагрузки на пьезоактюатор в нано- и микроманипуляторах с пьезоприводами.

Расчет динамических характеристик блочного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте для упругоинерционной нагрузки при $m \ll M$ (где m — масса блочного пьезоактюатора, M — масса нагрузки) как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами выполняется с использованием передаточной функции блочного пьезоактюатора [4] в виде

$$W(p) = \frac{\xi(p)}{U_0(p)} = \frac{d_{33} n}{\left(1 + \frac{C_e}{C_{33}}\right) (R n C_0 p + 1) (T_{33}^2 p^2 + 2 T_{33} \xi_{33} p + 1)},$$

где $\xi(p)$, $U_0(p)$ — преобразования Лапласа перемещения торца пьезоактюатора и напряжения источника питания пьезоактюатора при нулевых начальных условиях; p — оператор Лапласа; C_e — жесткость

нагрузки; $C_{33} = S_0 / (s_{33}^E l)$ — жесткость пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте, причем $C_{11} =$

$S_0 / (s_{11}^E l)$ — жесткость пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте; R — сопротивление внешней цепи пьезоактюатора; C_0 — емкость пьезопластины актюатора; $T_{33} = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_{33}}}$ — постоянная

времени колебательного звена для пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной

нагрузке; $\xi_{33} = \frac{\alpha l^2 C_{33}}{3 c^E \sqrt{M(C_e + C_{33})}}$ — коэффициент затухания колебательного звена при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке; α — коэффициент затухания; c^E — скорость звука в пьезоактюаторе при $E_3 = \text{const}$.

Соответственно при малом сопротивлении $R \rightarrow 0$ передаточная функция пьезоактюатора при упругоинерционной нагрузке представляет колебательное звено. Динамическая переходная характери-

стика (рис. 4) при подаче на вход пьезоактюатора ступенчатого напряжения $U_0 1(t)$ имеет вид

$$\xi(t) = \xi_0 \left[1 - \frac{e^{-\frac{\xi_{33} t}{T_{33}}}}{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}} \sin(\omega_{33} t + \varphi_{33}) \right],$$

$$\text{где } \xi_0 = \frac{d_{33} n U_0}{1 + \frac{C_e}{C_{33}}}, \quad \omega_{33} = \sqrt{1 - \xi_{33}^2},$$

$$\varphi_{33} = \arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}}{\xi_{33}}\right),$$

ξ_0 — установившееся значение перемещения пьезоактюатора.

Соответственно для блочного пьезоактюатора из промышленной пьезокерамики марки ЦТС-19 при ступенчатом входном напряжении амплитудой $U_0 = 150$ В получаем $\xi_0 = 3$ мкм, $\xi_{33} = 0,1$, $T_{33} = 0,9$ мс и переходную характеристику, изображенную на рис. 4.

Диапазон перемещения пьезоактюатора пропорционален пьезомодулю и напряжению питания. Для эффективного использования рабочего диапазона перемещения при упругоинерционной нагрузке выбираем жесткость нагрузки в следующих пределах $0 < C_e < 0,1 C_{33}$. Увеличение жесткости нагрузки приводит к уменьшению постоянной времени T_{33} .

Экспериментальные и расчетные характеристики блочных пьезоактюаторов совпадают с погрешностью 5 %.

Построение характеристик пьезоактюатора и выбор его конструктивных параметров (рис. 5) по-

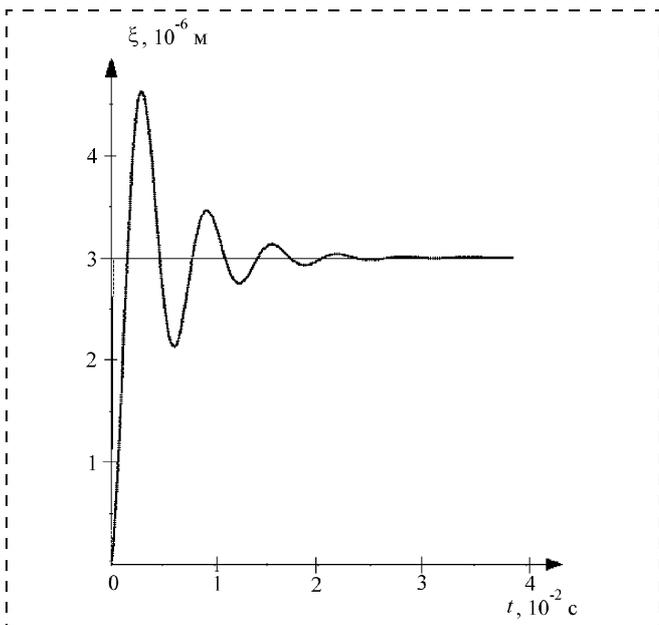


Рис. 4. Динамическая характеристика блочного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке

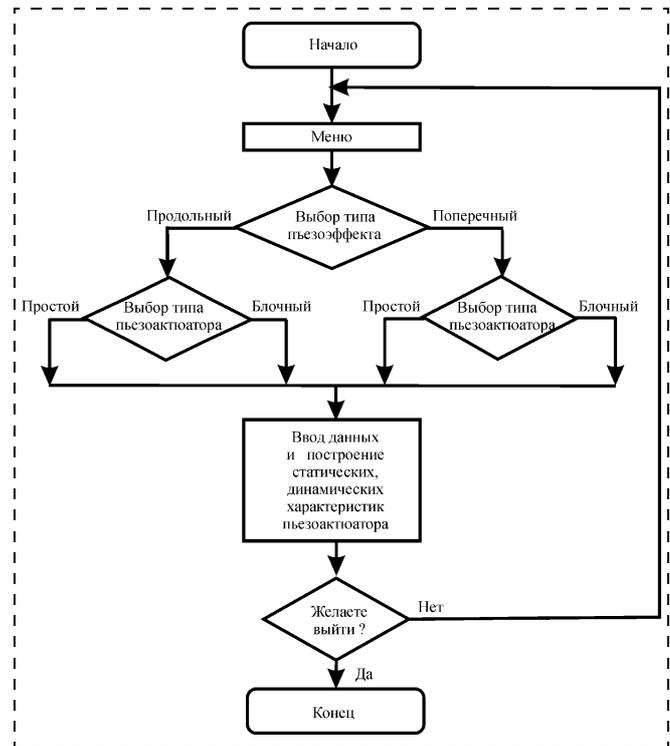


Рис. 5. Схема алгоритма программы моделирования характеристик простых и блочных пьезоактюаторов при продольном и поперечном пьезоэффектах для нано- и микроманипуляторов

зволяет осуществлять на персональном компьютере в диалоговом режиме программа моделирования статических и динамических характеристик простых и блочных пьезоактюаторов при продольном и поперечном пьезоэффектах для нано- и микроманипуляторов с пьезоприводами.

Пьезоэлектрический блочный секционный пьезоактюатор при продольном пьезоэффекте используется при кодовом управлении секциями в системе автоматического управления нано- и микроманипуляторами с цифроаналоговым преобразованием (ЦАП) [6]. Блочный пьезоактюатор делится на N секций с числом n_k пьезопластин в k -й секции. Секции соединены механически последовательно, а электрически изолированы. Соответственно пьезопластины (пьезослои) в секции соединены электрически параллельно, а механически последовательно.

Рассмотрим кодовое управление с электромеханическим ЦАП пьезоэлектрическими блочными секционными актюаторами при продольном и поперечном пьезоэффектах, обеспечивающее нано- и микроперемещения, пропорциональные управляющему коду. Проведем моделирование статических и динамических характеристик блочного секционного пьезоактюатора как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами [3] при малом сопротивлении $R \rightarrow 0$.

При продольном пьезоэффекте получаем число пьезопластин в секции

$$n_k = 2^k - 1,$$

длину k -й секции

$$l_k = 2^{k-1}h,$$

где $k = 1, 2, \dots, N$, причем N — число секций.

Общая длина блочного секционного пьезоактюатора

$$l = \sum_{k=1}^N l_k = (2^N - 1)h.$$

Максимальное перемещение блочного секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте в статике имеет вид

$$\Delta l_{\max} = d_{33}(2^N - 1)U = d_{33}nU.$$

Соответствующее перемещение блочного секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте в статике при подаче двоичного кода на вход

$$\Delta l = \sum_{k=1}^N a_k \Delta l_k,$$

где $a_k = 0; 1$ — разрядные цифры двоичного кода. Следовательно

$$\Delta l = \sum_{k=1}^N a_k d_{33} 2^{k-1} U = d_{33} \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U.$$

Перемещение в статике блочного секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругой нагрузке при $U = U_0$ имеет вид

$$\Delta l = \xi_0 = \frac{d_{33} \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U_0}{1 + \frac{C_e}{C_{33}}}.$$

В случае применения секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте он выполняется в виде монолитного пьезоактюатора с отдельными секционными электродами или в виде блочного секционного пьезоактюатора, причем получаем длину секции актюатора в виде

$$l_k = 2^{k-1}l_1,$$

где $k = 1, 2, \dots, N$.

Длина секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте

$$l = \sum_{k=1}^N l_k = (2^N - 1)l_1.$$

Перемещение секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте в статике при подаче напряжения на k -ю секцию пьезоактюатора

$$\Delta l_k = \frac{d_{31} 2^{k-1} l_1 U}{h}.$$

Максимальное перемещение секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте в статике имеет вид

$$\Delta l_{\max} = \frac{d_{31}(2^N - 1)l_1 U}{h}.$$

Перемещение секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте в статике при подаче двоичного кода на вход

$$\Delta l = (d_{31} l_1 / h) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U.$$

Следовательно, перемещение секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте и упругой нагрузке в статике при $U = U_0$ можно записать в виде

$$\Delta l = \xi_0 = \frac{(d_{31} l_1 / h) \left(\sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1} \right) U_0}{1 + \frac{C_e}{C_{11}}}.$$

Соответственно перемещение пьезоактюатора в статике при продольном или поперечном пьезоэффектах и упругой нагрузке

$$\Delta l = k_c U = \frac{\xi_0 U}{U_0},$$

при параллельном управлении пьезоактюатора коэффициент передачи k_c можно записать в виде

$$k_c = \begin{cases} \frac{d_{33}n}{1 + \frac{C_e}{C_{33}}} & \text{— при продольном пьезоэффекте;} \\ \frac{d_{31}l_1/h}{1 + \frac{C_e}{C_{11}}} & \text{— при поперечном пьезоэффекте,} \end{cases}$$

аналогично при кодовом управлении секционного пьезоактюатора коэффициент передачи k_c преобразуется к виду

$$k_c = \begin{cases} \frac{d_{33} \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{1 + \frac{C_e}{C_{33}}} & \text{— при продольном пьезоэффекте;} \\ \frac{(d_{31} l_1 / h) \sum_{k=1}^N a_k 2^{k-1}}{1 + \frac{C_e}{C_{11}}} & \text{— при поперечном пьезоэффекте,} \end{cases}$$

Динамическая характеристика блочного секционного пьезоактюатора при упругоинерционной нагрузке:

$$\Delta l(t) = \xi(t) = k_c U_0 h(t) = \xi_0 h(t).$$

Обобщенная нормированная переходная характеристика блочного секционного пьезоактюатора как системы с сосредоточенными параметрами

$$h(t) = 1 - \frac{e^{-\frac{\xi_{33(11)} t}{T_{33(11)}}}}{\sqrt{1 - \xi_{33(11)}^2}} \sin(\omega_{33(11)} t + \varphi_{33(11)}),$$

где соответствующие параметры пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте приведены с индексами 33, а при поперечном пьезоэффекте — с индексами 11:

$$\omega_{33(11)} = \frac{\sqrt{1 - \xi_{33(11)}^2}}{T_{33(11)}}; \quad \varphi_{33(11)} = \arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_{33(11)}^2}}{\xi_{33(11)}}\right);$$

$$T_{33(11)} = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_{33(11)}}};$$

$$\xi_{33(11)} = \frac{\alpha l^2 C_{33(11)}}{3c^E \sqrt{M(C_e + C_{33(11)})}}.$$

Заключение. Предложенное моделирование характеристик пьезоактюаторов позволяет рассчитывать статические и динамические режимы работы простых, блочных и секционных пьезоактюаторов в зависимости от внешней нагрузки в нано- и микроманипуляторах и их физических и геометрических параметров. Программа моделирования оперативно обеспечивает диалоговый расчет характеристик простых и блочных пьезоактюаторов при продольном и поперечном пьезоэффектах.

Список литературы

1. Шевченко В. Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, нанокомпозиты, нанотехнологии // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 2—4.
2. Афонин С. М. Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений // Приборы и системы управления. 1998. № 2. С. 41—42.
3. Афонин С. М., Афонин П. С. Расчет характеристик пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов // Электроника и информатика — 2005. V Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции. Часть 1. М.: МИЭТ, 2005. С. 56.
4. Афонин С. М. Расчет статических и динамических характеристик пьезодвигателя наноперемещений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2000. № 7. С. 56—57.
5. Физическая акустика. Т. 1. Часть А. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.
6. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

УДК 621.3.049.75

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
О. В. Дворников, канд. техн. наук,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск,
Республика Беларусь

МАРШРУТ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИПОЛЯРНО-ПОЛЕВЫХ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В ПРОГРАММАХ ТИПА "SPICE"

Предложен маршрут схемотехнического моделирования интегральных схем в программах типа "Spice", ориентированный на применение при системном подходе к синтезу биполярно-полевых аналоговых БИС/СБИС.

Схемотехническое проектирование значительно отличается для цифровых и аналоговых интегральных схем (ИС). Для цифровых ИС синтез схемы электрической функциональной на уровне элементарных логических блоков, проверка правильности функционирования, генерация контрольных тестов обычно выполняются на этапе функционально-логического проектирования. Основная задача схемотехнического моделирования цифровых ИС — схемно-параметрическая оптимизация элементарных логических блоков для получения требуемого сочетания быстродействия и потребляемой мощности, обеспечения работоспособности в температурном диапазоне, радиационной стойкости, учет влияния на выход годных изделий технологического разброса параметров активных и пассивных элементов.

Для аналоговых схем чрезвычайно трудно выработать общие критерии качества, так как существует большое разнообразие схемотехнических решений, выполняющих одну и ту же аналоговую функцию с разными приоритетами в параметрах. Так, функцию усиления выполняют избирательные (селективные) усилители, усилители постоянного тока, электрометрические, маломощные, микро-мощные и другие усилители, требования к характеристикам которых значительно различаются.

Для эффективного проектирования прецизионных аналоговых БИС целесообразно использовать предложенный системный подход [1], при применении которого на этапе схемотехнического синтеза необходимо знать конструктивные особенности интегральных элементов для правильного выбора нужного элемента из технологически реализуемых, а при параметрической оптимизации — представлять возможности топологического изменения параметров и существующий их разброс. В связи с этим описание электрических схем при моделировании должно быть неразрывно связано с топологическим исполнением элементов.

В рамках системного подхода разработан маршрут моделирования биполярно-полевых аналоговых ИС с помощью программ типа "Spice". Рассмотрим его.

I. Сначала необходимо оценить точность моделей интегральных элементов в диапазоне изменения тока (I), напряжения (V), температуры (T). Для этого выполняют моделирование работы в типовых схемах включения биполярных (БТ) и полевых транзисторов с $p-n$ -переходом (ПТП), сравнивают результаты моделирования и измерений, выделяют область изменения тока, напряжения, температуры, в которой обеспечивается допустимая погрешность. Вследствие существующего разброса параметров интегральных элементов в большинстве случаев достаточна погрешность менее 10 %. При схемотехническом синтезе рекомендуется обращать внимание на то, чтобы режимы работы элементов (I , V , T) не выходили за установленный допустимый диапазон. Основные характеристики аналоговых ИС, в отличие от цифровых, определяются малосигнальными параметрами. Поэтому с максимально возможной точностью необходимо идентифицировать следующие параметры моделей:

- напряжение Эрли (VAF^*);
- коэффициент модуляции длины канала ($LAMBDA$);
- сопротивления полупроводниковых областей эмиттера/истока (RE , RS);
- паразитные сопротивления межсоединений в эмиттерной/истоковой цепи.

Для анализа уровня шума значения сопротивлений моделей БТ и ПТП целесообразно рассчитать исходя из измерений шумовых характеристик, например, сопротивление базы БТ — из спектральной плотности напряжения шума.

*Здесь и далее обозначения параметров соответствуют принятым в программах типа "Spice".

II. Паразитная емкость подложки значительно влияет на характеристики ИС и учитывается в модели БТ с помощью параметров CJS , MJS , VJS . Необходимо убедиться в том, что значения параметров CJS , MJS , VJS заданы в модели, а вывод подложки p -типа соединен с самым отрицательным напряжением схемы. Для упрощения изображения схем рекомендуется отредактировать атрибуты вывода подложки в графическом образе (символе) БТ, а именно выполнить вывод подложки "невидимым" (*hidden*) и подключить к "глобальному" узлу, соединенному с источником отрицательного напряжения, например, как показано на рис. 1 для узла "substr" в программе DesignLab 8.0. Кроме того, необходимо учесть влияние корпуса [2] на характеристики ИС и результаты измерений, из которых определялись параметры модели (TF , CJ , MJ и др.).

III. На характеристики ИС оказывает влияние ряд эксплуатационных факторов, которые рекомендуется учитывать при моделировании, а именно: паразитная емкость монтажа на печатной плате (контактирующего устройства), параметры источников входных сигналов и электроизмерительных приборов (входное сопротивление и емкость, скорость нарастания выходного напряжения, полоса пропускания и др.).

IV. Несмотря на то, что в программах типа "Spice" автоматически выявляются многие ошибки в графическом описании схемы ("плавающие" выводы элементов, одинаковые позиционные обозначения и пр.), схемотехническое моделирование ИС начинают с проверки правильности функционирования по виду передаточной характеристики. При этом любое аналоговое устройство рассматривают как "черный ящик", выходной сигнал которого зависит от входного по требуемому закону.

V. Неправильное соединение БТ можно определить по значительно меньшему значению статического коэффициента β передачи тока в схеме с общим эмиттером по сравнению с типовым значением,

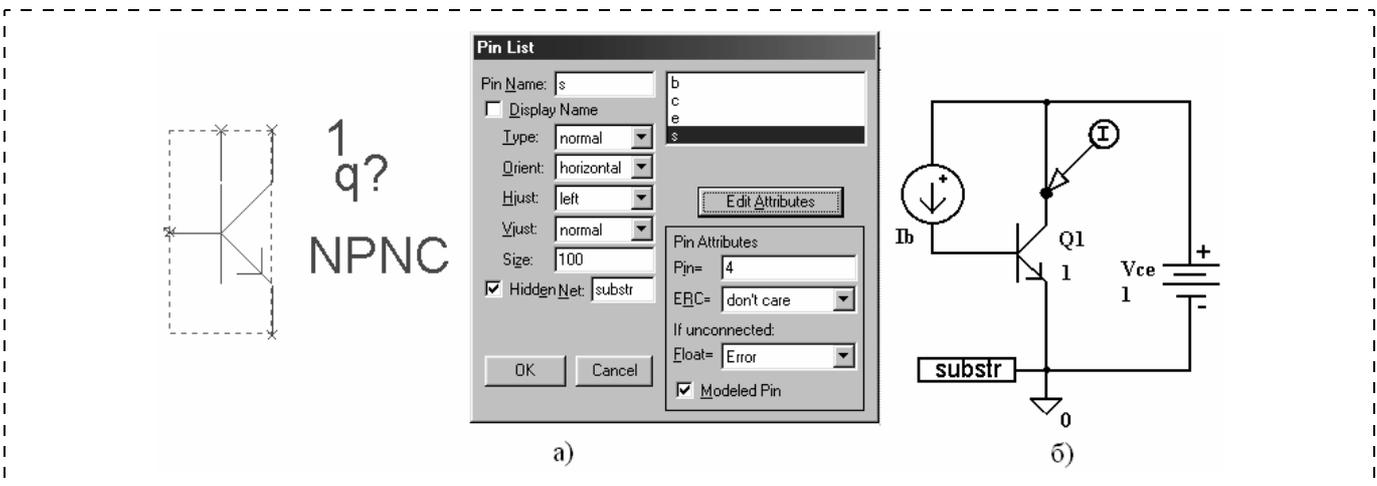


Рис. 1. "Невидимое" подключение вывода подложки интегрального БТ:

a — редактирование символа $n-p-n$ -транзистора в редакторе символов Symbol Editor программы DesignLab 8.0; *б* — соединение "глобального" узла подложки с источником отрицательного напряжения

малому напряжению на прямосмещенном эмиттерном переходе V_{BE} , небольшому коллекторному току (ориентировочно менее 1 нА). Анализ β , V_{BE} , коллекторных токов проводят во всем допустимом диапазоне изменения входного сигнала.

VI. После устранения ошибок в функционировании ИС проводят ее параметрическую оптимизацию. При этом устанавливают необходимый режим работы БТ и ПТП с помощью выбора коэффициентов масштабирования параметров $AREA$ и номиналов резисторов, определяют и при необходимости корректируют постоянные времени в основных узлах схемы. Номиналы резисторов не следует выбирать произвольным образом, так как, с одной стороны, это усложнит разработку топологии кристалла, а с другой стороны, допустимый ($\pm 20\%$) технологический разброс поверхностного сопротивления полупроводниковых слоев не позволяет получить точные значения сопротивлений. Желательно максимально унифицировать резисторы по номиналам и топологической ширине.

При схемотехническом моделировании необходимо учитывать особенности топологического исполнения интегральных БТ, ПТП, диодов. Задаваемый в описании схемы коэффициент $AREA$ может быть любой положительной величиной и приводит к следующим изменениям параметров модели БТ [3]:

$$\begin{aligned} IS &= IS \cdot AREA, & ISE &= ISE \cdot AREA, \\ IKF &= IKF \cdot AREA, & IRB &= IRB \cdot AREA, \\ ITF &= ITF \cdot AREA; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} ISC &= ISC \cdot AREA, & ISS &= ISS \cdot AREA, \\ IKR &= IKR \cdot AREA; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} RB &= RB/AREA, & RBM &= RBM/AREA, \\ RE &= RE/AREA, & RC &= RC/AREA, \\ RCO &= RCO/AREA; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} CJE &= CJE \cdot AREA, & CJC &= CJC \cdot AREA, \\ CJS &= CJS \cdot AREA. \end{aligned} \quad (4)$$

Точное выполнение соотношений (1)–(4) при синтезе схемы на уровне элементов можно получить с помощью параллельного соединения БТ с одинаковыми параметрами модели. Однако при разработке топологии ИС параллельное соединение большого числа интегральных элементов применяется крайне редко, так как увеличивает площадь кристалла. Обычно для увеличения допустимого рабочего тока в соответствии с выбранным при моделировании коэффициентом $AREA$ увеличивают площадь эмиттера вертикального транзистора S_E и число эмиттеров (коллекторов) горизонтального $p-n-p$ -транзистора. При этом относительно точно масштабируются параметры модели IS , ISE , IKF , ITF , CJE , RE , а остальные — приблизительно. Инженерная практика показала, что для топологических решений БТ с $AREA > 5$, $AREA < 0,2$ погрешность масштабирования параметров согласно выражениям (1)–(4) настолько велика, что

необходимо определять новый набор параметров модели. Кроме того, при схемотехническом моделировании коэффициент $AREA$ необходимо выбирать таким образом, чтобы его можно было реализовать при разработке топологии с выбранным шагом сетки графического редактора. Так, если параметры модели определены для горизонтального четырехэмиттерного (коллекторного) $p-n-p$ -транзистора ($AREA = 1$), то при топологическом проектировании возможно только изменение числа эмиттеров (коллекторов), и $AREA$ может принимать значения, превышающие 0,25 с шагом 0,25. Для вертикального $n-p-n$ -транзистора с топологическим размером эмиттера $1,5 \times 10$ мкм при использовании шага сетки, равного 0,5 мкм, возможно изменение

$$AREA \text{ с минимальным приращением } \frac{\Delta S_E}{S_E} = \frac{1,5 \cdot 0,5}{1,5 \cdot 10} = 0,05. \text{ Однако при изготовлении ИС}$$

вследствие существующих технологических погрешностей небольшое различие коэффициентов масштабирования, например $\frac{AREA1}{AREA2} = \frac{1}{1,05}$, может быть не воспроизводимо.

Таким образом, значение коэффициента масштабирования БТ должно быть в диапазоне от 0,2 до 5 и допускать реализацию в графическом редакторе, хотя для прецизионных и высокочастотных ИС рекомендуется более узкая область значений $0,5 < AREA < 2$.

Неидентичность БТ по параметрам V_{BE} и β можно учесть при схемотехническом моделировании путем вариации при многовариантном анализе параметров модели IS , BF , например, задав вспомогательный "глобальный" параметр $Scale$ и описав параметры модели математическим выражением $IS \cdot Scale$, $BF \cdot Scale$ в соответствии с принятыми в программе моделирования правилами. Так, для DesignLab 8.0 приведенные выше выражения будут выглядеть как $\{IS \cdot Scale\}$, $\{BF \cdot Scale\}$. При этом необходимо иметь в виду, что варьирование параметра BF приводит главным образом к изменению максимального значения коэффициента передачи тока β , а изменение IS отражает различие β и V_{BE} в диапазоне коллекторных токов.

Известно, что параметр IS обратно пропорционален толщине активной базы W_{BA} , т. е. $IS \sim W_{BA}^{-1}$ [4]. Вместе с тем, время пролета через базу TF , определяющее максимальное значение граничной частоты усиления f_T , пропорционально квадрату толщины активной базы $TF \sim W_{BA}^2$ [5]. В связи с этим возможна одновременная оценка разброса статических и динамических характеристик БТ, если при выполнении многовариантного анализа определить параметры модели математическими выражениями $IS \cdot Scale$, $TF/Scale^2$. Так, для транзи-

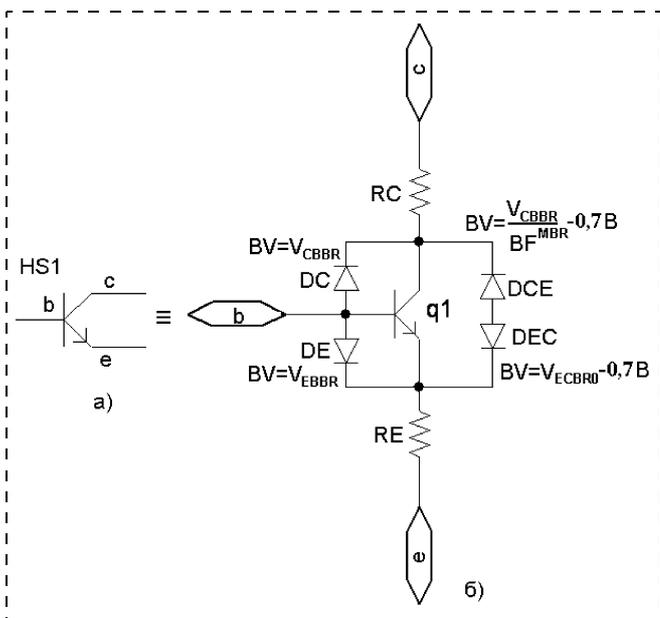


Рис. 2. Учет пробоя при моделировании БТ в виде подсхемы:
 а — условное обозначение подсхемы БТ; б — эквивалентная электрическая схема БТ. Диоды *DC*, *DE*, *DCE*, *DEC* описывают пробой перехода коллектор—база, эмиттер—база, промежуток коллектор—эмиттер, эмиттер—коллектор; *BV* — параметр модели диода; V_{EBBR} , V_{CBBR} — напряжения пробоя эмиттерного и коллекторного переходов; V_{ECBR0} — напряжения пробоя промежутка эмиттер—коллектор при разомкнутой базе

сторов АБМК_1_2 [6] изменение I_S в пределах $\pm 4\%$ приводит к одновременному изменению $\Delta V_{BE} \approx \pm 1,05$ мВ, $\Delta \beta \approx \pm 1,8\%$, $\Delta f_T \approx \pm 1,5\%$, что целесообразно применять при моделировании неидеальности плеч дифференциальных каскадов.

Моделирование пробоя БТ можно осуществить посредством подключения к $p-n$ -переходам тран-

зистора диодов с заданным напряжением пробоя. При этом сам транзистор рекомендуется описать в виде подсхемы, как показано на рис. 2, включающей сопротивления полупроводниковых областей эмиттера и коллектора. Для учета зависимости напряжения пробоя промежутка коллектор—эмиттер от β допустимо применять выражение [7]

$$V_{CEBR0} = \frac{V_{CBBR}}{\sqrt[3]{\beta}} \quad (5)$$

с экспериментально определенным показателем степени MBR и заменой β на параметр модели BF :

$$V_{CEBR0} = \frac{V_{CBBR}}{BF^{MBR}}, \quad (6)$$

где V_{CEBR0} — напряжения пробоя промежутка коллектор—эмиттер БТ при разомкнутой базе; V_{CBBR} — напряжения пробоя коллектор—база БТ при разомкнутом эмиттере.

Необходимость экспериментального определения показателя степени MBR объясняется тем, что выражение (6) справедливо для плоского коллекторного перехода. Измеренное значение V_{CBBR} зависит от радиуса кривизны и меньше напряжения пробоя плоского перехода. Правильный выбор параметров модели NBV , $NBVL$, IBV , $IBVL$ для диода *DCE* на рис. 2 позволяет получить вольт-амперную характеристику (ВАХ) $n-p-n$ -транзистора (рис. 3), хорошо согласующуюся с результатами измерений.

В программах типа "Spice" для ПТП применяется модель Шихмана—Ходжеса. Эта модель не совсем корректна для интегральных ПТП, так как не учитывает влияния ряда факторов (подпороговой области, паразитной емкости ПТП — подложка,

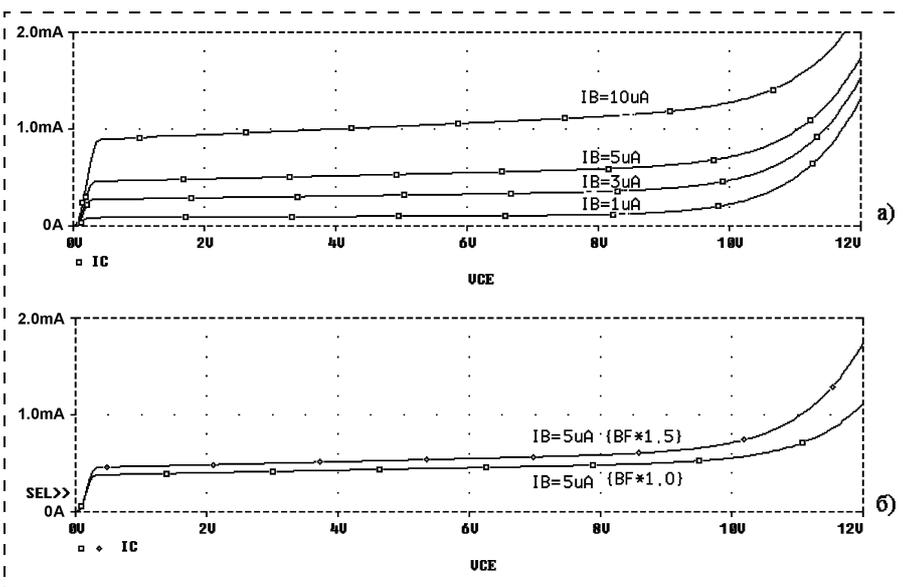


Рис. 3. Результаты моделирования транзистора, описанного в соответствии с рис. 2:
 а — выходная ВАХ в схеме с общим эмиттером $I_C = f(V_{CE}, I_B)$; б — выходная ВАХ в схеме с общим эмиттером при двух значениях параметра модели BF , приводящих к отличию максимального β приблизительно на 20 %

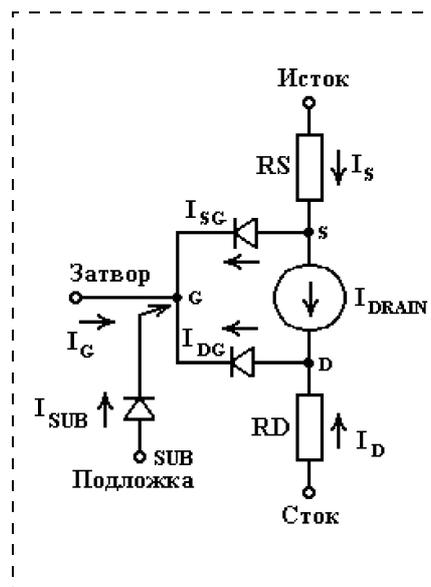


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема интегрального $p-n-p$ ПТП с учетом влияния подложки

топологической асимметрии истока и стока, конструктивно-технологического различия верхнего и нижнего затворов, неоднородного распределения примеси в канале) и приводит к погрешности расчета уровня шума в линейной области ВАХ. Однако достаточную для инженерных применений точность моделирования характеристик ПТП можно получить следующим образом:

- влияние подложки охарактеризовать с помощью полупроводникового диода, например, как показано на рис. 4 для интегрального p -ПТП;
- учесть топологическую асимметрию с помощью разных значений параметров модели для истока и стока (обычно $RS < RD$, $CGS > CGD$);
- определить несколько разных наборов параметров модели одного и того же ПТП для описания его ВАХ в диапазоне изменения тока стока.

В аналоговых ИС в качестве диодов чаще всего используются p - n -переходы БТ или ПТП. Для предотвращения режима насыщения в БТ с разомкнутым выводом коллектора или эмиттера не используемый для получения диодной ВАХ p - n -переход закорачивают. Наилучшими диодными характеристиками (низкое последовательное сопротивление, высокое быстродействие) обладает эмиттерный переход n - p - n -транзистора при соединенных между собой выводах коллектора и базы. Как указывалось ранее, модель БТ не учитывает пробой переходов, поэтому при схемотехническом моделировании диодов необходимо применять БТ в виде подсхемы, как показано на рис. 2, либо в диодное включение транзистора ввести шунтирующий диод, с помощью которого можно учесть пробой используемого перехода (рис. 5, а). В n - p - n -транзисторах современных ИС с тонкой активной базой при обратном смещении эмиттерного перехода и закороченном коллекторном возможен пробой промежутка эмиттер—коллектор. Напряжение такого пробоя V_{ECBR0} зависит от толщины активной базы, которую уменьшают для увеличения β и f_T , и может быть меньше напряжения пробоя эмиттерного перехода V_{EBBR} . Кроме того, напряжение V_{ECBR0} имеет сильный разброс по пластине и между пластинами разных партий. Для исключения пробоя промежутка эмиттер—коллектор при диодном включении n - p - n -транзистора его коллектор ре-

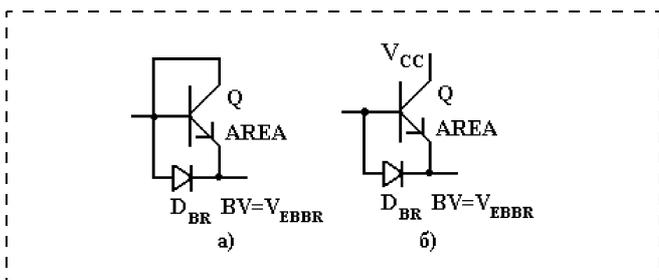


Рис. 5. Эквивалентные схемы основных диодных соединений n - p - n -транзисторов

комендуется соединить с положительным напряжением питания (рис. 5, б).

Полупроводниковые диоды на основе отдельных p - n -переходов в аналоговых ИС применяются чаще всего в качестве стабилитронов, при проектировании которых необходимо учитывать следующие специфические факторы.

1. Различные виды пробоя. Механизм пробоя имеет туннельный характер при напряжениях пробоя, меньших $4E_G/q$ (для кремния 4,44 В), а в переходах с напряжением пробоя, превышающим $6E_G/q$ (6,66 В), механизм пробоя обусловлен лавинным умножением. При напряжении пробоя в интервале от 4 до $6E_G/q$ на процесс пробоя влияют оба механизма (лавинный и туннельный) [5]. Обычно в эмиттерных переходах n - p - n -транзисторов наблюдается туннельный или смешанный пробой, а в коллекторных — лавинный.

2. Температурный коэффициент напряжения (ТКН) туннельного пробоя отрицательный, а лавинного пробоя — положительный. Соединив прямосмещенный p - n -переход с отрицательным ТКН с обратносмещенным p - n -переходом с положительным ТКН пробоя, можно получить термокомпенсированный источник опорного напряжения. Кроме того, последовательное соединение двух p - n -переходов уменьшает проходную емкость, хотя суммарная паразитная емкость с подложкой может увеличиться.

3. Туннельный пробой характеризуется "мягким" ростом тока вблизи критического напряжения, и, следовательно, стабилитрон с туннельным пробоем обладает высоким дифференциальным сопротивлением при малых токах.

4. Напряжение пробоя p - n -перехода зависит от его радиуса кривизны (глубины залегания) [5]. Пробой происходит на участках p - n -перехода с максимальной напряженностью электрического поля (обычно на искривленных участках около поверхности). Приповерхностному пробоему присущ повышенный уровень фликер-шума [8, 9], а изменение при таком пробое характеристик поверхности раздела Si—SiO₂, появление поверхностного заряда в SiO₂ приводят к временному дрейфу параметров стабилитрона. Вместе с тем, любой технологический процесс изготовления ИС допускает разброс глубины залегания полупроводниковых слоев, вызывающий дополнительный разброс напряжения пробоя. Таким образом, для уменьшения уровня шума, разброса напряжения стабилизации и дифференциального сопротивления необходимо, чтобы пробой в стабилитронах проходил в плоской части p - n -перехода, не контактирующей с поверхностью, при этом следует максимально увеличить плотность тока за счет уменьшения площади пробоя.

VII. В быстродействующих ИС рекомендуется выбирать рабочую точку БТ (I_C , V_{CE}) на спадающей ветви характеристики $\beta = \beta(I_C)$ таким образом, чтобы допустимый технологический разброс

параметров интегральных элементов не привел к значительному изменению режима работы (более $\pm 20\%$ первоначального значения). Необходимо также избегать глубокого насыщения транзисторов, в частности, уменьшения напряжения коллектор—эмиттер менее 0,2—0,4 В, резкого снижения β относительно номинального значения (более 10 раз). Целесообразно выявить транзисторы с небольшой граничной частотой усиления и увеличить ее за счет увеличения рабочего тока и/или напряжения V_{CB} . Следует учитывать, что в большинстве случаев основным требованием оптимизации является не получение уникальных характеристик ИС при заданных и жестко фиксированных значениях параметров интегральных элементов, а обеспечение удовлетворительного диапазона характеристик ИС при допустимом технологическом разбросе параметров интегральных элементов.

VIII. Завершает первую итерацию моделирования расчет наиболее важных параметров (статических и/или динамических) в наихудших условиях. Моделирование параметров ИС в наихудшем случае автоматически выполняется во многих программах типа "Spice", например, в DesignLab Release 8, Orcad 10 при задании директивы Worst Case и вариации параметров, имеющих опции DEV или LOT. Однако рекомендуется отдельно изучить влияние на основные характеристики ИС технологического разброса параметров активных, пассивных элементов и режимов эксплуатации (диапазона напряжения питания, температуры, радиационного воздействия).

IX. Для прецизионных быстродействующих ИС и ИС с предельно малыми размерами элементов после разработки топологии кристалла повторяется схемотехническое моделирование (вторая итерация) с учетом паразитных элементов, восстановленных из топологии, и реальной конструкции транзисторов. Это особенно важно при использовании в топологии функционально-интегрированных элементов, в которых одна и та же полупроводниковая область или $p-n$ -переход одновременно относятся к разным элементам. Для современных аналоговых БИС/СБИС восстановление (экстракция) схемы электрической из топологии и

повторное схемотехническое моделирование являются обязательными. Так, отсутствие учета реального топологического исполнения может привести почти к 100 % погрешности моделирования [10] и сводит на нет значительные временные и материальные затраты на разработку высокоточных моделей активных элементов и методов идентификации их параметров.

Выводы

На основе инженерного опыта разработан маршрут схемотехнического моделирования биполярно-полевых аналоговых ИС, включающий последовательность этапов моделирования, рекомендации по выбору коэффициента масштабирования биполярных транзисторов и конструкции стабилизаторов, одновременную оценку разброса статических и динамических характеристик БТ, модифицированные эквивалентные электрические схемы биполярного транзистора и его диодного соединения с учетом влияния пробоя.

Список литературы

1. **Абрамов И. И., Дворников О. В.** Тенденции и проблемы проектирования прецизионных аналоговых интерфейсов // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 10. С. 23—35.
2. **Дворников О. В.** Описание элементов в Pspice для высокоточного моделирования аналоговых биполярных ИС. Часть 3. Учет влияния паразитных элементов // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сб. материалов IV Межд. научно-практ. семинара. Шахты: Изд. ЮРГУЭС, 2005. С. 69—73.
3. **Pspice. Reference Guide.** <http://www.orcad.com>.
4. **Дворников О. В.** Анализ конструктивно-технологических параметров, вызывающих рассогласование $n-p-n$ -транзисторов // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1989. Вып. 4. С. 50—56.
5. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
6. **Дворников О. В., Чеховский В. А.** Аналоговый биполярно-полевой БМК с расширенными функциональными возможностями // Chip News. 1999. N 2. С. 21—24.
7. **Матсон Э. А.** Конструкция и технология микросхем. Мн.: Выш. шк., 1985. 207 с.
8. **McDonald B. A.** Avalanche degradation of hFE // IEEE Transactions on Electron Devices. 1970. V. ED-17. N 10. P. 371—378.
9. **Verwey J. F.** On the emitter degradation by avalanche breakdown in planar transistors // Solid-State Electronics. 1971. V. 14. P. 775—782.
10. **McAndrew C. C.** Practical modeling for circuit simulation // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1998. V. 33, N 3. P. 439—448.

УДК 621.3.049.77

Р. Д. Тихонов, канд. техн. наук,
НПК "Технологический центр МИЭТ"

ДВУХКОЛЛЕКТОРНЫЙ МАГНИТОТРАНЗИСТОР: ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, АБСОЛЮТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ШУМЫ

С помощью современного приборно-технологического моделирования исследованы распределения носителей заряда, плотности токов и скорости рекомбинации в двухколлекторном латеральном биполярном магниточувствительном транзисторе, сформированном в кармане при внешнем соединении контактов к подложке и к карману. Проведено экспериментальное исследование двухколлекторного латерального биполярного магнитотранзистора с базой в кармане как датчика слабых магнитных полей. Определена абсолютная чувствительность 900 В/Тл, напряжение шума в рабочем режиме и разрешающая способность $5 \cdot 10^{-10}$ Тл.

Конструктивно-технологический потенциал микроэлектроники позволяет создавать микросистемы существенно меньших размеров, с новыми уникальными параметрами и, что особенно важно, в виде единой интегральной схемы, что уменьшает их стоимость [1]. В настоящее время широкое распространение получили изделия микромагнитотранзисторной электроники [2]. В качестве чувствительного элемента большие перспективы имеет биполярный магнитотранзистор (БМТ), который обладает высокой чувствительностью и избирательностью по направлению магнитного поля. Ранее было показано, что относительная чувствительность прибора определяется распределением носителей заряда в магнитном поле [3]. В зависимости от режима прибора чувствительность может изменять знак. Отрицательная чувствительность возникает в БМТ при

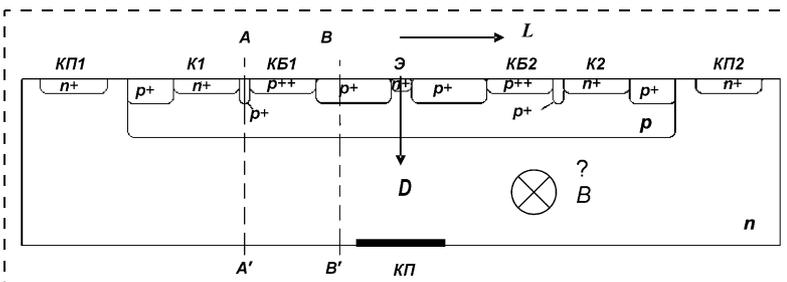


Рис. 1. Структура БМТ

равенстве напряжений на базе-кармане и подложке и низком уровне инжекции [4].

Двухколлекторный латеральный биполярный магнитотранзистор

В целях изучения концентрационно-рекомбинационного механизма работы БМТ [5] с помощью пакета программ двумерного приборно-технологического моделирования ISE TCAD проведен вычислительный эксперимент по сравнению двух вариантов БМТ, сформированных в кармане и при равенстве потенциалов контактов к базе-карману и к подложке. В первом варианте два контакта к подложке располагаются на верхней стороне подложки, а во втором варианте один контакт расположен на нижней стороне подложки.

Структура и характеристики БМТ. На рис. 1 представлена структура БМТ с эмиттером Э n^+ -типа проводимости, с двумя контактами p^+ -типа проводимости (КБ1 и КБ2) к p -диффузионной базе-карману, с двумя коллекторами n^+ -типа проводимости (К1 и К2), с двумя контактами n^+ -типа проводимости (КП1 и КП2) к верхней стороне подложки n -типа проводимости и с одним контактом КП снизу подложки. Размеры элементов по горизонтали: Э — 4 мкм, КБ1, КБ2 — 20 мкм, К1, К2 — 20 мкм, КП1, КП2 — 20 мкм. Глубина кармана — 5 мкм, длина электродов перпендикулярно плоскости — 80 мкм. Расстояния между элементами Э — КБ1, КБ2 — 20 мкм, КБ1, КБ2 — К1, К2 — 3 мкм. Между электродами имеется оксид и под ним p -области охраны.

Распределение примеси дано в логарифмическом масштабе на рис. 2 для сечения D , проходящего через середину эмиттера. Подложка n -типа проводимости имеет концентрацию фосфора 10^{15} см $^{-3}$ и концентрацию электронов N_e . В базе-кармане концентрация бора уменьшается от максимального значения $5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ около эмиттера до 10^{15} см $^{-3}$ на переходе карман—подложка на глубине 4,9 мкм и концентрацию дырок N_h . В эмиттере максимальная концентрация фосфора и N_e составляет $6 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$.

Электрический режим работы БМТ: напряжение коллекторов $U_{к1,2} = 1,5$ В, базы и подложки $U_{бэ} = 0,45 \div 1$ В. Магнитное поле с индукцией $B = 1,81$ Тл направлено от наблюдателя параллельно поверхности транзистора.

До порога срабатывания при напряжении эмиттер—база $U_{бэ} = 0,74$ В сила токов рабочих коллекторов меньше 10^{-11} А. При увеличении $U_{бэ}$ и тока коллекторов относительная чувствительность принимает сначала отрицательные, а потом положительные значения.

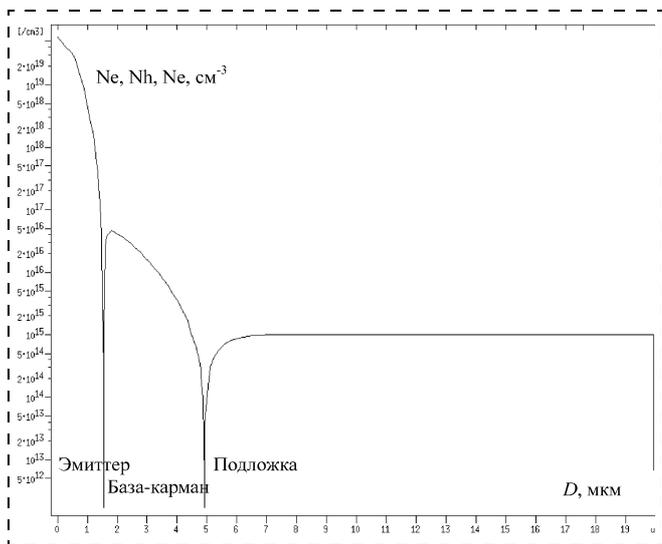


Рис. 2. Распределение примеси в структуре БМТ по направлению D (см. рис. 1)

При максимальном отрицательном значении чувствительности напряжение $U_{\text{бэ}} = 0,755$ В, а ток эмиттера в 100 раз больше тока базы, т. е. практически весь ток эмиттера уходит в подложку, а токи измерительных коллекторов в миллион раз меньше тока подложки. Это режим низкого уровня инжекции. При этом наблюдается отрицательная относительная чувствительность

$$S_{RI} = \frac{(I_{\text{к1}} - I_{\text{к2}})}{B(I_{\text{к1}} - I_{\text{к2}})},$$

где $I_{\text{к1}}$, $I_{\text{к2}}$ — токи коллекторов, а B — магнитная индукция.

При напряжении $U_{\text{бэ}} = 1$ В ток эмиттера только в 5 раз больше тока базы, ток эмиттера почти поровну делится между коллекторами и подложкой. Это режим высокого уровня инжекции. При этом чувствительность положительная.

Распределение концентрации носителей заряда, плотности тока и скорости рекомбинации

Концентрации электронов, инжектированных из эмиттера для режима максимальной отрицательной чувствительности, распределяются следующим образом. В кармане около эмиттера концентрация электронов немного меньше концентрации дырок и значительно меньше при удалении от эмиттера по направлению к рабочим коллекторам, где уровень инжекции низкий. В области около эмиттера в направлении перехода карман—подложка концентрация инжектированных электронов больше концентрации дырок в кармане и концентрации электронов в подложке, уровень инжекции высокий. Рекомбинация носителей заряда ограничивает растекание электронов вдоль поверхности, а в направлении перехода карман—подложка и вдоль перехода — не ограничивает.

Распределение линий тока для электронов показывает, что при режиме низкого уровня инжекции линии тока проходят от контактов к подложке к эмиттеру через подложку и только около самого эмиттера — через карман. Небольшая часть линий тока проходит от коллекторов через область кармана. При воздействии магнитного поля возникает асимметрия расположения линий тока. Справа линии тока в подложке отодвигаются от поверхности, а слева приближаются к поверхности. Линии тока от коллекторов проходят через область кармана. Вертикальная составляющая электронного потока, выходящего из эмиттера в подложку, сдвигается в кармане влево.

Изменяется также положение линий тока дырок. Из контактов к базе выходят два потока дырок. Они текут в сторону эмиттера и в основном направлены почти вертикально в сторону подложки, а в магнитном поле они сдвигаются в одну и ту же правую сторону. Происходит встречное движение потоков электронов и дырок слева от эмиттера и в противоположных направлениях — справа от эмиттера.

На уровне перехода карман—подложка распределение плотности тока электронов и дырок следующее. До края левого базового контакта электронный и дырочный токи в магнитном поле увеличиваются и превышают ток без магнитного поля, а до правого контакта в базе — уменьшаются. Напротив базовых контактов и далее слева от эмиттера электронный и дырочный токи уменьшаются, а справа — превышают ток без магнитного поля. В магнитном поле происходит перераспределение потоков электронов и дырок одновременно, т. е. изменяется протекание электронно-дырочной плазмы. Слева от эмиттера увеличиваются токи в подложку около эмиттера, электронный ток рабочего коллектора и дырочный ток базы уменьшаются. Справа от эмиттера уменьшается ток в подложку около эмиттера, увеличиваются электронный ток рабочего коллектора и дырочный ток базы.

Полученные расчетные распределения показывают, что в структуре биполярного двухколлекторного магнитотранзистора действует поперечный гальваномагнитный эффект. Магнитное поле воздействует на токи электронов и дырок силой Лоренца и приводит к изменению распределения линий тока и их эффективной длины.

Изменение концентраций электронов и дырок в силу условия электронейтральности происходит на одну и ту же величину, поэтому картины изменения распределения концентраций электронов и дырок имеют одинаковый характер. В кармане слева от эмиттера в области между эмиттером и контактом к базе происходит увеличение концентрации электронов и дырок, а справа — уменьшение их концентраций. Дальше от эмиттера, около контакта к базе, изменение концентраций носит противополо-

ложный характер: слева наблюдается уменьшение, а справа увеличение концентрации носителей.

Изменение распределения концентрации носителей заряда определяет магнитоцентрационный эффект. В данной структуре БМТ эффект проявляется в условиях отсутствия внешнего поля на переходе карман—подложка при диффузионном переносе инжектированных носителей заряда двух знаков, т. е. при воздействии магнитного поля на электронно-дырочную плазму.

Соответственно изменению концентраций электронов и дырок происходит гальваномагнито-рекомбинационный эффект: в магнитном поле в кармане и в подложке вблизи кармана между эмиттером и контактом к базе скорость рекомбинации слева от эмиттера увеличивается, а справа — уменьшается (рис. 3). В областях контакта к базе и до коллекторов эффект имеет противоположный знак: скорость рекомбинации слева от эмиттера уменьшается, а справа — возрастает.

Гальваномагнитные эффекты изменения концентрации и рекомбинации носителей заряда в области между эмиттером и базовым контактом приводят к снижению потока электронов, текущих в сторону левого коллектора. Со стороны правого коллектора плотность потока электронов растет, поэтому ток коллектора $K2$ оказывается больше, чем ток коллектора $K1$, что дает отрицательную чувствительность по току БМТ.

При расположении контакта к подложке на нижней поверхности отрицательная чувствительность не наблюдается. Характер распределения тока изменяется при изменении расположения контакта к подложке. Линии тока электронов проходят в основном в вертикальном направлении, поэтому сила токов коллекторов при одинаковом напряжении смещения снижается по сравнению со структурой с верхними контактами к подложке.

На уровне перехода карман—подложка распределение плотности тока электронов и дырок пока-

зывает, что до края левого базового контакта и коллектора электронный и дырочный токи в магнитном поле увеличиваются и превышают ток без магнитного поля, а до правого контакта в базе и коллектора — уменьшаются. С левой стороны за контактом к базе плотность тока электронов в магнитном поле выше, чем без магнитного поля, а с правой стороны за контактом к базе плотность тока электронов падает. Ток коллектора $K1$ оказывается больше, чем ток коллектора $K2$, что соответствует положительной чувствительности по току БМТ.

В кармане слева от эмиттера в области между эмиттером и контактом к базе происходит увеличение концентрации электронов и дырок, а справа — уменьшение их концентраций, что приводит к соответствующему изменению скорости рекомбинации (рис. 4).

Расположение контакта к подложке снизу дает малую плотность электронного тока в кармане между эмиттером и контактом к базе, что определяет незначительное увеличение при воздействии магнитного поля скорости рекомбинации в кармане слева от эмиттера. Кроме того, между контактом к базе и коллектором добавляется ток из потока электронов, текущих в подложке вне кармана. Эта добавка растет в магнитном поле и поэтому оказывает существенное влияние на ток коллекторов и на знак чувствительности.

Биполярный магнитотранзистор с базой в кармане (БМТБК)

Абсолютная чувствительность БМТБК. Ранее были описаны [6] структура и характеристики биполярного магнитотранзистора с базой в кармане (БМТБК) с дополнительным $p-n$ -переходом для улучшения изоляции прибора от других элементов интегральных микросистем. Установлено, что двухколлекторный латеральный биполярный магнитотранзистор с базой, сформированной в кармане, может быть использован как высокочувствитель-

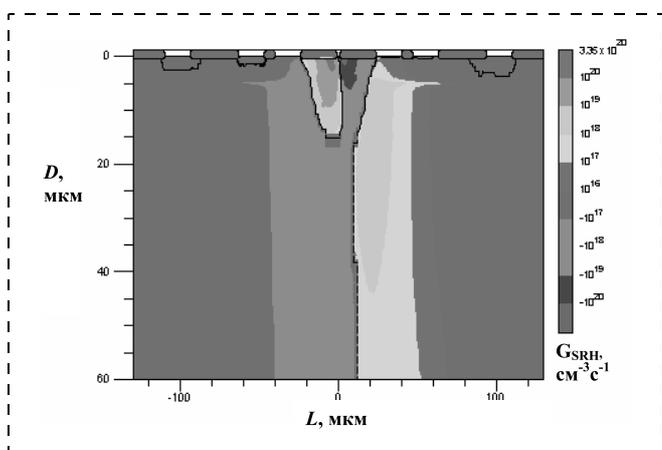


Рис. 3. Распределение разности концентраций скорости рекомбинации по Шокли — Рида — Холла в магнитном поле и без поля при $U_{бз} = 0,75$ В при контактах к подложке на верхней поверхности

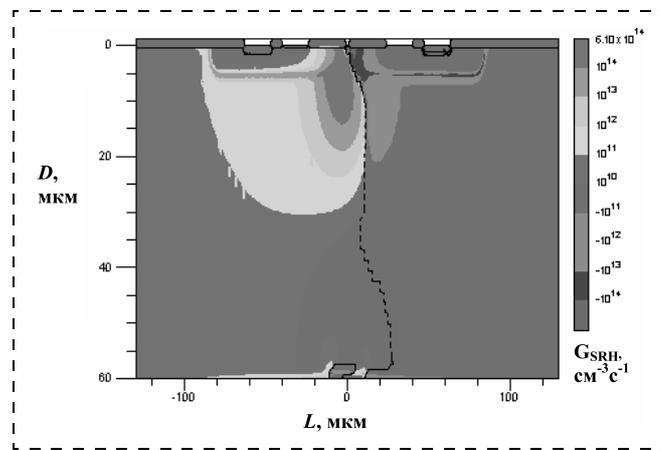


Рис. 4. Распределение разности концентраций скорости рекомбинации по Шокли — Рида — Холла в магнитном поле и без поля при $U_{бз} = 0,75$ В при контактах к подложке на нижней поверхности

ный датчик для слабых магнитных полей. Для определения предельных возможностей проведены исследования абсолютной чувствительности БМТБК в схеме с нагрузочными резисторами в магнитном поле с индукцией в несколько милитесл и напряжения шума в рабочем режиме.

Измерение абсолютной чувствительности на образцах БМТБК проведено при напряжении питания 2 В и сопротивлениях нагрузки 2407 кОм в магнитном поле, создаваемом в катушке при пропускании постоянного тока. В магнитном поле происходит изменение тока базы-кармана, который практически равен току эмиттера. При изменении индукции магнитного поля с 9 до 10 мТл ток базы-кармана $I_{б.кар}$ изменяется на 0,2 мА. Напряжение на коллекторе изменяется на 0,9 В, что при нагрузке 2,4 МОм соответствует изменению тока коллектора на 0,38 мкА (рис. 5). Изменение тока базы-кармана в 500 раз больше, чем изменение тока коллектора по абсолютной величине. Относительное изменение тока базы-кармана 5 %, а тока коллектора 50 %. Небольшое относительное изменение тока $I_{б.кар}$ приводит к большому относительному изменению тока I_K .

Абсолютная чувствительность, равная изменению напряжения на коллекторе, отнесенному к изменению индукции dU_K/dB (0,9 В/1 мТл), составляет 900 В/Тл. Высокое значение чувствительности определяется тем, что магнитное поле воздействует силой Лоренца на относительно большой ток $I_{б.кар} = 4,5$ мА, а проявляется влияние магнитного поля на выходе схемы в изменении относительно малого тока коллектора $I_K = 0,4$ мкА, который меньше тока $I_{б.кар}$ в 11 000 раз.

Высокое значение отношения токов $I_{б.кар}/I_K$ определяет возможность использования высокоомного нагрузочного сопротивления в цепи коллектора. Вместе с высоким коэффициентом передачи изменения тока $I_{б.кар}$ в изменение тока коллектора I_K большое нагрузочное сопротивление

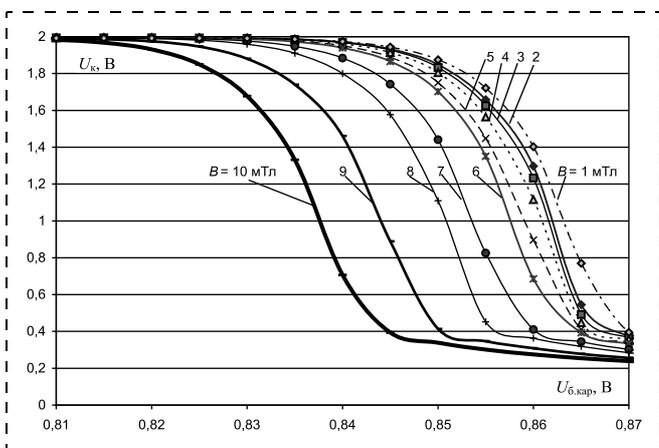


Рис. 5. Абсолютная чувствительность биполярного магнитотранзистора с базой в кармане (БМТБК)

определяет большую абсолютную чувствительность БМТБК.

Возможность работы с высокой чувствительностью при малом токе коллектора ставит вопрос о пределе измеряемого значения магнитного поля, накладываемом шумами.

Шумы БМТБК. Согласно [7], шум является фундаментальным параметром, определяющим наименьшее значение магнитного поля B_{min} , которое может детектировать БМТ сенсор. Шум сенсора определяется и измеряется по его спектральной характеристике мощности, т. е. частотному спектру среднего квадратичного значения флуктуирующих величин. Магнитное поле $B_{эКВ}$, эквивалентное шуму в полосе частот Δf , для отношения сигнал—шум, равного 1, определяется как

$$B_{эКВ} = N/S, \quad (1)$$

где N — шум (ток или напряжение); S — магнито-чувствительность.

Исследование шума латеральных двухколлекторных магнитотранзисторов показало [8], что при формировании БМТ в подложке шум носит характер $1/f$ в полосе частот от 1 Гц до 1 кГц и изменяется пропорционально I_E^2 . Природа шума $1/f$ связывается с флуктуациями проводимости в пространстве между эмиттером и коллектором. Для частот более 1 кГц появляется дробовой шум, пропорциональный току I_E (и I_K), который превосходит $1/f$ шум. Указывается, что инжектированные носители влияют на дробовой шум. Вместе с тем, на шум не оказывают существенного влияния напряжение коллектора, начальный разбаланс токов коллекторов, температура в диапазоне от 0 до 70 °С, значение магнитной индукции.

В работе [9] показана аналогичная зависимость дробового шума латеральных двухколлекторных магнитотранзисторов при формировании БМТ в кармане от структуры прибора и режима работы, но при этом, однако, отсутствует $1/f$ шум.

Внутренний шум БМТ может быть существенно уменьшен, как показано в работе [10], за счет выбора геометрии прибора и режима работы при общем токе менее 1 мА.

Согласно [11], на ток коллектора БМТ основное влияние оказывают шум типа $1/f$ и дробовой шум. Из рассмотрения результатов работы [4] следует, что среднеквадратичный ток дробовых шумов в полосе частот Δf определяется выражением

$$\{i_{CS}^2\} = 2qI_K\Delta f, \quad (2)$$

где q — заряд электрона.

Показано, что геометрия прибора и режим работы могут быть выбраны так, чтобы получить минимальное значение мощности шума. Предполагается, что шум типа $1/f$ в БМТ, сформированном в кармане, на частотах 10 Гц может быть в 100 раз меньше, чем в датчиках Холла.

Характеристики БМТ проанализированы в работе [12] при нагрузочных сопротивлениях 24 кОм и напряжении питания 9 В. Максимальная чувствительность прибора составляла 1,2 В/Тл. Измерения двухколлекторного $n-p-n$ -транзистора, сформированного в p -подложке, проводились в магнитном поле $B = 30$ мТл при токе базы 0,45 мА. Для измерения собственных шумов датчиков магнитного поля использовалась установка на основе селективного нановольтметра SNT237, обеспечивающего возможность измерения как интегрального значения шума в диапазоне 1 Гц — 100 кГц, так и спектральной плотности шумов в указанном частотном интервале. Измерение собственных шумов показало магнитное поле 2 мкТл, эквивалентное шуму при 1 кГц.

Измерение шумов БМТБК проведено с помощью селективного нановольтметра типа UNIPAN 237 с селективностью измерения 25 дБ/октава. Образцы размещались в экранированном от электромагнитных помех боксе с батарейным источником питания постоянного напряжения. Измерительная система та же самая, что использовалась в работе [12].

Исследование БМТБК проводилось в электрическом режиме с напряжением питания 5 В и сопротивлениями нагрузки в цепи коллекторов 270,3 кОм, напряжение смещения от питания подавалось через сопротивление 1,8 кОм на контакты к базе и одновременно на контакты к карману. Контакты к подложке и к эмиттеру заземлялись.

Измерения, проводимые по очереди на двух коллекторах относительно земли, показали идентичные результаты. Зависимость измеренного напряжения шума от частоты, на которой проводилось измерение, представлена на рис. 6. Результаты измерения показывают, что в отличие от работ [8, 12] в БМТБК отсутствуют низкочастотные шумы вида $1/f$. Отсутствие шума $1/f$ согласуется с работой [9], где так же, как в нашем приборе, исследовался

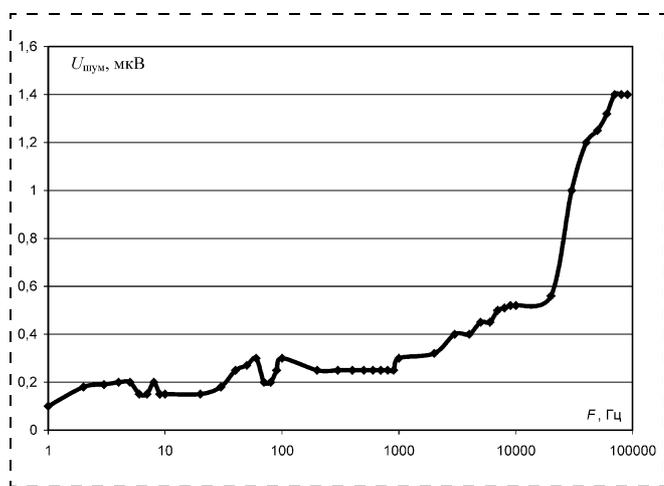


Рис. 6. Зависимость напряжения шума от частоты сигнала при измерениях БМТБК

довался БМТ, сформированный в кармане. Можно считать, что ограничение области базы карманом важно для снижения этого вида шума.

Напряжение шума при частотах от 1 Гц до 20 кГц изменяется от 0,1 до 0,5 мкВ, что существенно меньше, чем в работах [8—10, 12]. Рассчитанная по формуле (1) обнаружительная способность составляет $5 \cdot 10^{-10}$ Тл⁻¹. При большей частоте (100 кГц) напряжение шума увеличивается до 1,4 мкВ.

Малое значение дробового шума вполне может быть связано с малым током коллектора, что согласно работе [10] способствует снижению уровня шума.

По сравнению с исследованными ранее структурами БМТ введение дополнительных электродов к карману и подложке в структуре БМТБК и режим работы с равным потенциалом базы и кармана, создающим порог срабатывания и малую силу тока коллектора относительно тока эмиттера, обеспечивают снижение уровня шума. Малое напряжение шума и его уменьшение при уменьшении тока коллектора позволяют считать, что шум не ограничивает работу БМТБК при малом токе коллектора.

Список литературы

1. **Королев М. А., Чаплыгин Ю. А., Тихонов Р. Д.** Интегрированные микросистемы — перспективные элементы микросистемной техники // Микросистемная техника. 2003. № 7. С. 6—7.
2. **Бараночников М. Л.** Микромагнитоэлектроника // М.: ДМК Пресс, 2001.
3. **Козлов А. В., Ревелева М. А., Тихонов Р. Д.** Влияние распределения носителей заряда на относительную чувствительность биполярного двухколлекторного магнитотранзистора // Микросистемная техника. 2003. № 10. С. 17—22.
4. **Козлов А. В., Тихонов Р. Д.** Отрицательная чувствительность по току биполярного магнитотранзистора // Микросистемная техника. 2004. № 11. С. 19—22.
5. **Тихонов Р. Д.** Концентрационно-рекомбинационный механизм чувствительности биполярных магнитотранзисторов // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 6. С. 464—467.
6. **Тихонов Р. Д.** Исследование биполярного магнитотранзистора с базой в кармане // Датчики и системы. 2004. № 12. С. 42—46.
7. **Roumenin C. S.** Bipolar magnetotransistor Sensors. An invited review // Sensors and Actuators A. 1990. V. 24. N 83.
8. **Chovet A., Roumenin Ch. S., Dimopoulos G. and Mathieu N.** Comparison of noise properties of different magnetic-field semiconductor sensors // Sensors and Actuators. 1990. A21—A23. P. 790—794.
9. **Popovic R. S., Widmer R.** Magnetotransistor in CMOS technology // IEEE Transactions of Electron Devices. 1986. ED-33. P. 1334—1340.
10. **Nathan A., Baltés H. P., Briglio D. R., Doan M. T.** Noise correlation in dual-collector magnetotransistor // IEEE Transactions of Electron Devices, 1989. ED-36. P. 1073—1075.
11. **Балтес Г. П., Попович Р. С.** Интегральные полупроводниковые датчики магнитного поля // ТИИЭР. 1986. Т. 74. № 8. С. 60—90.
12. **Chaplygin Y. A., Galushkov A. I., Romanov I. M., Volkov S. I.** Experimental research on the sensitivity and noise level of bipolar and CMOS integrated magnetotransistors and judgement of their applicability in weak-field magnetometers // Sensor and Actuators A, Physical. 1995. V. 49, N 3. P. 163—166.

И. В. Годовицын, канд. техн. наук,
НПК "Технологический центр МИЭТ"

РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВЧ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ АНАЛИТИЧЕСКИМ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫМ МЕТОДАМИ

С помощью метода минимизации потенциальной энергии (метод Ритца) проведен расчет деформации электростатических ВЧ переключателей в двухмерном приближении. Для проверки полученных результатов также выполнен расчет деформации переключателей с помощью конечно-элементного метода (программа ANSYS). Показано хорошее совпадение результатов и сделан вывод о возможности использования метода Ритца для расчета деформации электростатических ВЧ переключателей.

Введение

В настоящее время ВЧ переключатели с электростатическим управлением наиболее распространены среди МЭМС-переключателей, разрабатываемых для применения в перспективной ВЧ аппаратуре. Электростатический актюатор (микропривод), через который осуществляется включение и выключение переключателя, состоит из двух электрически изолированных обкладок. Одна из обкладок расположена на неподвижном основании, другая — на упругом элементе переключателя. При подаче разности потенциалов на обкладки между ними возникают силы электростатического притяжения, в результате действия которых упругий элемент притягивается к основанию, замыкая контактные элементы. Преимущества электростатического актюатора состоят в крайне малой потребляемой мощности (ток потребляется только при переключении, типовое значение потребляемой мощности на один цикл переключения — 0,1 нВт) [1], простота изготовления и относительно высокая скорость переключения (1—10 мкс) [1]. К недостаткам электростатического актюатора можно отнести высокое управляющее напряжение, которое обычно составляет несколько десятков вольт, что значительно превышает типовые значения напряжения питания современных интегральных схем. Возможности снижения управляющего напряжения электростатического актюатора ограничены не только конструкцией актюатора, но и требованиями быстродействия, поэтому для совмещения электростатических ВЧ переключателей со схемами управления предлагается использовать умножители напряжения, что оказывает влияние на

быстродействие и потребляемую мощность связи "переключатель — умножитель напряжения" [2].

К настоящему моменту ведущими фирмами мира разработан ряд электростатических ВЧ переключателей, основные параметры которых (вносимые потери, развязка "вход—выход") превышают аналогичные параметры традиционных переключателей на рпн-диодах и МОП-транзисторах [3]. Вносимые потери таких переключателей составляют 0,1—0,25 дБ, развязка "вход—выход" — 30—40 дБ на частоте нескольких гигагерц. Переключатели демонстрируют хорошее время наработки на отказ и представляют привлекательную основу для создания компактных фазосдвигающих устройств, фильтров и других компонентов для ВЧ устройств [4]. На рис. 1 приведена микрофотография электростатического переключателя, изготовленного в научном центре корпорации Rockwell (США) [5].

Расчет деформации электростатических ВЧ переключателей представляет собой сложную инженерную задачу в силу обратной пропорциональной зависимости силы электростатического притяжения от расстояния между электродами. В случае произвольной геометрии переключателя расчет деформации возможен только с помощью численных методов (конечно-элементного, конечно-разностного). Однако, если переключатель имеет геометрически правильную форму и может быть аппроксимирован двухмерной моделью, то появляется возможность использовать для расчета деформации упрощенные аналитические методы.

В данной статье с помощью метода минимизации потенциальной энергии (метод Ритца) проведен расчет деформации электростатических ВЧ переключателей в двухмерном приближении. Для проверки полученных результатов также выполнен расчет деформации переключателей с помощью конечно-элементного метода (программа ANSYS). Показано хорошее совпадение результатов и сделан вывод о возможности использования метода

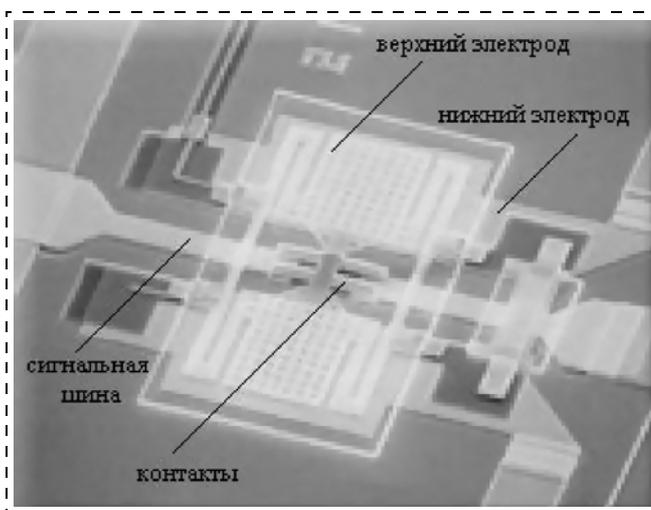


Рис. 1. Электростатический микропереключатель, изготовленный в научном центре корпорации Rockwell (США) [5]

Ритца для расчета деформации электростатических ВЧ переключателей.

Метод минимизации потенциальной энергии (метод Ритца)

Метод Ритца основан на рассмотрении состояния равновесия упругой системы под нагрузкой [6]. Простым примером такой системы, находящейся в равновесии, может служить металлический шарик, подвешенный на пружине. При отсутствии внешнего воздействия такая система переходит в состояние устойчивого равновесия, т. е. в такое состояние, в котором ее потенциальная энергия минимальна. Это означает, что любое малое возмущение системы приводит к увеличению ее потенциальной энергии и вызывает силы, возвращающие систему в состояние равновесия.

Суммарный потенциал Π такой системы состоит из энергии деформации и потенциала нагрузки:

$$\Pi = U + V.$$

Принцип минимизации потенциальной энергии говорит, что в состоянии равновесия потенциальная энергия системы минимальна, т. е. ее приращение при бесконечно малом изменении координат равно нулю:

$$\delta\Pi = \delta U + \delta V = \delta(U + V) = 0. \quad (1)$$

Энергия деформации и потенциал нагрузки системы могут быть выражены через функции смещения структуры по координатам x , y и z . Метод Ритца использует принцип минимизации потенциальной энергии для нахождения функций смещения структуры. Для этого функции смещения задаются в параметрическом виде:

$$\begin{aligned} w_x &= f_1(x, y, z, A_1, \dots, A_n); \\ w_y &= f_2(x, y, z, B_1, \dots, B_m); \\ w_z &= f_3(x, y, z, C_1, \dots, C_k). \end{aligned}$$

Затем через эти функции выражается энергия деформации и потенциал нагрузки и, соответственно, потенциальная энергия системы:

$$\Pi = F(x, y, z, A_1, \dots, A_n, B_1, \dots, B_m, C_1, \dots, C_k). \quad (2)$$

К выражению (2) применяется принцип минимизации (1), что в результате дает следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial A_1} = 0 \dots \frac{\partial \Pi}{\partial A_n} = 0; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial B_1} = 0 \dots \frac{\partial \Pi}{\partial B_m} = 0; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial C_1} = 0 \dots \frac{\partial \Pi}{\partial C_k} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В результате для конкретного набора граничных условий и параметров нагрузки структуры мы получаем систему из $n + m + k$ уравнений, которые могут быть решены численно относительно коэффициентов $A_1 - A_n$, $B_1 - B_m$, $C_1 - C_k$.

Основным условием, обеспечивающим точность решения при использовании метода Ритца, является правильный выбор функций смещения. Эти функции должны удовлетворять граничным условиям закрепления структуры и иметь относительно простой аналитический вид. Обычно в качестве таких функций используются полиномиальные функции.

Расчет деформации балки под действием силы электростатики методом Ритца

В качестве объекта расчета рассматривались балочная структура, жестко закрепленная одним и двумя концами (рис. 2). Данная структура является двухмерным приближением трехмерной балки постоянной ширины и толщины.

Вид функций смещения для двух способов закрепления балки определяется граничными условиями. В таблице приведены граничные условия и функции смещения для двух способов закрепления балки [7]. В таблице использованы следующие обозначения: w — функция вертикального смещения, u — функция горизонтального смещения.

Для достижения высокой точности решения необходимо изначально рассматривать деформацию балки под действием силы электростатики в приближении большого смещения. В этом приближе-

Граничные условия и функции смещения для двух способов закрепления балки

Вид закрепления	Граничные условия	Функции смещения
Один конец	$w(0) = 0; \frac{d}{dx} w(0) = 0; \frac{d^2}{dx^2} w(L) = 0; u(0) = 0$	$w = Ax^2 \left[B + Cx + \frac{-1(B + 3CL)}{6L^2} x^2 \right]; u = Mx^2 + Nx$, где A, B, C, M, N — параметры функций смещения
Два конца	$w(0) = 0; w(L) = 0; \frac{d}{dx} w(0) = 0; \frac{d}{dx} w(L/2) = 0;$ $\frac{d}{dx} w(L) = 0; u(0) = u(L/2) = u(L) = 0$	$w = w_0 \left(\sin \left(\frac{\pi x}{L} \right) \right)^2; u = Dx \left(x - \frac{L}{2} \right) (x - L)$, где W_0, D — параметры функций смещения

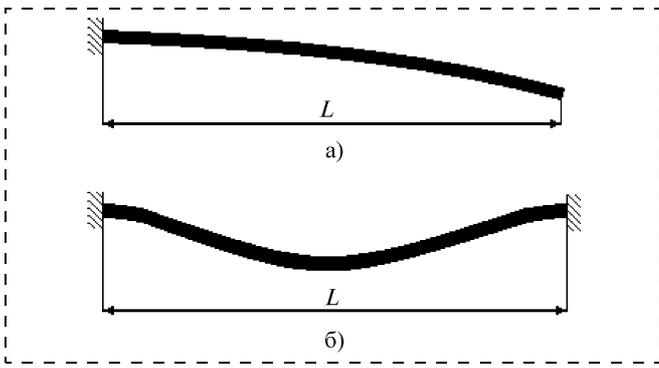


Рис. 2. Балка, жестко закрепленная одним (а) и двумя (б) концами

нии энергия деформации балки складывается из энергии изгиба и энергии растяжения:

$$U = U_b + U_{st}.$$

Энергия изгиба балки

$$U_b = \frac{EJ}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx,$$

где E — модуль упругости; $J = \frac{bh^3}{12}$ — момент инерции балки; h — толщина балки; b — ширина балки.

Энергия растяжения балки

$$U_{st} = \frac{Ehb}{2} \int_0^L \left[\frac{d}{dx} u + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{dx} w \right)^2 \right]^2 dx.$$

Работа электростатической силы по изгибу балки описывается следующим выражением:

$$W_{esf} = \int_0^L \int_{d_0}^w \frac{\varepsilon \varepsilon_0 b V^2}{2z^2} dz dx,$$

или после интегрирования

$$W_{esf} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 b V^2 L}{2d_0} \int_0^L \frac{w(x)}{d_0 - w(x)} dx,$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; d_0 — начальный зазор между балкой и электродом; V — напряжение между электродом и балкой.

Потенциал электростатической силы равен работе с отрицательным знаком:

$$V_{esf} = -W_{esf} = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 b V^2 L}{2y_0} \int_0^L \frac{w(x)}{d_0 - w(x)} dx.$$

Таким образом, потенциальная энергия балки, деформированной силой электростатики, описывается следующим выражением:

$$\Pi = \frac{EJ}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{Ehb}{2} \int_0^L \left[\frac{d}{dx} u + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{dx} w \right)^2 \right]^2 dx - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 b V^2 L}{2y_0} \int_0^L \frac{w(x)}{d_0 - w(x)} dx. \quad (4)$$

После подстановки в выражение (4) функций смещения для каждого способа закрепления балки, приведенных в таблице, и дифференцирования относительно параметров функций смещения, мы получаем систему уравнений (3), в которой переменными служат параметры функций смещения. Ввиду их громоздкости в данной статье полученной системы уравнений не приводятся. Для проведения аналитических преобразований и численных вычислений была использована программа MathCAD 2001 Professional как одна из наиболее универсальных программ для выполнения на компьютере разнообразных математических и технических вычислений. Расчет деформации балки под действием силы электростатического притяжения проводился для балки, изготовленной из поликристаллического кремния. Данный материал наиболее часто используется для изготовления микросистем по технологии поверхностной микрообработки.

При вычислении смещения балки использовался модуль упругости поликремния $E = 167$ ГПа.

Расчет выполнялся для балки со следующими геометрическими размерами: толщина $h = 1$ мкм, длина $L = 85, 100$ и 115 мкм; ширина $b = 10$ мкм. Начальный зазор между балкой и электродом составил $d_0 = 1$ мкм.

Результаты расчета деформации приведены на рис. 3 и 4. В качестве меры деформации балки рассматривалось ее максимальное смещение — смещение незакрепленного конца для балки, закрепленной одним концом, и смещение середины для балки, закрепленной двумя концами.

На рис. 3 и 4 видно, что независимо от вида закрепления и длины балки зависимость максималь-

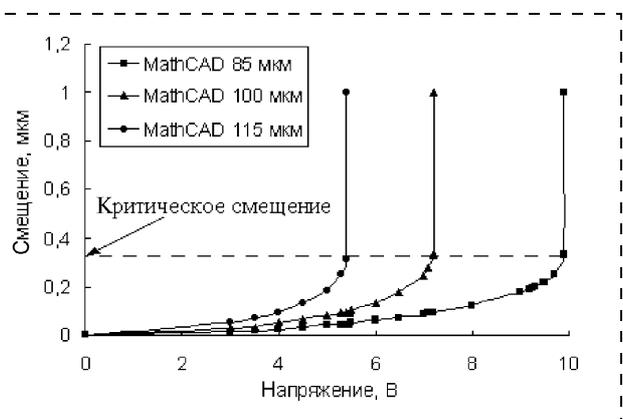


Рис. 3. Зависимость максимального смещения балки, закрепленной одним концом, от напряжения

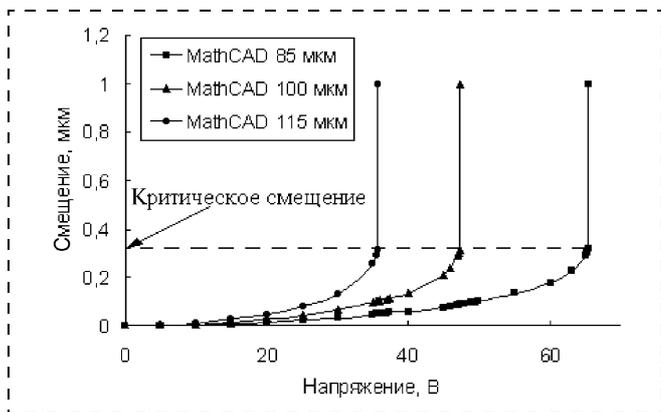


Рис. 4. Зависимость максимального смещения балки, закрепленной двумя концами, от напряжения

ного смещения от напряжения характеризуется критической величиной. В этой точке абсолютное значение приращения потенциала силы электростатики превышает приращение энергии деформации, вследствие чего балка не может достигнуть состояния равновесия. При проведении расчета в точке критического смещения программа выдает ошибку сходимости, т. е. отсутствие решений у системы уравнений. С практической точки зрения это означает, что при достижении балкой критического смещения дальнейшее увеличение напряжения приводит к мгновенному уменьшению расстояния между балкой и электродом до нуля, т. е. "падению" балки на электрод. Данный эффект присущ всем электростатическим структурам (микроактюаторам, переменным МЭМС-конденсаторам) и является их серьезным недостатком, так как ограничивает свободный ход подвижной части структуры.

Как можно видеть на рис. 3 и 4, для всех консолей критическое смещение составляет 1/3 от начального зазора. Как известно, эта величина характеризует критическое смещение плоскопараллельного конденсатора, одна из обкладок которого подвешена на пружине с постоянным коэффициентом упругости [8]. Однако, в силу деформации балки под воздействием силы электростатики, а также того, что, в частности, в балке, закрепленной двумя концами, действуют мембранные силы, критическое смещение для балки должно быть заведомо больше, чем для плоскопараллельного конденсатора. Как можно видеть, проведенные расчеты не подтверждают это предположение. Таким образом, можно сделать вывод, что расчет деформации балки под действием электростатического притяжения с помощью метода Ритца дает некорректный результат. Для оценки ошибки результатов, полученных с помощью метода Ритца, необходим расчет деформации балки с помощью другого метода. В следующем разделе описан расчет деформации балки под действием электростатического притяжения с помощью конечно-элементного метода с использованием программы ANSYS.

Расчет деформации балки под действием силы электростатики с помощью конечно-элементного метода (программа ANSYS)

Расчет деформации балки под действием силы электростатики с использованием программы ANSYS состоял из следующих этапов.

1. *Построение твердотельной модели структуры.* Исходными параметрами модели являлись длина и толщина балки, а также начальный зазор между балкой и электродом.

2. *Выбор типа элементов в зависимости от типа задачи.* Задание параметров материалов и разбиение модели на соответствующие элементы.

3. *Приложение граничных условий в зависимости от вида закрепления балки и проведение расчета.*

На рис. 5 приведено изображение двухмерной модели поликремниевой балки. Модель состоит из трех площадей. Нижняя площадь является электродом, средняя площадь играет роль диэлектрической среды, через которую осуществляется электростатическое взаимодействие, и верхняя является непосредственно поликремниевой балкой. В качестве диэлектрической среды был выбран воздух. Геометрические размеры балки были взяты такими же, как при расчете с помощью метода Ритца.

После формирования твердотельной модели была выполнена процедура разбиения модели на элементы. В качестве элементов, описывающих части модели, были выбраны элементы Plane 82 (для поликремниевой балки и притягивающего электрода) и TRANS109 (для описания воздушной среды). Элемент TRANS109 преобразует электростатическое взаимодействие в механическое и обратно, обеспечивая прямой расчет деформации механических структур под действием силы электростатики. Для разбиения модели на элементы использовалась встроенная процедура построения сетки конечных элементов. На рис. 6 приведен фрагмент твердотельной модели консоли, разбитой на конечные элементы.

После разбиения модели на конечные элементы к микромеханической структуре были приложены закрепления (граничные условия) и нагрузка (напряжение). Напряжение прикладывалось на балку,

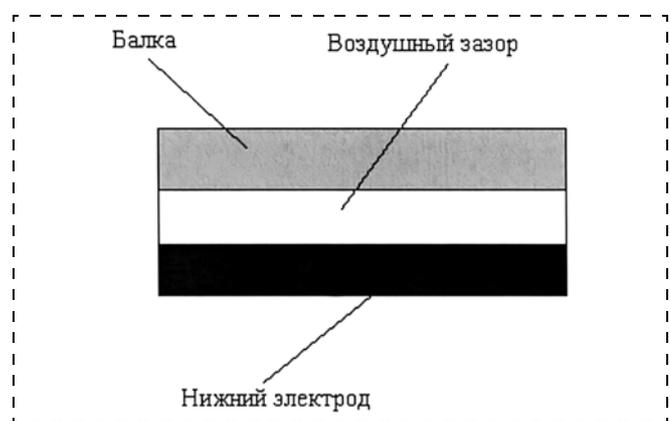


Рис. 5. Двухмерная модель поликремниевой балки

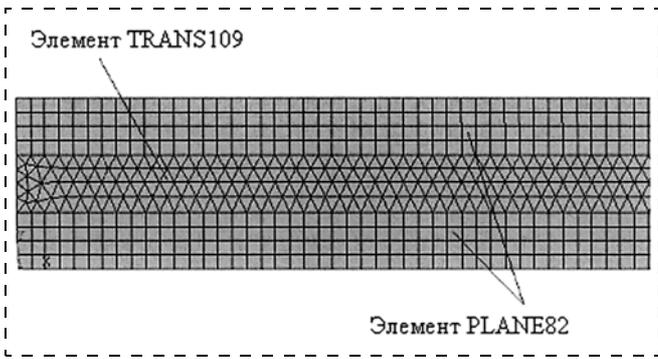


Рис. 6. Фрагмент модели балки, разбитой на конечные элементы

на нижнем электроде напряжение равнялось нулю. Модель консоли с граничными условиями показана на рис. 7. Модель балки выглядит аналогично, за исключением того, что она имеет жесткое закрепление на двух концах.

Расчет осуществлялся путем последовательного увеличения напряжения, приложенного к балке. После достижения напряжения, при которой сходимость решения не достигалась, шаг напряжения уменьшался. Критическое напряжение считалось достигнутым, когда шаг напряжения составлял ме-

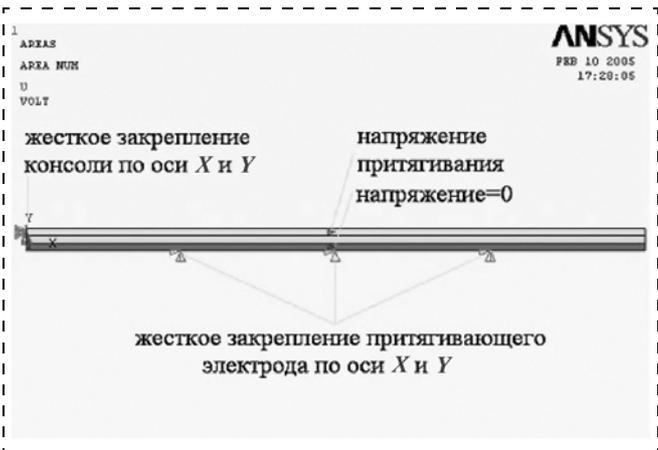


Рис. 7. Модель консоли с граничными условиями и нагрузкой

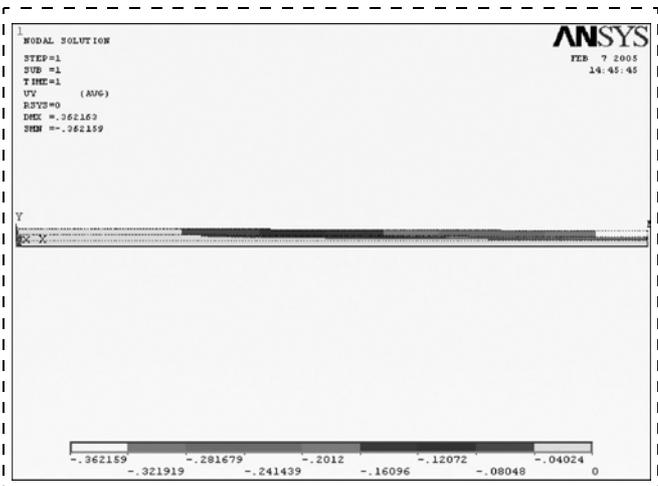


Рис. 8. Контурная диаграмма смещения балки, закрепленной одним концом

нее 0,05 В. Деформация балки, закрепленной одним концом, под действием силы электростатики приведена на рис. 8.

Как и при расчете с помощью метода Ритца, в качестве меры деформации балки рассматривалось ее максимальное смещение — смещение незакрепленного конца для балки, закрепленной одним концом, и смещение середины для балки, закрепленной двумя концами. На рис. 9 и 10 приведены сравнительные графики зависимости максимального смещения балки, закрепленной двумя основными способами, полученные с помощью метода Ритца и конечно-элементного метода.

Анализ полученных результатов

Как можно видеть на рис. 9 и 10, результаты, полученные с помощью двух разных методов расчета, достаточно близки как в случае балки, закрепленной одним концом, так и в случае балки, закрепленной двумя концами.

В случае балки, закрепленной одним концом, наблюдается хорошее совпадение результатов расчета критического напряжения и смещения балки в области малого смещения. В то же время для сме-

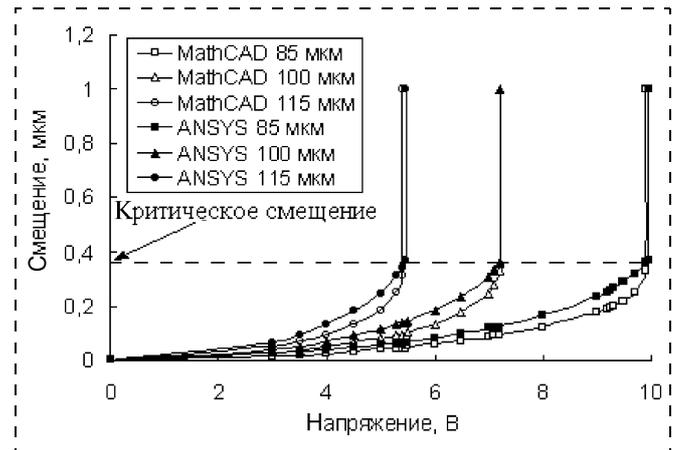


Рис. 9. Зависимость максимального смещения от напряжения для балки, закрепленной одним концом

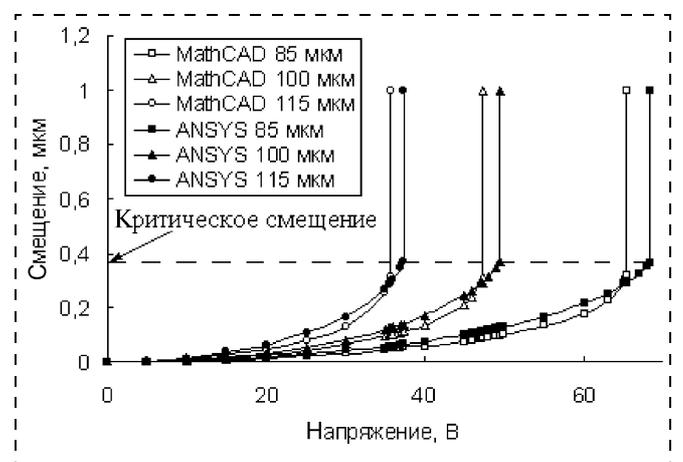


Рис. 10. Зависимость максимального смещения от напряжения для балки, закрепленной двумя концами

шения, меньшего критического, наблюдается расхождение результатов расчета смещения и напряжения, достигающее до 15–20 %. Кроме того, критическое смещение для балки, закрепленной одним концом, по результатам расчета с помощью метода Ритца составила 0,33, в то время как расчет, проведенный с помощью программы ANSYS, дает критическое смещение, равное 0,36. Эта разница составляет 8 %, и ее можно считать довольно значительной, если к расчету изначально предъявляются требования высокой точности. Вышесказанное позволяет сделать вывод о невысокой точности результатов, получаемых с помощью метода Ритца при использовании для расчета смещения балки, закрепленной одним концом, при смещениях в области от 0,05 до 0,33 от начального зазора. В то же время хорошее совпадение критического напряжения, полученного в результате применения обоих методов, дает основание для использования более простого и быстрого метода Ритца при расчете деформации под действием силы электростатики балки, закрепленной одним концом.

В случае балки, закрепленной двумя концами, наблюдается большее расхождение результатов, полученных двумя методами, чем в первом рассмотренном случае. Приемлемое совпадение результатов расчета смещения и напряжения наблюдается лишь в области малых смещений — до 0,1 от начального зазора. Для смещений, составляющих 0,1–0,33 от начального зазора различие результатов, полученных разными методами, составляет 10–15 %. Также имеет место расхождение результатов для критического напряжения, вычисление которого в большинстве случаев представляет больший интерес, чем смещение балки в докритической области. Это расхождение составляет от 2 до 3 В. Однако, по отношению к абсолютным значениям критического напряжения, это расхождение достигает всего 4–5 %, что позволяет сделать вывод о достаточно высокой точности расчета с использованием метода Ритца для этого способа закрепления.

В качестве причины неточности получаемых результатов можно указать на приближенный характер функций, выбранных для описания смещения балки. Эти функции удовлетворяют граничным условиям, определяемым видами закрепления балок, однако их вид — полиномиальный — выбран исключительно из соображений аналитической простоты расчета и поэтому отличается от реальных функций смещения. Для приближения к реальному виду требуется усложнение функций смещения, например, использование полиномов более высокого порядка, однако это несомненно приведет к вычислительным сложностям при использовании метода Ритца и тем самым лишит его привлекательности.

Заключение

В данной статье проведен расчет деформации балки под действием силы электростатического

притяжения аналитическим методом (методом Ритца) и методом конечных элементов.

Метод Ритца использует параметрические аналитические выражения для функций вертикального и горизонтального смещения балки, на основе которых вычисляются энергия деформации балки и потенциал нагрузки, составляющие полную энергию деформированной балки. Применение принципа минимизации дает в результате систему уравнений относительно параметров функций смещения, которая может быть численно решена для конкретных геометрических размеров, параметров балки и нагрузки. Несомненным достоинством метода Ритца является простота его реализации и малое время расчета.

Метод конечных элементов реализует наиболее общий подход к расчету деформации балки под воздействием силы электростатического притяжения, заключающийся в разбиении балки на отдельные элементы, размер которых много меньше размера балки. Метод обладает высокой точностью, но в то же время требует существенных временных затрат и использования специальных программ (в данном случае — ANSYS), освоение которых также требует достаточно длительного времени.

Сравнительный расчет деформации балки под действием силы электростатического притяжения двумя методами показал хорошее совпадение результатов расчета. Для балки, закрепленной одним концом, критическое напряжение, полученное обоими методами, совпадает; для балки закрепленной двумя концами, расхождение составляет 4–5 %. В докритической области смещений (от 0,1 до 0,33 от начального зазора) точность результатов составляет 15–20 % для балки, закрепленной одним концом, и 10–15 % для балки, закрепленной двумя концами.

Таким образом, можно сделать вывод, что метод Ритца обеспечивает высокую точность расчета критического напряжения для балки, деформированной под действием силы электростатического притяжения, и подходит также для использования для оценки смещения балки в области докритических смещений, если к данной оценке не предъявляются требования высокой точности.

Список литературы

1. **Oberhammer J.** Novel RF MEMS switch and Packaging concept // Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Stockholm. 2004.
2. www.teravicta.com
3. **Rebeiz G. M.** RF MEMS: Theory, design and application, 1st ed., Hoboken, New Jersey: Wiley 2003.
4. **Hacker J. B.** et al. A Ka-band 3-bit RF MEMS true-time-delay network // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2003. Vol. 51, N 1. P. 305–308.
5. **Mihailovich R. E.** et al. MEM Relay for Reconfigurable RF Circuits // Microwave and Wireless Components Letters. 2001. Vol. 11, N 2. P. 53.
6. **Тимошенко С. П.** Теория пластин и оболочек, М. 1982.
7. **Васильду К. А.** Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М. 1987.
8. **Tilmans H.** MEMS components for wireless communication // The 16th European Conference on Solid-State Transducers, September 15–18. Prague, 2002. P. 1–34.

УДК 802.0(075.8)

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, доц.,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники (г. Минск),
Е. В. Лацапнёв,
Белорусский национальный технический
университет (г. Минск)

АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

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

М

M3S (Modular Monolithic MEMS) — технология изготовления модульной монолитной МЭМС. Технология поверхностной микрообработки, позволяющая изготавливать МЭМС-изделия, содержащие монолитные интегральные вычислительные схемы. Это технология для производства относительно дешевых и высококомпактных сенсоров. По данной технологии сначала изготавливают механические микроструктуры. Их как бы встраивают в планарную поверхность подложки. Этим достигается высокий уровень совмещения с последующими технологическими процессами изготовления монолитных устройств: сенсор-электронная схема. Процедура следующая. Сначала механические микроструктуры изготавливает корпорация Analog Devices (США, Германия). Затем другое полупроводниковое предприятие добавляет электронную схему. Микроизделия с новыми свойствами поступают простой почтовой или курьерской отправкой подложек с одного предприятия на другое. Подсчитано, что данная технология значительно уменьшает стоимость микроизделия. Планируется, что технология будет иметь важное значение при изготовлении "умной" амуниции и воздушных транспортных средств (микровертолетов, микросамолетов и др.). Здесь требуется большое число относительно дешевых микроизделий.

Magnetoresistive Random-Access Memories (MRAMs) — магниторезистивная оперативная память. Память MRAM совмещает в себе достоинства динамической и флэш-памяти. Микросхема. Она имеет небольшое время чтения/записи (теоретически в 1000 раз быстрее самой быстрой существующей на сегодняшний день флэш-памяти и в 10 раз быстрее DRAM). Является энергонезависимой. Применяется, например, в производстве телефонных аппаратов (функция оперативного "запоминания" только что набранного номера). Низкое энергопотребление обуславливает использование такой памяти в портативных устройствах, питающихся от аккумуляторов, например, в карманных компьютерах, смартфонах, компьютерах нового поколения. Основные изготовители: компании Toshiba (Япония), NEC (Япония) и др.

Mask — маска, маскирование, фотошаблон. Носитель рисунка и собственно сам рисунок, используемый для защиты одного участка полупроводниковой подложки при обработке другого участка. Процесс маскирования связан с фотолитографией и литографическим фотомаскированием. Прозрачную пластину

покрывают сеткой рисунков. Используется в производстве ИС, кремниевых структур по технологии поверхностной микрообработки, а также элементов изделий технологии LIGA. Каждый рисунок состоит из прозрачных и непрозрачных участков. Именно они определяют размер и форму всех транзисторов и других элементов микроустройства. Маска используется для экспонирования выбранных участков фоторезиста, которые в дальнейшем будут протравлены. Для получения непрозрачных участков масок (фотошаблонов) используют пленки эмульсии, хрома, оксида железа и других материалов.

Mechanical shock — механический удар. Максимальный механический удар, приложенный к каждой оси в положительном или отрицательном направлении, при котором ни одна из частей микроустройства не будет разрушена. При этом к микроустройству одновременно приложено номинальное напряжение. Удар — кратковременное взаимодействие тел, приводящее к изменению их скоростей. Напомним, что, в общем, удар происходит при непосредственном столкновении тел или через поле.

Melt — плавление, расплав. Переход твердого кристаллического вещества в жидкое. Фазовый переход первого рода. Это фазовые превращения, при которых плотность вещества, термодинамические потенциалы, энтропия меняются скачком. При этом выделяется или поглощается теплота фазового перехода. При постоянном внешнем давлении плавление вещества происходит при постоянной температуре (температура плавления). При атмосферном давлении эта температура называется точкой плавления вещества.

MEMCAD (MicroElectroMechanical Computer-Aided Design) — микроэлектромеханическая САПР. Специальный программный продукт для компьютерного (автоматизированного) проектирования МЭМС. Программа разработана в Массачусетском технологическом институте (США). В настоящее время программный продукт получил название CoventorWare и состоит из следующих четырех базовых модулей: *Architech* — модуль схемного проектирования и моделирования МЭМС устройств; *Designer* — модуль объединяет в себе 2D-редактор топологии, эмулятор технологического процесса, базу данных свойств материалов, генератор и просмотрщик трехмерной модели; *Analyzer* — модуль имеет подмодули для механического, электрического, теплового, электромагнитного, микрожидкостного и оптического анализа; *Integrator* — модуль для преобразования поведенческой модели микроустройства в сложную нелинейную систему со сниженным порядком для дальнейшего моделирования в САПР, используемой в микроэлектронике, или повторного использования результатов в среде MatlabSimulink.

MEMS Industry Group (MIG) — промышленная группа по МЭМС. Это главная торговая ассоциация, представляющая промышленность МЭМС и микроструктур в Северной Америке. Она предоставляет своим членам информацию о последних промышленных исследованиях по МЭМС, инициированных этой промышленной группой, статистику по уровню занятости в этой отрасли, статистику по доходам и рынкам сбыта микроизделий, а также другую, очень конкретную, важную и полезную информацию.

Mesoscale machining — мезоуровневая микрообработка. Серийный производственный процесс, который ликвидирует разрыв между кремниевой микрообработкой и традиционной механической миниатюрной обработкой. По мезоуровневой технологии изготавливаются только отдельные части микроизделия и поэтому для получения конечного микроустройства требуется микросборка. Мезоуровневая микрообработка включает в себя микрообработку электрическим разрядом, микрообработку сфокусированным ионным лучом, микросверление, микрофрезерование, лазерную микрообработку.

Metallization — металлизация. Процесс осаждения тонкой пленки проводящего металла на сформированную интегральную или микросистемную схему с последующим формированием

ем из него с помощью литографии рисунка с необходимым расположением межсоединений. Различают однослойную и многослойную металлизацию. Примеры металлизированных покрытий: Al, Al + Si, Mo, Pt, Pt + Si, Cu и др.

Microchamber — микрообъем, микрокамера. Например, микрокамера для проведения химических реакций. Является составной частью (одним из элементов) какого-либо специализированного МЭМС-устройства. Выполняется по технологии поверхностной микрообработки с применением жертвенного слоя.

Microcutting and grinding — микрорезание и шлифовка. По сути, это микрокрайбирование, микрофрезерование. Микро-механический процесс "скобления" поверхности некоторого образца. Микрорезание, например, с помощью микромеханической фрезы (микрорезца) с последующим микрошлифованием с помощью микрошлифовальных устройств (шлифовальных микрокругов). Чаще применяется лазерная обработка: микрорезание плюс микрошлифовка (оплавление).

Microdrilling — микро сверление. Технологический процесс в микрообработке. Может выполняться методами травления (сфокусированным ионным лучом или химическим), лазерной обработки либо с применением микроверла.

MicroElectroMechanical Systems (MEMS) — микроэлектро-механические системы. Миниатюрные устройства, включающие в свой состав три компонента: микроактюатор, микросенсор и электронную вычислительную систему управления. Все три компонента изготовлены в одном чипе в едином технологическом процессе микрообработки. Термин наиболее распространен в США. В Европе для обозначения этой области науки и техники применяется термин "микросистемная технология" (MST, MicroSystems Technology), в России — "микросистемная техника" (microsystems technics), в Японии — "микромашин" (micromachines).

Microelectronics Center of North Carolina (MCNC) — центр микроэлектроники в Северной Каролине (США). Основные направления исследований центра: проектирование микрочипов, разработка суперкомпьютеров и передовых сетевых технологий. Это один из разработчиков технологии поверхностной микрообработки MUMPs. См. *Multi-User MEMS Process*.

Microengineering — микроизготовление. Обобщенное понятие: разработка и получение трехмерных (3D) микроструктур или микроустройств с размерами элементов порядка микрометра.

Microfabrication — микропроизводство. Обобщенное понятие: производство (изготовление) микроустройств (интегральных схем или МЭМС).

MicroFlumes (Micro Fluidic molecular systems) — микропоток, микрожидкостная молекулярная система. Микросистема для проведения операций с жидкостями на микроуровне (с микрообъемами). Предназначена для операций микротранспортирования (микроподачи) жидкостей, а также для проведения химико-биологических реакций (синтеза) в микрообъемах. Вместо насосов, смесителей, клапанов, фильтров и труб, как элементов обычной жидкостной макросистемы, в микросистеме имеется сеть микропоточковых каналов. Жидкостная микросистема может качать, смешивать, нагревать, разделять или выполнять иные функции внутри микрочипа. Главная особенность в том, что функциональное управление полностью встроено в сам микроканал.

Microforging — микроковка. Технологический процесс микрообработки, в котором для получения желаемой формы микроизделия используются инструменты и механизмы для пресования и ударного воздействия на материал. Большинство микрокомпонентов не могут быть окончательно получены посредством микроковки, но она все же является одной из операций микрообработки. Типичный пример — производство стальных микрошариков для микророботостроения. Отрезанный круглый стальной микростержень первоначально подвергается микроковке, а точнее формообразованию сжатием (обработка давлением), затем для получения готового шарика микроподшипника применяют шлифование, термическую обработку, полировку.

Microgripper — микрозахват, микрозажим. Микромеханическое устройство. Используется для удаленного управления работой (движением) катетера. Катетер — специальная трубка различного диаметра, длины, формы, изготовленная из различ-

ных материалов. Катетеризация — введение катетера в естественный канал или полость тела с диагностической или лечебной целью. При движении катетера бывает необходимо на малых участках изменить путь его движения (например, повернуть его в сторону под прямым углом). Доступ микрозахватом (микрозахватом) к катетеру обеспечивается через маленькие отверстия. Редко, но бывает, что под словом *microgripper* обозначают сам катетер.

Microgyroscope — микрогироскоп. Микромеханическая система (3D чип). Фактически это сенсор для измерения угловой скорости. Типичное применение микрогироскопов: сенсор для ориентации робота в пространстве. Вращательный и вибрационный гироскопы основаны и работают на силе Кориолиса. Кольцевые лазерные и оптоволоконные гироскопы основаны и работают на эффекте Саньяка. Среди названных вибрационных гироскопы реализуются и применяются в миниатюризованном виде.

MicroInjection Molding (MIM) — микролитьевая формовка, микролитье под (высоким) давлением. Получение отливок (изделий) в микроформе, в которую расплавленный материал (металл, пластмасса, резиновая смесь и др.) поступает под давлением, а после затвердевания в результате остывания или вулканизации приобретает конфигурацию внутренней полости микроформы. Применяется для получения сложных микроизделий с высокой точностью, например, в LIGA-технологии. См. *micromolding*.

Micromilling — микрофрезерование. В технологии микрообработки различают микрофрезерование (микрорезание): ионное, лазерное, химическое, а также с использованием микрофрез. В традиционной металлообработке фрезерование — это обработка материала резанием. В традиционной металлообработке фреза совершает вращательное, а заготовка — поступательное движение. См. также *Ion beam milling*.

Micromirrors — микрозеркала. МОЭМС-изделия. Изготавливаются по МЭМС-технологии. Применяются для управления светом. Используются в оптических переключателях, проекционных дисплеях, в светоотражателях, а также в оптических телескопах. Основные производители: корпорация Applied MEMS (США), лаборатория Sandia (США), компания MEMX (США) и др. См. также *MOEMS*.

Micromolding — микроформовка. Технология получения микроэлементов (микроотливок, микроизделий) заданной формы путем заливки расплавленного материала (металл, пластмасса, резиновая смесь и др.) в шаблон (литьевую микроформу). Микроформовка использует такие методы, как сжатие, перенос, литье, обдувка для получения требуемой формы в металлическом шаблоне. В качестве исходных материалов применяют также полимеры и керамику. В LIGA-технологии микроизделия из пластика формируются в металлическом шаблоне с использованием технологии точной микроформовки. Типичный пример: низковязкий пластик дегазируется и подается в вакуумный шаблон (микроформу) под высоким давлением для предотвращения пузырения и полного заполнения маленьких пустот. Термическая обработка выполняется при высокой температуре и высоком давлении для затвердевания пластика, освобождения его от напряжений и компенсации усадки. Пластическая структура, полученная по этой технологии реактивного литья под давлением, может быть уже сама использована как шаблон для последующего получения металлических микроструктур. См. также *MicroInjection Molding (MIM)*.

Micron — микрон (микрометр). Единица толщины/длины, равная 10^{-6} м. $1 \text{ мкм} = 10^3 \text{ нм}$.

MicroOptical ElectroMechanical Systems (MOEMS) — микрооптоэлектромеханические системы. Микросистема, в структуре которой встроены оптические микроэлементы. МОЭМС — уникальная технология, основными особенностями которой являются: групповой процесс изготовления микросистем; размер элементов в микросистеме порядка микрометра; возможность обеспечения точного и управляемого перемещения оптических элементов в микросистеме. Перемещение микрооптических элементов позволяет осуществлять динамическое управление лучом света. Это динамическое манипулирование светом может включать (амплитудную или по длине волны) модуляцию; временную задержку; дифракцию; полное отражение или просто пространственную переориентацию. Любые две или три

эти операции можно комбинировать (совмещать) для выполнения сложных операций со световым лучом. Способности выполнять эти операции, используя миниатюризированные оптические элементы, — это одно из ключевых свойств, которое отличает МОЭМС от классической физической оптики. Элементы микрооптоэлектромеханических систем: линзы, микрзеркала, стойки, штативы, дифракционные решетки, светоделительные пластины, световоды, модуляторы и др. Области применения МОЭМС: новые типы дисплеев, основанные на физическом движении отражающих микроповерхностей (модуляция света); активные корректоры; оптические кроссконнекторы; фильтры ввода/вывода волнового мультиплексирования и др. Центры по исследованию, разработке и изготовлению МОЭМС: Калифорнийский университет (США), университет Рицумейкан (Япония), центр микроэлектроники ИМЕС (Бельгия), Токийский университет (Япония), университет Северной Каролины (США), Национальная лаборатория Sandia (США), корпорация NEC (Япония) и т. д.

Micro pump — микронасос. Микромеханическое устройство, которое сдвигает (сжимает) и затем выталкивает из себя (транспортирует) некоторое микроколичество жидкости. В настоящее время большинство микронасосов изготавливают из кремния или стекла и используют технологию микрообработки для получения мембраны, совмещенной с микроактюатором. Примеры: мембранный насос с обратным микроклапаном, управляемый пьезоэлектрическим элементом, а также интегрированный насос, использующий актюатор теплового расширения вместе с микронагревателем. Насосы, всасывающие и выпускающие жидкость посредством деформации мембраны (диафрагмы), которая приводится в действие многослойным пьезоэлектрическим актюатором, могут управлять скоростью движения жидкости посредством изменения частоты привода актюатора.

Micro relay — микрореле. Микроустройство для автоматической коммутации (соединения) электрических цепей по сигналу извне. Содержит группы электрических микроконтактов, которые замыкаются (или размыкаются) при изменении состояния релейного микроэлемента. Различают микрореле: тепловые, механические, электрические, оптические, акустические. Используются в микросистемах автоматического управления, контроля, сигнализации, защиты, коммутации и т. д. Релейный микроэлемент — простейшее переключающее устройство с двумя устойчивыми состояниями. Одно состояние скачком сменяется другим под влиянием внешнего воздействия, например, изменения температуры, давления, электрического напряжения, освещенности, звука. Пример: микрореле времени. Это микроустройство, микроконтакты которого срабатывают с некоторой задержкой во времени после получения управляющего сигнала. Задержку можно регулировать, влияя на скорость изменения физической величины, воздействующей на релейный микроэлемент.

Microscopic surgery — микрохирургия. Хирургические операции, выполняемые под микроскопом, стереоскопом, на микроуровне, с микронной точностью. Микрохирургия практикуется в отоларингологии, офтальмологии, нейрохирургии, хирургии сосудов и т. д. В настоящее время наименьший уровень, который достигла микрохирургия, — это процесс сшивания артерий, вен и нервов с диаметром до 800 мкм с использованием микроиглы и нитки с диаметром до 20 мкм.

Microsensor — микросенсор. Общее понятие, применяемое для микроустройств, измеряющих физические и химические величины и изготовленных посредством технологии микрообработки. Микросенсоры бывают: сенсоры механических величин (измерение давления, ускорения, смещения, тактильные измерения и т. д.); сенсоры химических величин (измерение числа ионов, содержания кислорода и т. д.); сенсоры электрических величин (измерение магнитных свойств, тока и т. д.); биосенсоры; оптические сенсоры. В современных микросенсорах сенсорная часть интегрирована с электронной микросхемой управления. Преимущества микросенсоров: уменьшение разрушения контролируемой среды; способность измерять локальные состояния на небольших участках; интеграция с электронной схемой; в МЭМС-устройствах — это совмещение микро-

сенсора, микроактюатора и схемы управления в едином чипе; уменьшение эксплуатационной мощности.

Microstructures — микроструктура. Архитектура микроустройства (полная или частичная), полученная из слоев осажденного материала.

Microsystem — микросистема. Трехмерная сложная система микрометровых размеров, изготовленная в едином технологическом процессе. Содержит, как правило, три основных компонента: сенсорное микроустройство, микроисполнительное устройство (собственно, это и есть 3D-часть) и микровычислительную часть. Пример: микрогирискоскоп (3D чип) для использования в системах точного наведения ракет на цель.

Microsystems technology — микросистемная технология. Технология изготовления МЭМС- и МОЭМС-изделий. Обобщенное, очень широкое понятие. Технология микрообработки.

Microswitch — микропереключатель. Микроисполнительное устройство. Электрический микропереключатель служит для коммутации различных электрических цепей. К микропереключателям относятся микроконтроллеры, микротумблеры, пакетные микровыключатели и др. Снабжен логическими микроустройствами для быстрого выполнения "стандартных", заранее запрограммированных решений.

MicroTAS (MicroTotal Analysis System, μ TAS) — система полного микроанализа. Это есть сочетание (интеграция) в одном микроустройстве всех этапов химического анализа — от взятия пробы и детектирования до обработки данных и выдачи логических рекомендаций. Пример: микроустройство для больных сахарным диабетом в виде одного чипа. Микросистема решает все перечисленные выше задачи.

Microtechnology — микротехнология. Технология, имеющая дело с материалами, структурами и изделиями микрометровых размеров.

Microtribology — микротрибология. Раздел трибологии, который на микроуровне изучает трение, виды смазки, износ и адгезию двух соприкасающихся тел, находящихся в движении. Трение подразделяется на два основных типа: сухое и жидкое. Причем жидким трением считают даже тогда, когда на поверхности образуется очень небольшая (в несколько атомарных слоев) пленка жидкости. В результате адсорбции это происходит практически всегда, исключения составляют следующие случаи: гидрофобные поверхности контактирующих поверхностей; трение в вакууме; случаи, когда в результате большой нормальной нагрузки слой жидкости вытесняется из площади контакта, поверхности вступают в непосредственный контакт и, фактически, реализуется механизм сухого трения. Жидкое трение существенно зависит от толщины слоя жидкости. При пленке в один мономолекулярный слой трение мало отличается от сухого. Если монослоев два—три, то рассеяние энергии в фоновом канале уже заблокировано, и основную роль играет вязкость жидкого слоя. Для более толстых пленок начинают преобладать капиллярные эффекты, в результате которых неровности соприкасающихся поверхностей притягиваются друг к другу, если их попытаться сдвинуть. В случае сухого трения считается, что при скольжении трущихся поверхностей микронеровности задевают друг за друга. При преодолении этих препятствий возникают атомарные вибрации, которые в виде фононов рассеиваются, унося энергию. Кроме того, при разрыве адгезионных связей, возникающих между выступами соприкасающихся поверхностей, в металлических образцах образуются пары электрон—дырка, на возникновение которых также затрачивается энергия (этот эффект значительно слабее, чем фоновое рассеяние). В случае мягких образцов возможно и разрушение микронеровностей, так называемое "пропахивание". В этом случае механическая энергия расходуется на разрушение атомарных связей. В микротрибологии часто встречается так называемый эффект прилипания—скольжения. Сила трения при движении поверхности относительно другой силы трения имеет пилообразный профиль, она неравномерна. Прилипнув к одной "точке" на соседней поверхности (выступу) в результате адгезии, капиллярных сил и т. п., сложно оторваться от нее, для этого требуется преобладающая сила. Оторвавшись, выступ перескакивает к другой такой точке, возле которой снова прилипает на некоторое время и т. д. При проектировании МЭМС-устройств чрезвычайно важно учитывать микротрение.

Microtweezer — микропинцет. От французского "щипчики". Микроисполнительное устройство. Состоит из "пружинящей", по отношению к основанию, микропластинки. Предназначен для захватывания и удержания объектов микрометровых размеров. Широко применяется в микрохирургии. Изготавливается по технологии поверхностной микрообработки с жертвенными слоями.

Microvalve — микроклапан. От немецкого "крышка, заслонка". Микромеханическое устройство для управления потоком газа или жидкости в микроканале за счет изменения площади проходного сечения. Сечение микроканала составляет несколько микрометров. Различают запорные и регулировочные микроклапаны. Пример: клапан для управления потоком газа состоит из многослойного пьезоэлектрического микроактюатора и мембраны. Для управления высоковязкими жидкостями, такими как кровь, необходимо расширять микроканал и увеличивать ход вентильного микропривода. Для этого используют спирали из сплавов с памятью формы и смещенные пружины.

Microwave — микроволна. Радиоволны миллиметрового, сантиметрового и дециметрового диапазона длин волн. В англоязычной литературе термин означает: радиоволна с частотой выше 1 ГГц (длина волны менее 30 см). Микроволновый источник энергии (электропитания) — это один из методов беспроводной передачи энергии для микромашин. Эффективная передача возможна при использовании металлических труб в качестве волноводов. Микроволны, выходящие из генератора, распространяются по внутренней части трубы и принимаются антенной, размещенной на микромашине. Затем микроволны в модуле преобразования энергии конвертируются непосредственно в электрический ток. Этот модуль является источником питания для микромашины. Кроме того, микроволны используются в микромашинах как средства связи и как канал передачи информации.

Miller index — индексы Миллера. Это фигуральный вектор для представления (описания) расположения определенной атомной плоскости в кристаллической решетке вещества. Описание расположения любой плоскости состоит из набора трех целых чисел. Индексы Миллера, по определению, пропорциональны длинам отрезков, отсекаемых определенной плоскостью решетки на выбранных осях x , y , z . Примеры: плоскости (111), (100), (211) и др. Свойства полупроводниковых материалов различны по разным кристаллографическим плоскостям. Это строго учитывается при разработке технологических процессов изготовления микроизделий.

Modification — модифицирование. Так называют технологию обработки, которая модифицирует физические или химические свойства вещества. Один из примеров: модифицирование полимеров. Последнее представляет собой направленное изменение свойств полимеров путем регулирования их надмолекулярной структуры (введение зародышей кристаллизации, термическая обработка) или изменения химического состава молекулы (введение реакционноспособных групп и др.). Применяется, например, для повышения ударной прочности пластмасс, облегчения крашения химических волокон. Другой пример: модифицирование металлов. Это введение в металлические сплавы модификаторов — веществ, небольшие количества которых (обычно не более десятых долей процента) способствуют кристаллизации структурных составляющих в измельченной или округлой форме. Последнее улучшает механические свойства металла. Модификаторы: магний, ферросилиций, алюминий, некоторые лантаноиды и др. Модификация в биологии (микробиологии) — это наследственные изменения признаков организма (микроорганизма). Такие изменения могут возникать под влиянием изменяющихся условий внешней среды (температуры, влажности и др.). В технологии микрообработки известны следующие процессы, вызывающие локальную модификацию полупроводников: локальное легирование сфокусированным ионным лучом; лазерное легирование, включая фазовое превращение, такое как формирование монокристалла; ионная имплантация; ионное микширование (смещение). Пример: модифицирование осажденного из газовой фазы аморфного кремния и перевод его в поликристаллический кремний в результате лазерной микрообработки. Перекристаллизация происходит при нагреве структур. Однако температура кристалли-

зации сильно зависит от легирующих добавок и примесей в аморфном кремнии. Примеси кислорода, азота и углерода достаточно сильно и до определенной степени стабилизируют аморфное строение пленки. Мышьяк тоже стабилизирует, но в заметно меньшей степени. Другие примеры из технологии микрообработки: имплантированные слои могут быть подвергнуты лазерному отжигу, при этом имплантированные аморфные слои перекристаллизуются в течение нескольких секунд при температуре 800 °С по механизму твердофазной эпитаксии. В технологии быстрого термического отжига нагрев осуществляется: лучом импульсного лазера (время обработки несколько пикосекунд); импульсными электронными пучками; импульсными ионными пучками; сканируемым электронным лучом; сканируемым лучом лазера непрерывного действия; высокоинтенсивной имплантацией; широкополосными спектральными источниками (высокоинтенсивными лампами).

Modified Nodal Analysis (MNA) — усовершенствованный узловой анализ. Усовершенствованный узловой анализ применяется для моделирования электрических схем с пассивными элементами, независимыми источниками тока (и напряжения) и активными элементами. В результате формируется матрица следующего вида: $[A] \times [X] = [Z]$. Для электрической схемы с N узлами и M независимыми источниками напряжения матрица A имеет размер $(N + M) \times (N + M)$ и состоит только из известных величин. $(N \times N)$ -часть матрицы в левом верхнем углу имеет только пассивные элементы; элементы, соединенные с землей, входят только в диагональ; элементы, не соединенные с землей, располагаются как на диагонали, так и за ее пределами. Оставшаяся часть матрицы A (не включенная в $(N \times N)$ -верхний левый угол матрицы) содержит только 1, -1 и 0. Другие значения возможны, если есть такая зависимость от источников тока и напряжения. Матрица X — это $((N + M) \times 1)$ -вектор, который содержит неизвестные величины (узел напряжений и токов через независимые источники напряжения). Верхние N элементов — это N узлов напряжений. Нижние M элементов представляют токи через M независимых источников напряжения в электрической цепи. Матрица Z — это $((N + M) \times 1)$ -вектор, который содержит только известные величины. Верхние N элементов — это или нулевые, или сумма и разности независимых источников тока в электрической цепи. Нижние M элементов представляют M независимых источников напряжения в электрической цепи. Электрическая схема рассчитывается простой операцией над матрицей: $[X] = [A]^{-1} \times [Z]$. Применяется усовершенствованный узловой анализ, например, в Sugar (САПР МЭМС).

Modular System for Constraint Nonlinear Microsystem Optimization (MOSCITO) — модульная система для оптимизации ограничения нелинейности микросистемы. Главная идея — разделить цикл оптимизации в модульную конструкцию. Для каждой задачи — генерация модели, моделирование, расчет ошибки и оптимизация — существуют разнообразные модули. Например, программы моделирования ANSYS, Saber и Matlab/Simulink интегрируются посредством программных интерфейсов и генераторов модели. Различные модули могут быть собраны для процесса оптимизации конкретной проблемы. Вследствие унифицированности интерфейсов ими можно гибко и эффективно обмениваться, например, применять различные методы оптимизации подходов к проблеме. В настоящее время доступны к использованию несколько алгоритмов оптимизации (например, квазиалгоритм Ньютона, метод сопряженных градиентов, метод Пауэлла, симплекс-метод Нелдера — Мида и др.). Их число может возрасти до 20. Модули этой системы можно соединять посредством Интранет или через Интернет. Так поддерживается совместная работа проектировщиков и экспертов по оптимизации.

Mohs' scratch hardness — твердость по шкале Мооса. Твердость — сопротивление твердого тела вдавливанию или царапанию. При вдавливании твердость равна нагрузке, отнесенной к поверхности отпечатка. Вдавливается стальной шарик (метод Бринелля) или алмазная пирамидка (методы Роквелла и Виккерса). Иногда твердость измеряется высотой отскока шарика. В минералогии твердость оценивают по шкале Мооса (немецкий минеролог). Шкала Мооса (минералогическая шкала твердости) — набор эталонных минералов для определения относительной твердости методом царапания. В качестве этало-

нов приняты 10 минералов, расположенных в порядке возрастающей твердости: 1 — тальк, 2 — гипс, 3 — кальцит, 4 — флюорит, 5 — апатит, 6 — ортоклаз, 7 — кварц, 8 — топаз, 9 — корунд, 10 — алмаз.

Molecular dynamics — молекулярная динамика. Динамика, которая объясняет макроявления с одновременной характеристикой микромира, в частности, его молекулярного движения. Это попытка охарактеризовать (объяснить) молекулярное движение на основе законов классической динамики. Метод молекулярной динамики основан на численном решении классических уравнений движения частиц в некотором выделенном объеме среды. Все частицы, находящиеся в выделенном объеме (молекулярно-динамической ячейке), взаимодействуют друг с другом посредством заданного потенциала взаимодействия. Метод молекулярной динамики позволяет рассчитывать любое свойство системы — как термодинамическое (например, энергию, давление, энтропию), так и кинетическое (коэффициенты диффузии, частоты колебаний атомов).

Molecular Beam Epitaxy (МБЕ) — молекулярно-лучевая эпитаксия. Технология осаждения эпитаксиальных пленок полупроводников посредством испарения материалов при низком давлении порядка 10^{-6} мм Hg (1 мм рт. ст. = 133,322 Па). Позволяет изготавливать эпитаксиальные структуры с высокой точностью по толщине и почти идеальной стехиометрией. Последнее объясняется относительно невысокой скоростью технологического процесса и возможностью буквально послойного формирования осаждаемых пленок: атом за атомом встраивается в кристаллическую решетку. Чаще всего по этой технологии получают эпитаксиальные пленки сложных A_3B_5 и A_3B_6 полупроводников. Примеры: получение InGaAsP, InGaAs и др. для оптической и квантовой электроники.

Molecular layer epitaxy — послойная эпитаксия на молекулярном уровне. Другими словами, молекулярная послойная эпитаксия. Это управляемый рост кристаллического слоя. Технология позволяет получать монослои полупроводниковых материалов с высокой стехиометрией и высоким кристаллографическим совершенством. Особенно важна в A_3B_5 - и A_2B_6 -технологии.

Monte-Carlo method — метод Монте-Карло. Относится к имитационному моделированию, в котором при расчете какой-либо системы воспроизводится и исследуется поведение всех ее компонентов. Если поведение системы достаточно сложно и нет возможности описать его строгими математическими формулами, то необходимо поставить определенное число экспериментов (случайных испытаний) с каждым из узлов этой системы. Это для того, чтобы оценить, как они (узлы) себя ведут. После определенного числа случайных испытаний получаем случайный вектор, в котором содержатся значения отклика узла системы на каждое испытание. Очевидно, что элементы этого вектора имеют некоторое распределение, описывающее поведение данного узла. Распределением называется совокупность значений, которые может принимать случайная величина, и вероятностей, с которыми она их принимает. Например, метод Монте-Карло используется для моделирования столкновений молекул газа на поверхности твердого тела. Молекулы случайно выбираются из огромного числа молекул газа, находящихся близ реальной области расчета. Движение выбранных молекул анализируется исходя из теории вероятности для определения поля течения (распределения скоростей и давления в потоке газа).

Moore's law — закон Мура. Упрощенная формулировка: число транзисторов на кристалле удваивается каждые 18 месяцев. Закономерность получена в 1965 году Гордоном Муром (Gordon Moore, США) на основе анализа графика роста производительности микросхем запоминающих устройств.

MOSIS (Metal Oxide Semiconductor Implementation System) — так обозначается коммерческий сервис фирмы MOSIS Service, оказывающей услуги по разработке, созданию опытного образца и изготовлению небольшой партии микроизделий. Фирма расположена в штате Калифорния в университете Южной Каролины (США). Обеспечивает разработчикам самые последние микроэлектронные технологии, относительно дешевые опытные образцы проектов СБИС, проводит исследования по моделированию устройств и схем, тестированию микроизделий, надежности полупроводниковых пластин. Проводит образова-

тельные программы по проектированию СБИС. Сервис отличается достаточно невысокой стоимостью. В основном предназначен для разработчиков специализированных СБИС.

Movable part — подвижный узел. Это та часть микроустройства, которая не закреплена жестко ни в одном из его узлов и может свободно перемещаться либо вращаться. Например, слайдер (ползунок) в микроактюаторе на поверхностных акустических волнах перемещается от одного встречно-штырьвого преобразователя к другому при сообщении ему энергии поверхностной акустической волны.

Moving mask lithography process — литография сдвигающейся маской (шаблоном). Одна из разновидностей технологии рентгенографии (один из технологических приемов, способов). Обеспечивает получение наклона боковой стенки в микроструктуре из полиметилметакрилата. Достигается посредством перемещения рентгеношаблона параллельно подложке, с нанесенным на нее рентгенорезистом, в ходе рентгеновского экспонирования.

Multidomain system — мультифизическая система, многофакторная система. Это система, где механические, электрические, тепловые и оптические явления следует детально рассматривать как на уровне компонентов, так и с системной точки зрения, когда компоненты соединены вместе. МЭМС и другие микросистемы относятся к мультифизическим системам. Моделирование переходов между разными физическими областями (например, с использованием метода аналогий) позволяет мощные симуляторы, разработанные для одной области, применять в другой области (например, применять Spice для моделирования механических систем). Для моделирования мультифизических систем используют различные математические методы: дифференциальные уравнения в частных производных; обыкновенные дифференциальные уравнения; дифференциально-алгебраические уравнения. Существует базовый подход для моделирования мультифизических систем, например, сложных МЭМС: разбиение системы на подсистемы и дальнейшая детализация на компоненты; моделирование поведения компонентов; симуляция целой системы, отмоделированной со связями всех компонентов, одним симулятором. Практичность данного подхода зависит от выбора наиболее подходящего метода моделирования и выбора оптимального симулятора каждой уровня абстракции или для каждой физической области.

Multipole — многополюсник, МЭМС-изделие. Представляет собой готовый участок электрической цепи, который можно подсоединять к другим ее участкам, но только определенными точками. Они называются полюсами (зажимами). Примеры: двухполюсники, четырехполюсники и др.

Multi-User MEMS Process (MUMPs) — многопользовательский МЭМС-процесс. Так называется одна из разновидностей технологического процесса изготовления МЭМС-изделий методами и приемами поверхностной микрообработки с использованием трех слоев поликристаллического кремния. Технологический процесс разработан в Калифорнийском университете в конце 80-х — начале 90-х годов XX века. Сейчас это коммерческая технология, предлагаемая исключительно фирмой Cronos (США). Cronos обеспечивает заказчиков, которыми являются промышленные и университетские сообщества, рентабельной и проверенной временем технологией поверхностной микрообработки. Этот процесс имеет следующие обычные характеристики стандартного микромашинного процесса: поликремний используется как структурный материал; осажденный оксид кремния используется как жертвенный слой; нитрид кремния используется как слой электрической изоляции между поликремнием и подложкой; металл (обычно золото) — это верхний слой микроустройства и он может быть использован в качестве проводящего слоя. Для примера рассмотрим изготовление по MUMPs-технологии электростатического микромотора. Это микроустройство включает в себя все перечисленные выше слои. Для того чтобы сделать разработанный технологический процесс как можно более универсальным (базовым), в MUMPs-технологии строго зафиксированы все толщины слоев, а также их функции. Все проектировщики МЭМС должны придерживаться и следовать этим определенным правилам проектирования. Эти определения и правила проектирования ограничивают конструкторов в разработке более сложных микро-

устройств, но они все равно делают возможным получение большого числа различных проектов (чипов) в стандартизованном технологическом цикле. Кроме того, такая стандартизация процесса производства чипов снижает стоимость их изготовления и позволяет из-за этого большему числу разработчиков все же реализовывать свои проекты. MUMPs-процесс начинается с использования кремниевой подложки *n*-типа диаметром 100 мм и удельным сопротивлением 1–2 Ом·см. Эта подложка сильно легирована фосфором для предотвращения или уменьшения прохода заряда к ней от электростатического микроустройства, расположенного на ее поверхности. Далее, слой нитрида кремния толщиной 600 нм осаждается на пластины в качестве слоя электрической изоляции. Затем осаждается поликремниевая пленка Poly0 толщиной 500 нм. Слой Poly0 используется как поверхность "земли" и для связи. Рисунок Poly0 формируется с помощью фотолитографии. Процесс включает в себя нанесение фоторезиста на подложку, экспонирование фоторезиста через соответствующую маску (фотошаблон), обработку экспонированного фоторезиста, создание желаемого рисунка для последующего травления и последующего переноса изображения на нижележащий слой. После фотолитографии слой Poly0 травится в специальной системе. Затем осаждается жертвенный слой из фосфоросиликатного стекла (PSG) толщиной 2 мкм с последующим его отжигом. Слой PSG, названный в технологии как First Oxide (первый оксид), будет удален в конце всего MUMPs-процесса для освобождения (открытия) первого механического слоя поликремния. Этот жертвенный слой можно сформировать с применением фотошаблонов (масок) Dimple (Окно) и Anchor1 (Якорь 1). После формирования изображения по первому оксиду осаждается первый структурный слой поликремния (Poly1) толщиной 2 мкм. Затем на слое поликремния литографией формируется изображение с помощью маски (фотошаблона), спроектированной для формирования первого структурного слоя Poly1. Затем Poly1 травится. Потом осаждается и подвергается отжигу второй слой PSG (Second Oxide — второй оксид). Рисунок на втором оксиде может быть получен для разных целей двумя разными масками (фотошаблонами): либо Poly1_Poly2_VIA, либо Anchor2. Фотошаблон Poly1_Poly2_VIA используется при травлении во вто-

ром оксиде окна к слою Poly1. Окна эти необходимы для получения механических и электрических соединений между слоями Poly1 и Poly2. Затем осаждается второй структурный слой Poly2 толщиной 1,5 мкм. После формирования топологического рисунка в Poly1 изображение формируется на структурном слое Poly2 (с использованием второго спроектированного фотошаблона Poly2). Слои Poly1 и Poly2 — это механические структурные слои MUMPs-процесса. Поэтому они оба могут быть получены травлением первого и второго оксида в конце процесса. Металлический слой толщиной 0,5 мкм — это последний осаждаемый слой в процессе MUMPs. Он может предназначаться для тестирования; формирования металлизации микроизделия; организации электрической связи; создания зеркальной поверхности с высоким отражением. Металлическая разводка формируется литографическим процессом с помощью маски (фотошаблона), называемой Metal (металл). Реализовать этот процесс МЭМС-проектировщики могут на собственном оборудовании. На завершающей стадии для окончательного получения готовых чипов выполняются следующие шаги. Сначала чипы погружаются в ацетон на 3 мин и затем в деионизированной воде выдерживаются 30 с. Эти две операции должны снять фоторезист. После этого чипы помещают в 49 %-ный травитель (плавиковую кислоту) на 1,5–2 мин для вытравливания оксида. Затем выдерживают несколько минут в деионизированной воде, а потом — в спирте 2 мин. Для снижения трения последние 10 мин чипы выдерживают при температуре до 110 °С.

Murphy-Seeds model — модель Мэрфи—Сидса. Модель для прогнозирования процента выхода годных полупроводниковых пластин с микроизделиями. Предсказывает распределение плотности дефектов вдоль пластины и от пластины к пластине. Например, вероятный выход годных монокристаллических интегральных

схем составляет $P = 0,5 \left[e^{-(AD)^{\frac{1}{2}}} + \left(\frac{1 - e^{-AD}}{AD} \right)^2 \right]$, где P — вероятный выход годных пластин; A — площадь кристалла монокристаллической ИС; D — плотность дефектов.

Новости нанотехнологий

Одноэлектронный амперметр бьет все рекорды

Ученым обычно трудно уловить движения отдельных электронов. Однако изучение электронного транспорта — одна из важнейших задач нанoeлектроники, молекулярной биофизики и биохимии.

При "слежении" за отдельным электроном он может поглощаться самим измеряющим устройством. Также электрон может отразиться от приемника и поступить обратно в устройство, из которого он вышел. Эту проблему ученые называют "*backscatter problem*". До сегодняшнего дня не было надежных инструментов по изучению электронного транспорта с точностью, позволяющей детектировать отдельные электроны. Однако японским ученым из Токийского Технологического института удалось преодолеть проблему рассеивания и создать самый точный на сегодняшний день амперметр (рис. 1).

Тошимаса Фуджисава и его команда использовали оригинальный подход для того, чтобы как можно "крепче" поймать электрон. Они создали устройство из двух последовательно соединенных квантовых точек, связанных с одной стороны с источником, а с другой — с приемником электронов. Благодаря "трехмерной" структуре квантовых точек можно наблюдать, рассеиваются электроны или нет, а затем уже делать выводы.

Но в основном благодаря свойствам квантовых точек в ам-

перметре электроны путешествуют с помощью механизма туннельного эффекта от одной квантовой точки к другой.

Кроме "слежения" за отдельными электронами амперметр может измерять с высокой точностью протекающий через него ток (правда, в определенных пределах).

Действенность устройства была доказана измерениями, проводимыми на одноэлектронном транзисторе. Границы измерений были довольно широки: от нескольких аттоампер до десятков (1 аттоампер = 10^{-18} ампер). Эти измерения были наиболее точными измерениями тока, проведенными во всем мире вообще. При этом уровень "шума" амперметра был ниже на три порядка, чем у существующих подобных устройств.

Как предполагает Фуджисава, его наноустройство позволит

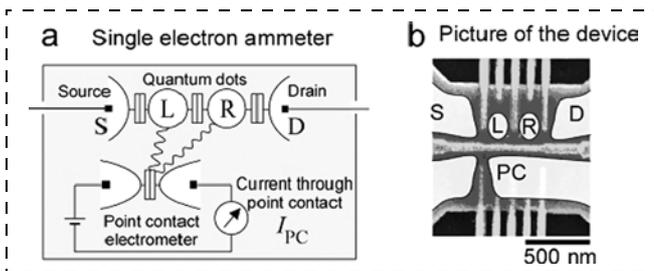


Рис. 1. Схема работы сверхточного амперметра

глубже изучить транспорт электронов в биологических наноструктурах. Также сверхточный амперметр пригодится и в нанотехнике.

Кроме того, Фукуяма отметил возможность создания на базе амперметра сверхчувствительного детектора света и магнитных полей.

Источник: Nanotechweb.org: Single-electron counter breaks new record (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/6/9/1>)

Гелиевый распылитель поможет в создании сверхточных атомных микроскопов

Новый подход, разработанный учеными из Университета Орегона, использующий миниатюрный "распылитель" атомов гелия, позволит создать микроскопы нового поколения для нанотехнологов. Эта исследовательская техника характеризуется высоким разрешением и может работать как с органическими, так и с неорганическими образцами.

Основной узел микроскопа — форсунка с капиллярами-фильтрами, позволяющая пропускать атомы гелия совместно с рентгеновским излучением. Второй, не менее важный компонент системы, — сверхчувствительная камера-детектор, которая передает изображения с нанометровым разрешением на рабочую станцию.

Принцип действия нового микроскопа сравнительно прост. Струи гелия, отражаясь от исследуемых поверхностей, формируют уникальный ансамбль, на котором происходит дифракция рентгеновского излучения. При этом дифракционный шаблон для каждой исследуемой поверхности уникален и содержит в себе "атомарную карту" образца. Современные технологии быстрой визуализации дифракции рентгеновских лучей позволяют получить искомую картину, которая впоследствии обрабатывается сверхчувствительной камерой. Эту систему ученые назвали даже не микроскопом, а "атомной камерой" из-за специфического принципа визуализации информации, полученной от образца.

Работа ученых поддержана Национальным научным обществом и Министерством образования США.

Источник: Nanotechnology-Now: Helium atoms sent by nozzle may light way for new imaging approach (<http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story id=16546>)

Intel и Micron объявили о производстве NAND flash чипов по 50-нанометровому техпроцессу

Компании Intel и Micron, долгое время сотрудничающие в области flash-памяти представили прототип 4-Гбит NAND flash

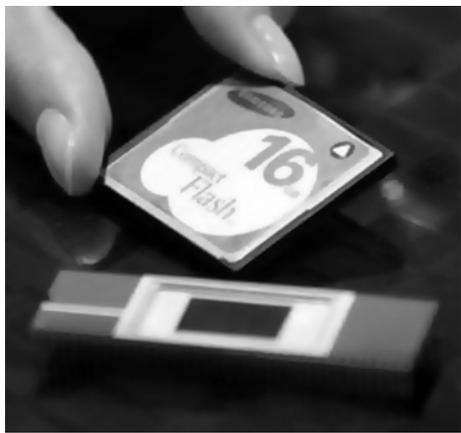


Рис. 2. Чип NAND flash

чипа (рис. 2), изготовленного по 50-нанометровому техпроцессу, разработанному Micron Technology Inc.

Чипы были изготовлены компанией IM Flash Technologies LLC — отделением, сформированным Intel и Micron.

Несколькими днями ранее компания Samsung Electronics Co. Ltd. представила 8-Гбит NAND flash-память, изготовленную по 60-нанометровому техпроцессу.

Представители Micron заявили, что компания планирует расширить емкость выпускаемых по 50-нанометровому техпроцессу до 8 Гбит к 2007 году.

Согласно исследованиям рынка NAND-памяти, в 2006 году он увеличится с \$13 до \$16 млрд и вырастет до \$30 млрд к 2010 году.

Источник: EETimes: Intel, Micron start sampling 50-nm NAND flash (<http://eetimes/news/semi/showArticle.jhtml;jsessionid=EGEUAC0ZPFCF4QSNLRSKHSCJUNN2JVN?articleID=191100459>)

Израильские ученые создали двуслойный нанокабель

Команде ученых из Тель-Авивского университета и университета Иерусалима удалось синтезировать коаксиальные металлические нанопроводники с использованием пептидных нанотрубок в качестве шаблона.

"Наши предыдущие исследования показали, что биомолекулы являются отличным материалом для производства проводников различного типа. Мы стараемся использовать особые свойства биологических объектов, чтобы получить необходимые нам многослойные металлические нанопроводники", — говорит один из исследователей Эхуд Газит.

Основой нанопроводников послужили нанотрубки, состоящие из нитей дифенилаланин-пептидов, сформированные с помощью самосборки (*self assembly*).

Для того чтобы изнутри наполнить нанотрубки серебром, ученым потребовалось изменить концентрацию нитрата серебра в составе нити. Благодаря этому исследователи смогли покрыть нанотрубки сверху золотыми наночастицами диаметром всего 1,4 нм, а внутри заполнить серебром.

В результате у ученых получились коаксиальные металлические нанопроводники с золотым покрытием толщиной 20 нм. Как утверждает Эхуд, полученные наноструктуры можно использовать в различных нанoeлектронных устройствах, например, для электромагнитного экранирования сигналов.

"Мы полагаем, что с помощью новой технологии нанесения металлов на биологические наноструктуры мы сможем в будущем конструировать более совершенные лаборатории-на-чипе и молекулярные сенсоры", — сказал Газит.

Источник: Nanotechweb: Peptide nanotubes lead to coaxial nanocables (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/8/7/1>)

Атомный ключ может привести к созданию адаптивных компьютеров

Ученые из Национального института стандартов и технологий (NIST), США, создали управляемый молекулярный переключатель, работающий от пучка электронов.

Сам переключатель представляет собой небольшую молекулу, в которой один из атомов перемещается в пределах двух определенных положений с помощью сфокусированного электронного луча (рис. 3). Это первое наноустройство, в котором отдельный атом перемещается по электрическому сигналу извне. Как говорят исследователи, дальнейшее развитие этой технологии позволит создать компьютеры совершенно нового типа.

"До сих пор то, что нам удалось манипулировать отдельными атомами, звучит как чистая фантастика", — говорит Йозеф Строчио, физик-исследователь из NIST.

Как далее объясняет Строчио, разработанная исследователями технология производства наноустройств на полупроводниковых и изолирующих тонких пленках делает возможным конструирование сложных нанoeлектронных устройств, выполняющих логические операции с использованием отдельных атомов.

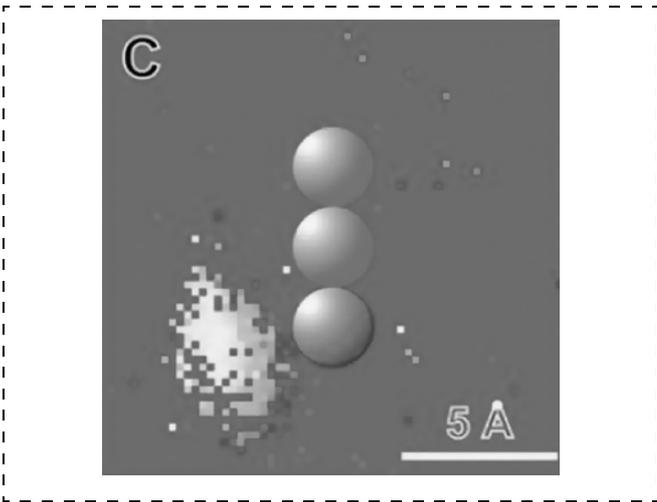


Рис. 3. Перемещение атома кобальта в составе ключа под действием электронного луча

В основе атомного ключа — криогенный сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) с иглообразным кантилевером, позволяющим создавать пучки электронов разных энергий (рис. 4, см. четвертую сторону обложки). Сначала ученые поатомно "собрали" наноустройство с помощью того же СТМ. На медной поверхности с помощью зонда СТМ в режиме манипулирования были размещена цепочка атомов кобальта и несколько атомов меди (рис. 5, см. четвертую сторону обложки).

Далее, тем же зондом, только в другом режиме, на цепочку атомов кобальта ученые посылали пучки электронов, которые привели к отклонению одного атома кобальта, что позволило говорить о работе атомного ключа.

Для того чтобы узнать, как долго атом остается на месте переключения, ученые использовали новый тип спектроскопии — "туннельно-шумовую спектроскопию". Этот вид исследований появился в 2004 г., когда было установлено, что при перемещении зондом СТМ с одного места на другое атом издает характерный шум, что можно определить с помощью того же микроскопа.

Ученые также установили, что при напряжении между зондом СТМ и подложкой 15–20 мВ вероятность переключения постоянна, а это говорит о том, что энергии от пучка электронов достаточно для перемещения атома. При более высоких энергиях переключение произойдет быстрее.

Как подчеркивает Строчио, перемещение атома в наносистеме изменяет динамику всего атомного ансамбля. Таким образом, переключениями можно изменять архитектуру самого логического устройства. А это, в свою очередь, может привести к созданию адаптивных и переконфигурируемых компьютеров с "программируемым железом".

Строчио уверен, что дальнейшие исследования наносистем на основе атомного ключа позволят глубже изучить молекулярную динамику и помогут создать новое поколение компьютеров, созданных поатомно.

Источник: EurekAlert: NIST scientists use electron beam to unravel the secrets of an "atom switch" (<http://www.eurekalert.org/pub/releases/2006-08/nios-nso08140.php>)

Nanosolar грозит захватить мировой рынок по производству солнечных элементов

Компания Nanosolar, расположенная в Кремниевой Долине, выиграла инвестиционный конкурс в размере 100 млн долл. на строительство и обслуживание наибольшей в мире фабрики по созданию дешевых солнечных элементов в районе залива Сан-Франциско. Суммарная мощность завода — около 430 МВт в год, а это втрое превышает суммарный годовой вы-



Рис. 6. Производство пленок по технологии Nanosolar

пуск солнечных элементов в США. Выпускать компания будет до 200 млн солнечных панелей в год. Как заявляют представители компании и инвесторы, строительство фабрики закончится в 2007 г.

Основанная в 2001 г. молодая, но амбициозная компания Nanosolar уже имела ряд патентов в области наноэлектроники и солнечных элементов. После того, как инвестиционные фирмы и частный инвестор Кристиан Рейтбургер обратили внимание на перспективную компанию, владеющую новыми технологиями по изготовлению недорогих и эффективных солнечных панелей, Nanosolar приобрела вес среди производителей "солнечной" микроэлектроники. Тем более, что в США правительство и частные компании уделяют большое внимание финансированию производства солнечных элементов, что, как полагают аналитики, улучшит позиции страны в периоды энергетического кризиса.

"У нас очень прочная позиция для будущего лидерства на рынке полупроводниковых солнечных элементов, — говорит глава компании Мартин Рошейсен. — Благодаря разработанным нами инновациям в производственном процессе наши солнечные элементы более производительны, чем остальные, и, что самое главное — отличаются низкой себестоимостью".

Инновация в технологии производства солнечных элементов заключается в использовании (рис. 6) пленок медь — индий — диселенид галлия (CIGS-пленки). Этот полупроводник характеризуется на 20 % большим фотоэлектрическим эффектом, чем современные солнечные элементы. Тонкая пленка CIGS толщиной всего 1 мкм производит столько же электричества, сколько 200–300-микрометровая полупроводниковая кремниевая вафля.

Современный рынок кремниевых полупроводниковых солнечных панелей составляет 90 % общего мирового потребления солнечных элементов.

Одним из преимуществ новой технологии производства пленок является "самосборка" чернил, состоящих из наночастиц, которые покрывают поверхность CIGS. Благодаря этому солнечные элементы могут быть нанесены на гибкую основу. А это практически невозможно при использовании кремниевых элементов.

Как только начнется производство солнечных панелей на новом заводе компании, она сможет войти на \$11,2-миллиардный рынок (по данным 2005 г.) фотоэлектроники. Как прогнозируют эксперты, к 2007 г. его объем вырастет на 55 %. Маркетинговые исследования, выполненные фирмой Clean Edge, свидетельствуют о том, что к 2015 г. рынок вырастет до \$51 млрд.

Сегодня руководство компании Nanosolar беспокоится о том, чтобы обеспечить нужный темп производства сразу же после завершения строительства завода.

Ранее венчурная компания EverQ, связывающая воедино три наиболее большие производственные компании солнечных

панелей, построила свой первый завод в Талхейме, Германия. Завод стоимостью 70,5 млн € вышел на мощность 30 МВт в год. Он поддержан частично грантом правительства Германии в размере 27,5 млн €. Естественно, что открытие в 2007 г. нового завода Nanosolar с мощностью 430 МВт в год может сильно ударить по сложившемуся рынку солнечных элементов.

Источник: Nanotechweb.org: Nanosolar to build world's largest solar cell factory (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/5/6/10/1>)

Учеными сконструирован "Святой Грааль" от электроники

В течение длительного времени ученые пытаются создать чипы, которые будут и обрабатывать, и хранить данные. Недавно ученые из Принстонского университета заявили о создании нового класса полупроводниковых устройств, в которые можно интегрировать наноматериалы методом точного размещения атомов металла на материал, из которого формируется подложка чипа (рис. 7, см. четвертую сторону обложки). Таким образом, ученые надеются получить контроль на атомном уровне за архитектурой чипа.

"Включение магнитных участков в чипы позволит не только хранить информацию, — говорит Али Яздани, глава исследовательской группы ученых. — Это позволит использовать квантовые свойства атомов металла, выполняя спинтронные операции над ними".

О массовом производстве подобных чипов пока речи нет — ученые разместили несколько атомов с помощью зонда сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), "вынув" предварительно атомы материала подложки.

"Вообще, сама возможность создавать поатомно компьютерные чипы — это своеобразный Святой Грааль современной электроники. Мы очень гордимся, что нам первыми удалось не только создать упорядоченный атомарно электронный компонент, но и совместить в нем два типа электронных приборов: традиционный и спинтронный".

О своей работе ученые сообщили в выпуске журнала Nature от 27 июля.

Сам чип создавался на подложке полупроводника арсенида галлия. Далее, с помощью СТМ был проведен обмен части атомов подложки на атомы магния. Магний усилил магнитные свойства полупроводника, создав локальные зоны "намагниченности".

Полупроводниковый чип, созданный на основе модернизированной подложки, может выполнять две функции — работать с данными и хранить их одновременно. Сегодня же для этого в компьютерах используются несколько различных чипов, взаимодействующих друг с другом — ЦПУ проводит логические операции, а RAM или ROM память их сохраняет.

Естественно, объединение этих двух устройств компьютеров в одно позволит уменьшить потребление энергии и увеличит скорость обработки информации. В перспективе данная технология может привести к появлению на рынке мультимедийных устройств с одним чипом, в котором будет "вся" вычислительная электроника и память. Перспективы, открывающиеся при представлении возможностей такой техники, огромны. Это и "одноразовые" электронные книги, и различные мобильные мультимедийные игры, и просто "умная пыль".

Источник: EurekAlert: Scientists build "magnetic semiconductors" one atom at a time (http://www.eurekalert.org/pub_release/2006-07/ru-sb072406.php)

Вредность аэрозолей, содержащих наночастицы, определит новый экспресс-анализатор

В межнациональной лаборатории исследований качества воздуха и здоровья при Технологическом университете Квинсленда создан экспресс-тестер, позволяющий судить о вредности для здоровья человека распыленных в воздухе наночастиц различного химического состава.

Как полагают ученые, именно взвешенные в воздухе наночастицы являются основной причиной возникновения заболеваний сердца и легких.

Прибор направили в институт имени Пауля Шеррера, где специально для Европейского научного общества сконструировали вторую такую же машину.

Детектор определяет два важнейших свойства распыленных в воздухе наночастиц — их токсичность и гигроскопичность. Как говорят ученые, прибор поможет не только точно определять степень вредности выхлопных автомобильных газов, но и устанавливать химическую природу возникновения наночастиц.

Благодаря экспресс-анализатору ученые уже установили, что наночастицы, найденные в выхлопных газах дизельных автомобилей, могут разлагаться на сернистую кислоту, аммиак и воду.

Источник: EurekAlert: Something in the air: Nanoparticles and...? (http://www.eurekalert.org/pub_release/2006-07/ra-sit072506.php)

Составил Ю. Г. Свидиненко



SENSOR + TEST 2007 DIE MESSTECHNIK-MESSE The Measurement Fair

Международная специализированная выставка и конгресс "Датчики, технологии измерений и поверок"

Нюрнберг, 22—24 мая 2007

SENSOR + TEST — компактная, хорошо структурированная, отвечающая требованиям самых высоких стандартов выставка — одно из ведущих событий в области сенсорных, измерительных и тестовых технологий. Выставку отличает высокий процент иностранных экспонентов и посетителей, четкая структура и подробная программа сопутствующих научных мероприятий. Здесь будет представлен полный спектр разнообразных измерительных систем — от микросенсоров до сложных тестовых комплексов, от готовых компонентов до индивидуализированных сервисов.

В 2006 г. выставочная площадь составила 24 073 кв.м., на выставку приехало 550 участников, а посетило выставку 7 479 человек. Выставка проводится ежегодно.

Список представленных на выставке SENSOR + TEST 2007 разделов включает в себя:

- Элементы датчиков, датчики, сенсорные системы и сенсорные измерительные приборы.
- Услуги для измерительных технологий, научные исследования.
- Измерительная техника для лабораторий, устройства калибровки, устройства анализа и поверяющие приборы.
- Компоненты, устройства, системы и программное обеспечение для технических измерений.
- Системы калибровки и услуги для измерительной и поверочной техники.
- Измерительная техника и поверочная техника для транспортной техники, испытания материалов и контроля качества, настройка измерительных систем и поверочных систем

Более подробную информацию Вы можете найти на официальном сайте выставки: www.sensor-test.de

CONTENTS

Shevchenko V. Ya., Samojlovich M. I. *Geometry, Information and Structure of Nano-Peace* 2

The generalized principles of the structural chemistry of nanosized objects are discussed. The necessity of an extended symmetry treatment is pointed out related with going over to the consideration of the special constructions of the algebraic geometry. The concept of the geometrical structural complexes is examined.

Gruzdev A. O. *The Development of Educational Nano-Laboratory on the Basis of SPM "Nanoeducator" and Apple Platform* 8

In this paper basic stages of "Nanoeducator" Scanning Probe Microscope (SPM) improvement are described. New MacOS X software development with principal problems and their solutions as well as future project development are analyzed.

Amelichev V. A., Verner V. D., Il'kov A. V., Saurov A. N. *Correlation between Micro System Technology and Technology of Microelectronics itself* 10

There are more than 20 technologies of micro treatments for using in micro systems fabrication. It is clear that for mass production of indicated above devices is Si based technology of micro treatment. Using example of formation elastic MEMS it was shown ways of its fabrication technology of CMOS integrated micro circuits. Optimal way is simultaneous fabrication of general technological layers on the base of joint manufacturing CMOS and MEMS components can be development.

Shcheglov P. A., Nikishina E. E., Drobot D. V., Lebedeva E. N. *Prospective Technology of Metallic and Oxide Nano-Materials Based on Less-Common Elements* 15

The article represents an overview of work aimed on the creation of methods of obtaining of metallic and oxide nano-materials based on less-common elements (Nb, Ta, Re, Mo, W, Rare Earths) possessing a complex of controllable properties. The underlying concept is the preparation of powders by thermal destruction of precursor phases (single- and multi-metal oxohydroxide or oxoalkoxide compounds). The suggested technology allows obtaining nano-sized powders of refractory metals and alloys, simple and complex oxides, and their solid solutions, which are promising in application in nano- and micro-technology.

Pavlov S. V. *Influence of Electric Field, Impurities and Boundary Electromechanical Stresses on Polarization Profile of thin Ferroelectric Film* 18

Influence of external electric field, impurities and electromechanical interaction with substrate material on the polarization profile of ferroelectric thin film has been theoretically studied. The obtained results are in a good agreement with experimental data of polarization profile in thin films of lead titanate-zirconate (PZT) ceramics with PbO impurity. Physical meaning of negative extrapolation length is discussed.

Shautsukov A. G., Kizilov I. M., Kuznetsov G. D. *The Modelling of Process of Formation Alloyed by Recoil Atoms of Layers* 21

There are developed the algorithms of modelling of process of formation nanodimensional layers alloyed by recoil atoms. Algorithms provide

modelling process of introduction of recoil atoms in a layer with the set parameters and modelling of process photon annealing alloyed layer by recoil atoms. Numerical experiment is carried out and are determined: parameters received alloyed by recoil atoms of layers; a degree of redistribution of the introduced recoil atoms at photon annealing the created layers.

Rembeza E. S., Svistova T. V., Rembeza S. I., Komarova A. S., Dyrda N. N. *Nanocomposites SnO_x:MnO_y for Microelectronic Gas Sensors* 23

The possibility of use film nanocomposite SnO_x:MnO_y as gas sensitive layers for microelectronic gas sensors is discussed. Nanocomposites on the base SnO₂ were fabricated by reactive ion-beam sputtering of composite target in the ambient of Ar + O₂. Element composition, electrical-physical properties and gas sensitivity of the films were studied. It is shown that Mn additive decreases temperature of maximal gas sensitivity of film nanocomposites to ethanol, acetone, ammonia, propanol and formaldehyde vapors in the air. The conclusion about perspective of using film nanocomposites SnO_x:MnO_y for microelectronic gas sensors is done.

Afonin S. M., Afonin P. S. *Modelling Characteristics of Sectional Piezoactuators for Nano- and Micromanipulators* 25

Statics and dynamic characteristics of simple, sectional and composite piezoactuators for nano- and micromanipulators are proposed. Effect of geometric and physical parameters of piezoconverter and external load on its statics and dynamic characteristics are determined. Main features and principles of program-apparatus means for system modelling characteristics of simple and sectional piezoactuators are presented.

Abramov I. I., Dvornikov O. V. *The Bipolar-JFET IC Simulation Sequence in the "Spice"-like Programs* 30

The IC's schematic simulation sequence for the "Spice"-like programs is proposed. It is well-suited for employment with system approach to analog bipolar-JFET LSI/VLSI synthesis.

Tikhonov R. D. *A Dual-Collector Magnetotransistor: Negative Sensitivity, Absolute Sensitivity and Noises* 36

With the help of modern device-technological modeling the distributions of carriers of a charge, density of currents and recombination speed in two-collector lateral bipolar the magnetotransistor generated in a well at external connection of contacts to a substrate and to a well are investigated. The experimental research dual-collector lateral bipolar magnetotransistor with base in well, as sensor of weak magnetic fields is spent. The absolute sensitivity 900 V/T, voltage of noise in a working mode and resolution $5 \cdot 10^{-10}$ T is determined.

Godovitsyn I. V. *Calculation of Curvature of Electrostatically Deflected MEMS RF Switches by Analytical and Finite-Element Approaches* 41

In this work 2D calculation of deformation of electrostatically deflected MEMS RF switches using energy minimization method (Ritz method) is performed. Alternatively simulation of the same structures with help of finite-element implemented software (ANSYS) is carried out. Good agreement of results provided by both methods is shown and applicability of faster Ritz method to calculation of curvature of electrostatically controlled MEMS RF switches is discussed.

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEMS TECHNIQUES" (Nano- i mikrosistemnaa tehnika, ISSN 1813-8586)
Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(495) 684-5008. Fax: +7(495) 681-3798

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(495) 269-5510.

E-mail: nmst@zknet.ru; <http://www.microsystems.ru>

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (495) 269-5510. E-mail: nmst@zknet.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор И. С. Павлова. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 01.09.2006. Подписано в печать 04.10.2006. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,94. Заказ 1627. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии — филиал ОАО "ЧПК", 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15