

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 6 ✧ 2007

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

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

Учредитель:

Издательство
"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ

- Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е. Получение наночастиц 2
Бобков С. Г., Киреев В. Ю. Проблемы перехода микроэлектроники
в субнанометровую область размеров. Часть 2. Возможности наноимпринт
литографии и проекционной оптической литографии. 8

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Александрова И. П., Иванов Ю. Н., Суховский А. А., Вахрушев С. Б. Исследование
локальной структуры сегнетоэлектрика-релаксора $\text{Na}_{1/2}\text{V}_{1/2}\text{TiO}_3$ методом ЯМР ^{23}Na . 19
Колешко В. М., Сергейченко А. В. Золь-гель методы формирования
наноструктурированных материалов для сенсорных микросистем 24
Шерстнев П. В., Батурич А. С., Шешин Е. П., Князев А. И. Магнитное
ориентирование углеродных порошков как метод повышения эффективности
автоэмиссионного катода 29

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

- Макаров В. М., Иванов П. Г., Зая В. Г. Моделирование кольцевых фильтров на ПАВ . . 33

КРЕМНИЙ НА ИЗОЛ ЯТОРЕ

- Мустафаев А. Г. Конструктивные и технологические способы улучшения параметров
КНИ-МОП-транзисторов 37

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Сабир Кумар Саркар, Анкуш Гош, Самия Деб Бхатъячарья, К. Сентил Кумар, Соувик
Саркар. Применение устройств односпиновой логики при создании ПСП генератора
для систем прямой последовательности с распределенным спектром 43
Телец В. А. "Интеллектуальные" боеприпасы и мины XXI века 48

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Ушков А. В., Исакова Г. А., Рябов В. Т. Разработка методики компенсации выпуклых
углов при формировании мембраны чувствительного элемента давления с жестким
центром в водном растворе КОН. 55
Горнев Е. С., Зайцев Н. А., Пузикова Е. В., Сафронов А. Я. Исследование
и разработка микроэлектромеханического реле на основе пьезоэлектрических пленок . 58

СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

- Яшин К. Д., Лацапнёв Е. В. Англо-русский терминологический справочник по микро-
и наносистемной технике 61

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 75

Contents 80

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России
Аннотации статей журнала и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала: http://www.microsystems.ru . E-mail: nmst@zknet.ru
ПОДПИСКА: <ul style="list-style-type: none">по каталогу Роспечати (индекс 79493);по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)в редакции журнала (тел./факс: 269-55-10)

УДК 003.26

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, доц.,
В. С. Осипович, С. Е. Пицук,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, г. Минск

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ

В настоящей обзорной статье рассмотрены вопросы получения нанокристаллов (наночастиц) различных материалов.

В журнале "Нано- и микросистемная техника" (№ 6, 2006 г.) в рубрике "Новости нанотехнологий" освещены некоторые вопросы применения наночастиц в медицинской диагностике и лечении рака. Специфические свойства наночастиц обусловлены тем, что доля атомов, находящихся на поверхности, сопоставима с общим числом атомов, составляющих частицу. Для частиц размером около 1 нм, по форме близких к сферическим, отношение числа поверхностных и внутренних атомов составляет ~1. При увеличении размера (до десятков нанометров) влияние этого отношения на свойства вещества еще остается достаточно сильным, хотя доля поверхностных атомов уменьшается. В настоящее время такие системы получают и всесторонне изучают не только в химии, но и в физике, биологии, в науках о материалах. В связи с этим оказываются важными и требующими развития вопросы, связанные с получением наночастиц и их стабилизацией.

Физические основы получения наночастиц

Существуют два способа получения наночастиц — диспергационный и конденсационный. *Диспергационные* основаны на измельчении макроскопических частиц до наноразмеров, *конденсационные* — на образовании частиц при фазовых переходах. Механическое диспергирование для получения наночастиц не получило широкого распространения. Для металлических наночастиц используется ультразвуковое измельчение. При измельчении конкурируют два противоположных процесса — диспергирование и агрегирование возникающих частиц [1]. Подбирая оптимальные условия, можно получить частицы требуемого размера. Однако распределение частиц по размерам чаще всего бывает достаточно широким.

Конденсационные способы подразделяются на физические и химические. Формирование наночастиц в этих способах осуществляется через ряд пе-

реходных состояний с образованием промежуточных ансамблей, приводящих к возникновению зародыша новой фазы, спонтанному его росту и появлению физической поверхности раздела фаз. При этом важно обеспечить высокую скорость образования зародышей новой фазы и малую скорость их роста. Наиболее простым и часто используемым способом является синтез наночастиц в растворах при протекании различных реакций (так называемая химическая конденсация).

Для получения металлических наночастиц (Au, Ag, Pd, Pt, Co, Ni, Cu) применяют реакции восстановления. В качестве восстановителя используют соответствующую соль металла и многие другие неорганические и органические соединения. Поскольку получающиеся в таких реакциях наночастицы обладают сильно развитой межфазной поверхностью, необходима стабилизация частиц для предотвращения их агрегирования. В качестве стабилизаторов обычно используют высокомолекулярные соединения, а также соединения, образующие комплексы на поверхности возникающих частиц. Например, наночастицы золота могут быть получены восстановлением хлорида золота боргидридом натрия с использованием в качестве стабилизатора додекантиола [2]. Широко используются для стабилизации наночастиц тиолы [3, 4]. Изолированные частицы могут быть с легкостью снова растворены в неполярных растворителях и находиться в стабильном состоянии сколь угодно долго.

Метод коллоидной химии

Этим методом получают нанокристаллы A_2B_6 -полупроводников (CdSe, CdS, CdTe, ZnS, ZnSe и др.) или A_3B_5 -полупроводников (InP, GaP, GaAs, InAs). Нанокристаллы получают сферической формы размером от 1 до 5 нм в органических растворителях, полимеризующихся при комнатной или более низкой температуре. Отличительными особенностями метода являются низкая температура (около 200 °С) синтеза коллоидных частиц, возможность широкого изменения концентрации частиц, небольшая концентрация поверхностных дефектов. Раствор химических реагентов, содержащих соединения элементов II и IV групп, вводят в растворитель, содержащий молекулы, взаимодействующие с поверхностью возникающих наночастиц (рис. 1). Это ограничивает рост частиц. Более крупные частицы можно осадить и получить раствор практически одинаковых по размеру частиц. Титрованием осадителя в растворе, содержащем дисперсные нанокристаллы, удается отделить

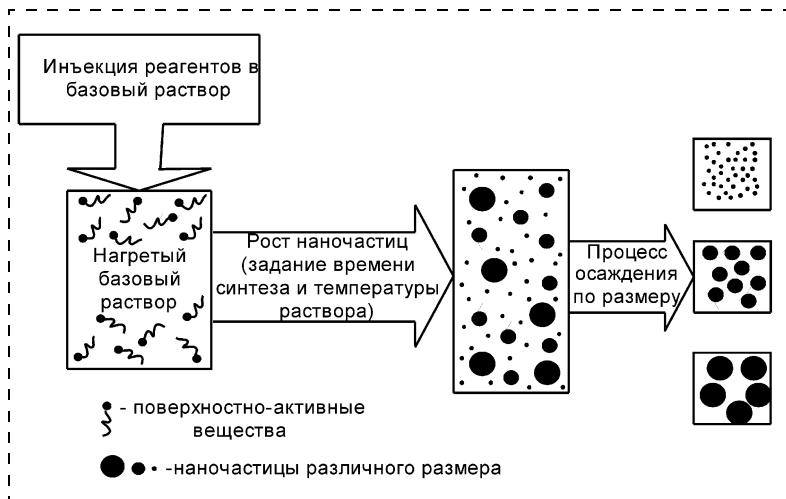


Рис. 1. Схематическое изображение этапов синтеза монодисперсных коллоидных наночастиц

практически монодисперсные наночастицы с диаметрами, различающимися только на несколько процентов [5].

Особенности синтеза A_3B_5 -полупроводников

Сравнивая синтез полупроводников A_3B_5 с синтезом A_2B_6 , отметим основные проблемы. Во-первых, для получения качественной A_3B_5 -кристаллической структуры нужен более высокотемпературный режим, что может привести к необратимой агрегации коллоидных частиц. Во-вторых, и это основная проблема, являющаяся ключевой для всей задачи синтеза, нельзя получить в растворе соединение A_3B_5 путем прямой реакции между соответствующими атомами или ионами, как для A_2B_6 [6, 7], поскольку, находясь в свободном состоянии, они будут реагировать с растворителем. Путь решения этой проблемы лежит через создание металлоорганических комплексов, которые предотвращали бы ненужные реакции и давали бы при пиролизе необходимые соединения. Но тут, помимо трудностей с нахождением таких металлоорганических соединений, возникает проблема их низкой реакционной способности, а это ведет к полидисперсности образующегося коллоида, а кроме того, требует более длительного периода роста и более тонкого температурного контроля [7].

Образование зародышей кристаллизации

Синтез монодисперсных квантовых точек требует дискретных по времени событий роста наночастиц на образовавшихся ядрах кристаллизации (рис. 2) [8]. Быстрая инъекция реагентов в химический реактор увеличивает концентрацию продуктов реакции до границы кристаллизации. Короткий выброс зародышей кристаллов частично ослабляет перенасыщение раствора. Так как рост нанокристалла схож с ростом любого другого кристалла, то исходное распределение размеров квантовых точек в основном определяется временем, в

течение которого центры кристаллизации сформировались и начали расти. Если процентное соотношение нанокристаллов, растущих в течение периода зарождения, мало по сравнению с последующим периодом роста, то нанокристаллы могут со временем стать более однородными [8]. Большинство систем проявляют особую фазу роста, называемую "Освальдовское созревание" (Ostwald ripening) [9]. В этом процессе высокая поверхностная энергия маленьких нанокристаллов вызывает их растворение и осаждение на больших нанокристаллах. Таким образом, средний размер нанокристаллов увеличивается со временем за счет уменьшения числа маленьких наночастиц. Использование "Освальдовского созревания" может существенно упростить получение квантовых точек нужного размера [8].

Исходные материалы для синтеза наночастиц

При выращивании сложных полупроводниковых квантовых точек необходимое перенасыщение и последовательное зарождение кристаллов может быть инициировано быстрым введением металлоорганического реагента в энергично взбалтываемый химический реактор, содержащий горячий (150–300 °С) базовый растворитель (рис. 3). Процесс роста составляет около 20 мин. В качестве растворителя обычно используется смесь длинноцепочечных алкилфосфинов R_3P , оксидов алкилфосфинов R_3PO (R — бутил или октил), алкиламины и т. д. [8]. При синтезировании нанокристал-

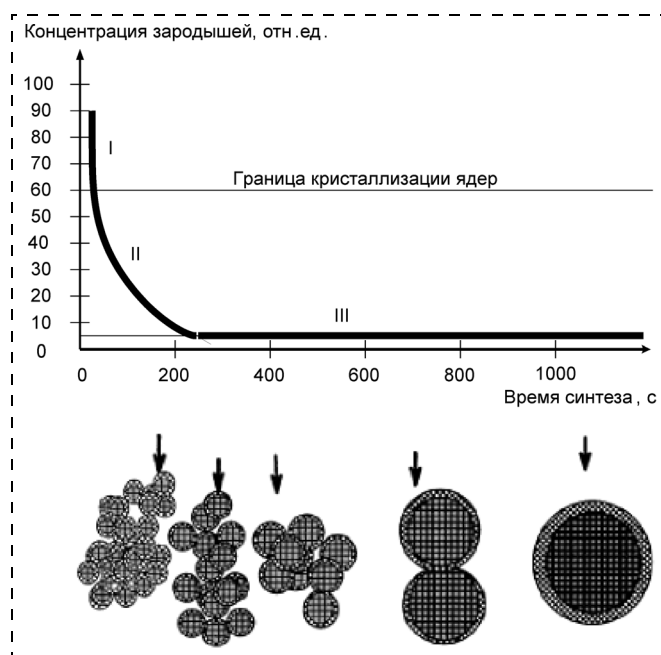


Рис. 2. Процесс роста монодисперсных квантовых точек (модель Ла-Мера) [8]:

I — образование зародышей квантовых точек; II — рост квантовых точек из раствора; III — "Освальдовское созревание"

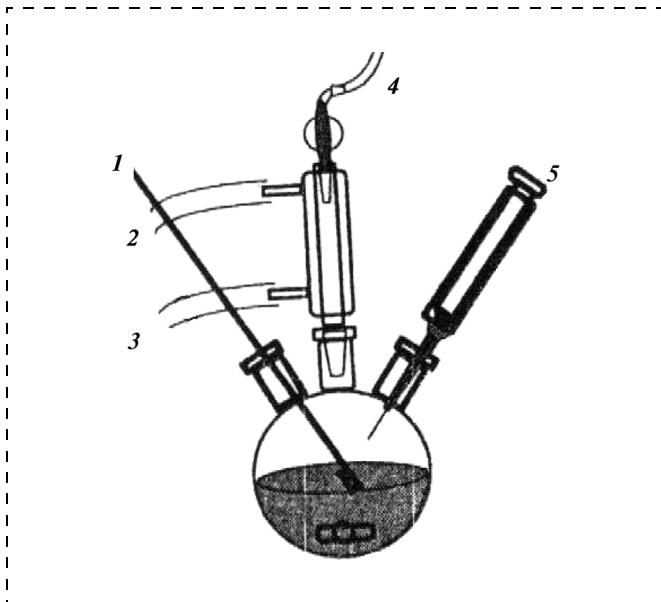


Рис. 3. Химический реактор:

1 — термометр; 2, 3 — выходы к насосу; 4 — доступ для инертного газа; 5 — шприц с металлоорганическими соединениями

лов II—VI групп с составом ME, где M — это Zn, Cd, Hg; E — это S, Se, Te, в качестве исходных веществ II группы выбираются алкилы металлов (диметилкадмий, диэтилкадмий, диэтилцинк, дибензилртути). Источниками VI группы чаще всего являются фосфорорганические халькогениды (R_3PE) или дитриметилсилилхалькогенид $(TMS)_2E$ (TMS — триметилсилил), где E — это S, Se и Te. Класс реагентов R_3PE в основном выбирается как источник Se и Te, так как его легче приготовить; $(TMS)_2E$ выбирается как источник S, потому что он химически активнее, чем R_3PE . Синтез нанокристаллов III—V групп с составом ME, где M — это In, Ga; E — это As, P, включает реакцию соли металла ($GaCl_3$, $InCl_3$) с соответствующим трис(триметилсилил)пниктогеном $P(SiMe_3)_3$ или $As(SiMe_3)_3$ в базовом растворителе с температурой 200—300 °C. Для получения наночастиц из A_3B_5 -полупроводников необходим довольно долгий период процесса роста (несколько дней). Выращивание нанокристаллов не ограничивается использованием только R_3P и R_3PO в качестве базовых растворителей, закипающих при высокой температуре. Введение реагентов в горячие алкилфосфиты, алкилфосфаты, алкиламины и фураны также порождает синтез нанокристаллов [10].

Стабилизирующие вещества

В период роста для предотвращения слипания и выпадения нанокристаллов в осадок должны присутствовать стабилизирующие вещества [11]. Они служат для уравнивания скорости роста нанокристаллов, пространственной стабилизации нанокристаллов в растворе и пассивирования электронного состояния поверхности в полупроводниковых

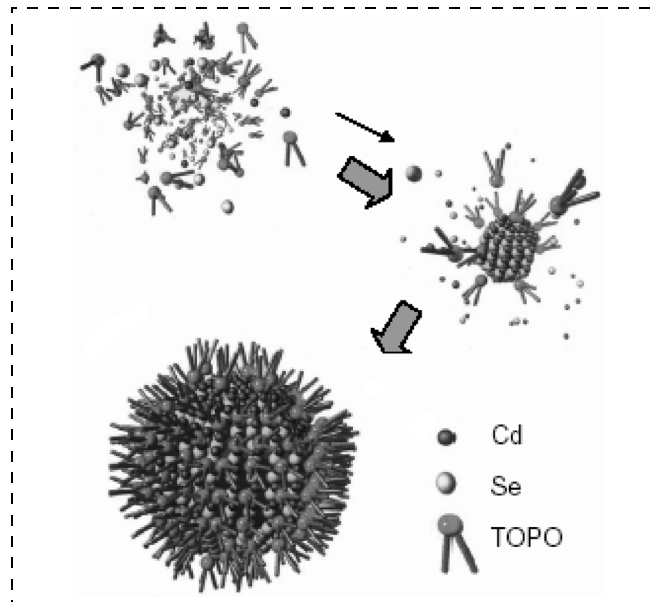


Рис. 4. Схематическое изображение наночастицы CdSe, покрытой оксидом триоктилфосфина [12]

нанокристаллах (рис. 4). Требования к стабилизатору довольно высокие [12]. Прорыв был сделан группой американских исследователей [8], которые использовали триоктилфосфин (trioctylphosphine, TOP) и оксид триоктилфосфина (trioctylphosphine oxide, TOPO) в качестве и растворителя, и стабилизатора при синтезе ряда соединений A_2B_6 . Пассивируя поверхность наночастиц, молекулы TOPO и TOP обеспечивают не только контролируемый рост при достаточно высоких температурах (до 360 °C), но и растворимость в большом количестве неполярных органических растворителей.

Отделение и очищение квантовых точек

Нанокристаллы не подвержены агрегации только в том случае, если стабилизирующие вещества обеспечивают отталкивающую силу, достаточную для преодоления присущего нанокристаллам притяжения Ван-дер-Ваальса. Применительно к CdSe данная процедура может выглядеть следующим образом [8]. Отделение осадка на центрифуге дает оптически чистый раствор наночастиц. Дальнейшее осаждение и промывка метанолом, последующая вакуумная сушка позволяют получить изолированные наночастицы, поверхность которых пассивирована TOPO и которые хорошо растворяются во многих неполярных органических растворителях: алканах, пиридинах, аминах, фосфинах, ароматических углеводородах, длинноцепочечных спиртах. При очистке и изоляции наночастиц InP в качестве осадителя применяется [13] CH_3CN , а в качестве растворителя — толуол. Выбор пары растворитель—осадитель определяется веществами, находящимися в растворе после синтеза, что, в принципе, оставляет некоторую степень свободы

в ее выборе. Однако эти вещества должны быть взяты такими и в таком количестве, чтобы не лишиться поверхность наночастиц пассивирующего слоя.

Осаждение по размеру

Включает в себя или титрование осадителя в растворе, содержащего дисперсные нанокристаллы, или избирательное испарение смеси растворитель/осадитель для получения постепенного хлопьеобразования [14]. Если в результате дисперсии произошло только частичное хлопьеобразование, то проводится фильтрация или центрифугирование взвеси для дополнительного осаждения более крупных нанокристаллов. Более мелкие остаются взвешенными в растворе. Осадок может быть заново рассеян в растворителе и повторно подвергнут этой процедуре для дальнейшего сужения распределения размеров. Подобным образом постепенное добавление дополнительного растворителя в отфильтрованную надосадочную жид-

кость осуществляет осаждение следующей по размеру фракции. Осаждение по размеру аналогично очищению путем фракционной кристаллизации [15] или ранее применяемым методам фракционирования полимеров на основе молекулярной массы. Более узкое начальное распределение размеров позволяет достигать ожидаемого разброса по размеру с меньшим числом фаз осаждения. Это приносит лучшие результаты.

Наночастицы типа "ядро—оболочка"

Были синтезированы наночастицы смешанных составов типа "ядро—оболочка", например, CdSe/ZnS; ZnS/CdSe; $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ и др. [16]. Рис. 5 отражает структуру двухслойных нанокристаллов CdSe/ZnS [17]. Такие наночастицы получают в результате контролируемого осаждения молекул одного типа (оболочка) на предварительно синтезированной наночастице другого типа (ядро). При разработке технологии покрытия нанокристалла

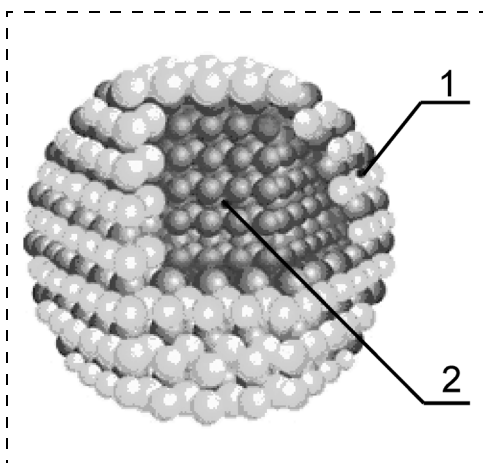


Рис. 5. Схематическое изображение атомной модели двухслойной полупроводниковой наночастицы [17]: 1 — полупроводниковая оболочка ZnS; 2 — полупроводниковое ядро CdSe

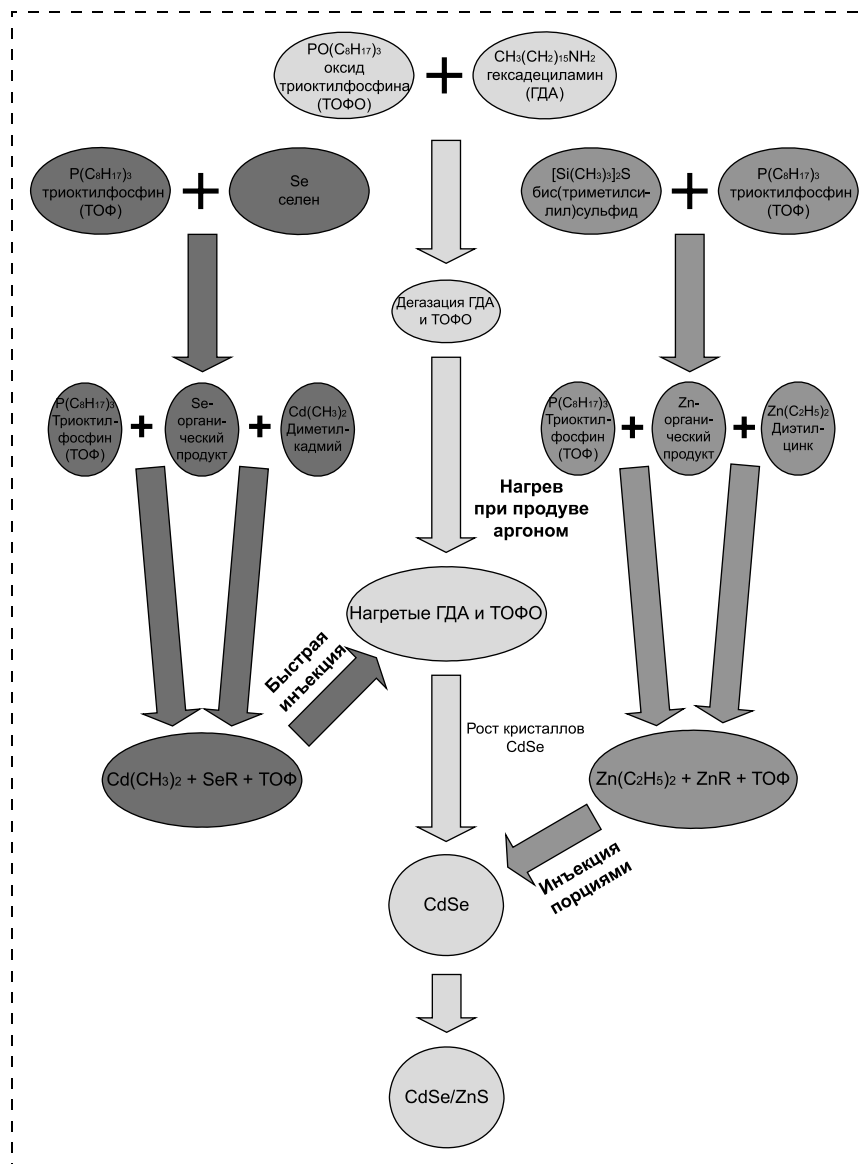


Рис. 6. Структурная схема процесса синтеза нанокристаллов CdSe/ZnS

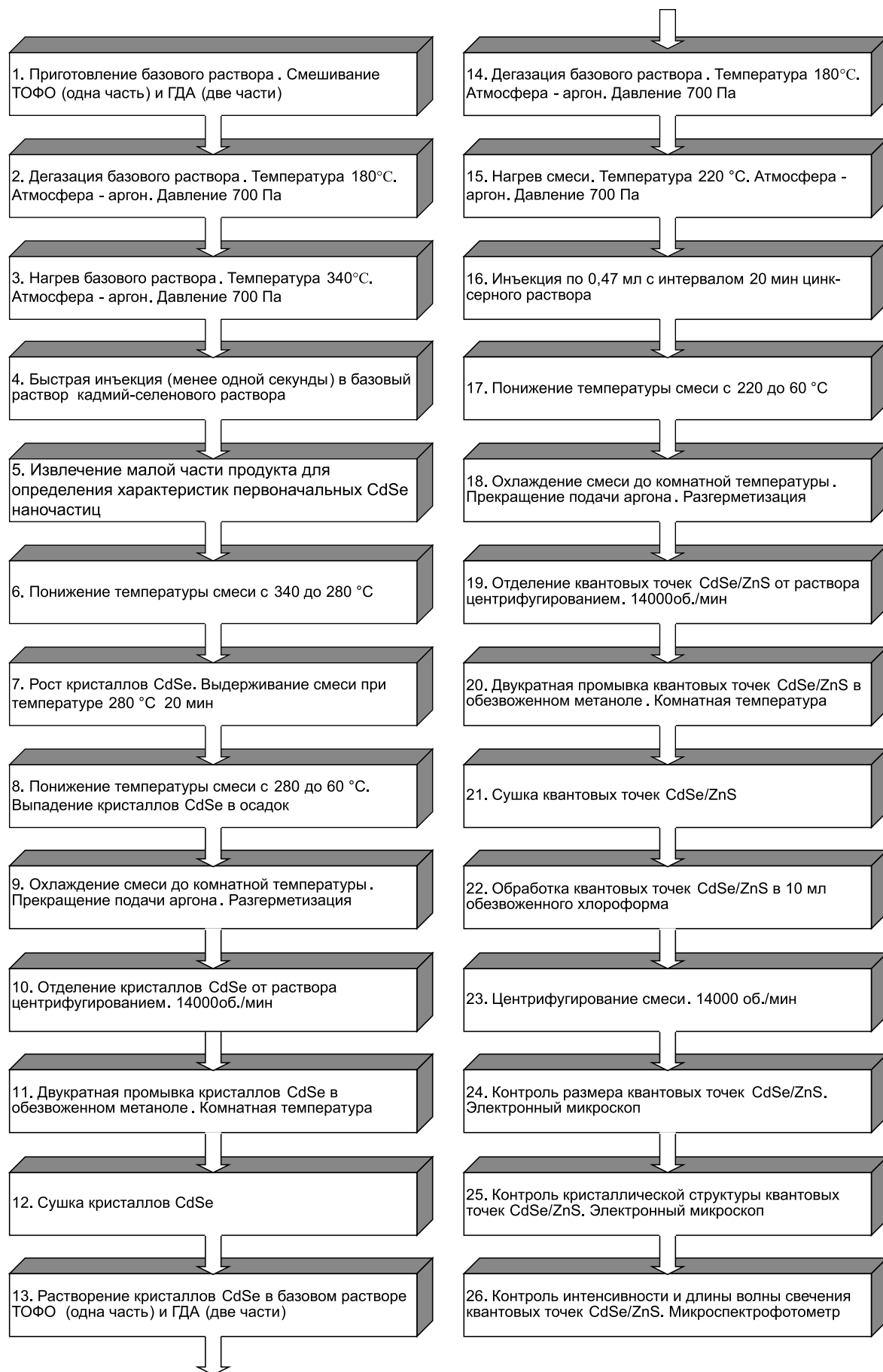


Рис. 7. Маршрут эскизного технологического процесса получения нанокристаллов CdSe/ZnS

полупроводниковой оболочкой ZnS имеют место некоторые ограничения:

- полученные ядра квантовых точек должны выдерживать условия, при которых происходит переход во вторую фазу;
- поверхностная энергия обеих фаз должна быть в достаточной мере одинакова, чтобы барьер для гомогенного зарождения кристаллов во второй фазе был ниже, чем для гетерогенного;
- ядра нанокристаллов и материал покрытия не должны легко диффундировать при осаждении.

Если скорость добавления реагентов не превысит скорость осаждения на ядрах, то концентрация реагентов никогда не превысит порог гомогенного зарождения второй неорганической фазы. Рис. 6 и 7 [18–22] отражают структурную схему и маршрут эскизного технологического процесса синтеза нанокристаллов CdSe/ZnS. Эскизный технологический маршрут получения нанокристаллов CdSe/ZnS (рис. 7) включает перечень режимов синтеза нанокристаллов и оборудование для контроля структуры и оптических свойств нанокристаллов.

Наночастицы двуокиси кремния

Значительно возрос интерес к наночастицам оксида кремния для биоаналитических применений. Один из перспективных методов получения таких частиц является синтез наночастиц в обратных микроэмульсионных системах [23]. Микроэмульсии представляют собой дисперсные системы, в которых дисперсная фаза представлена каплями воды (или другой полярной жидкости), распределенными в неполярной жидкой фазе ("масло"). Размер капель воды в зависимости от условий получения микроэмульсии и природы стабилизатора может меняться в широких пределах (от нескольких до сотен нанометров). Микрокаплю в данном случае можно рассматривать как микрореактор, в котором образуется новая фаза. Размер образующейся частицы ограничен размером микрокапли, а форма частицы повторяет форму капли.

Наиболее перспективными методами получения нанокристаллов в настоящее время являются методы коллоидной химии. Данный способ позволяет получать монодисперсные нанокристаллы размеров порядка 2–6 нм.

Список литературы

1. **Авакумов Е. Г.** Механохимическая активация химических процессов. Новосибирск: Наука, 1983.

2. **Zhu T., Vasilev K.** et al. Surface modification of citrate-reduced colloidal gold nanoparticles with 2-mercaptosuccinic acid // *Langmuir*. 2003. Vol. 19. P. 9518.

3. **Frens G.** Controlled nucleation for regulation of particle-size in monodisperse gold suspensions // *Nat. Phys. Sci.* 1973. Vol. 241. P. 20.

4. **Han M., Quek C.**, et al. A simple and effective chemical route for the preparation of uniform nonaqueous gold colloids // *Chem. Mater.* 1999. Vol. 11. P. 1144.

5. **Murray C. B., Kagan C. R.** Synthesis and characterization of monodisperse nanocrystals and close-packed nanocrystal assemblies // *Annu. Rev. Res.* 2000. Vol. 30. P. 545.

6. **Dingle R., Wiegmann W., Henry C. H.** Quantum states of nanoparticles // *Phys. Rev. Lett.* 1974. Vol. 33. P. 827.

7. **Heath J. R., Shiang J. J.** Covalency in semiconductor quantum dots // *Chem. Soc. Rev.* 1998. Vol. 27. P. 65.

8. **Murray C. B., Norris D. J., Bawendi M. G.** Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites // *Am. Chem. Soc.* 1993. Vol. 115. P. 8706.

9. **De Smet Y., Deriemaeker L., Finsy R.** Ostwald ripening of alkane emulsions in the presence of surfactant micelles // *Langmuir*. 1997. Vol. 13. P. 6884.

10. **Miculec F.** Semiconductor nanocrystal colloids: manganese doped cadmium selenide, (core) shell composites for biological labeling, and highly fluorescent cadmium telluride // Ph.D. thesis. Cambridge, MA. 1999.

11. **Murray C. B., Norris D. J., Bawendi M. G.** Self-organization of CdSe nanocrystallites into three-dimensional quantum dot superlattices // *Science*. 1995. Vol. 270. P. 1335.

12. **Кульбачинский В. А.** Полупроводниковые квантовые точки // *Соросовский журнал*. 1991. № 4. P. 98.

13. **Micic O. I., Curtis C. J., Jones K. M., Sprague J. R., Nozik A. J.** Highly efficient band-edge emission from InP quantum dots // *J. Phys. Chem.* 1994. Vol. 98. P. 4966.

14. **Chemseddine A., Weller H.** Highly Monodisperse Quantum Sized CdS Particles by Size Selective Precipitation // *Phys. Chem.* 1993. Vol. 97. P. 636.

15. **Doome R. J., Fonseca A.** et al. New evidences for the anomalous temperature-dependent solubility of quantum dot // *Phys. Chem. Sol.* 1997. Vol. 58. P. 1839.

16. **Masala O., Seshadri R.** Spinel ferrite/MnO core/shell nanoparticles: Chemical synthesis of all-oxide exchange biased architectures // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2004. Vol. 34. P. 41.

17. www.qdots.com

18. **Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е.** Разработка физико-химических и технологических основ получения люминесцентных наночастиц из полупроводников // *Матер. научно-технич. конференции "Медэлектроника"*. Минск. 2004. С. 153.

19. **Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е.** Технические средства визуализации информации // *Доклады БГУИР*. Минск. 2005. № 5. С. 50.

20. **Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е.** Энергия поглощения CdSe // *Известия Белорусской инженерной академии*. 2005. № 1 (19)/5. С. 64.

21. **Яшин К. Д.** Отчет о НИР № ГР 2005756 / К. Д. Яшин, В. С. Осипович, С. Е. Пицук; учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники". Минск. 2005. 60 с. Депонирован 07.04.06.

22. **Яшин К. Д., Осипович В. С., Пицук С. Е.** Водородная и квантово-механическая модели энергии поглощения // *Материалы IV Белорусско-Российской научно-технической конференции "Технические средства защиты информации"*. Минск. 2006. С. 78.

23. **Santra S., Tapscott R., Dobson J., Hebard A.** Synthesis and characterization of silica-coated iron oxide nanoparticles in microemulsion: The effect of nonionic surfactants // *Langmuir*. 2001. Vol. 17. P. 2900.

С. Г. Бобков, канд. техн. наук,
В. Ю. Киреев, канд. техн. наук,
НИИСИ РАН

**ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕХОДА
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
В СУБНАНОМЕТРОВУЮ
ОБЛАСТЬ РАЗМЕРОВ**

**Часть 2. Возможности наноимпринт
литографии и проекционной
оптической литографии***

Подробно рассмотрены процессы наноимпринт литографии и проекционной оптической литографии, приведены их характеристики по разрешению, совмещению и производительности. Даны оценки стоимости указанных литографических систем, комплектов фотошаблонов и наноштампов, а также участков для их изготовления.

Классификация процессов наноимпринт литографии (НИЛ) (*nanoimprint lithography — NIL*) с использованием наноштампов для печати (штампов-

* Часть 1 см. в № 5, 2007.

ки) нанотопологии приведена на рис. 1 [1—3]. Все процессы НИЛ по типу наноштампа и условиям его воздействия на поверхность подложки (пластины), покрытую маскирующим слоем, разделяются на три большие группы:

1. *НИЛ с горячей штамповкой (hot embossing lithography — HEL)* проводится в базовом варианте с использованием твердых (на основе пластин никеля, коррозионно-стойкой стали, кремния, карбида кремния и кварца) обычно одноуровневых наноштампов размером с обрабатываемую пластину (от 50 до 200 мм), на которых негативный по отношению к получаемому на рабочей пластине топологический рисунок с размерами элементов от 100 нм до 100 мкм формируется на одном уровне по высоте в слоях (пленках) никеля, поликремния или кварца толщиной от 200 до 400 нм [1, 4].

Существуют также варианты НИЛ с пошаговой горячей штамповкой (*step and stamp imprint lithography — SSIL*), в которых используются твердые наноштампы с малой площадью штамповки (от 5 × 5 мм до 25 × 25 мм) по сравнению с обрабатываемыми пластинами, многократно перемещаемые в процессе штамповки по поверхности пластины [5, 6].

Применение совмещенных по топологии многоуровневых (не больше трех уровней) по высоте наноштампов, в которых на первом уровне форми-

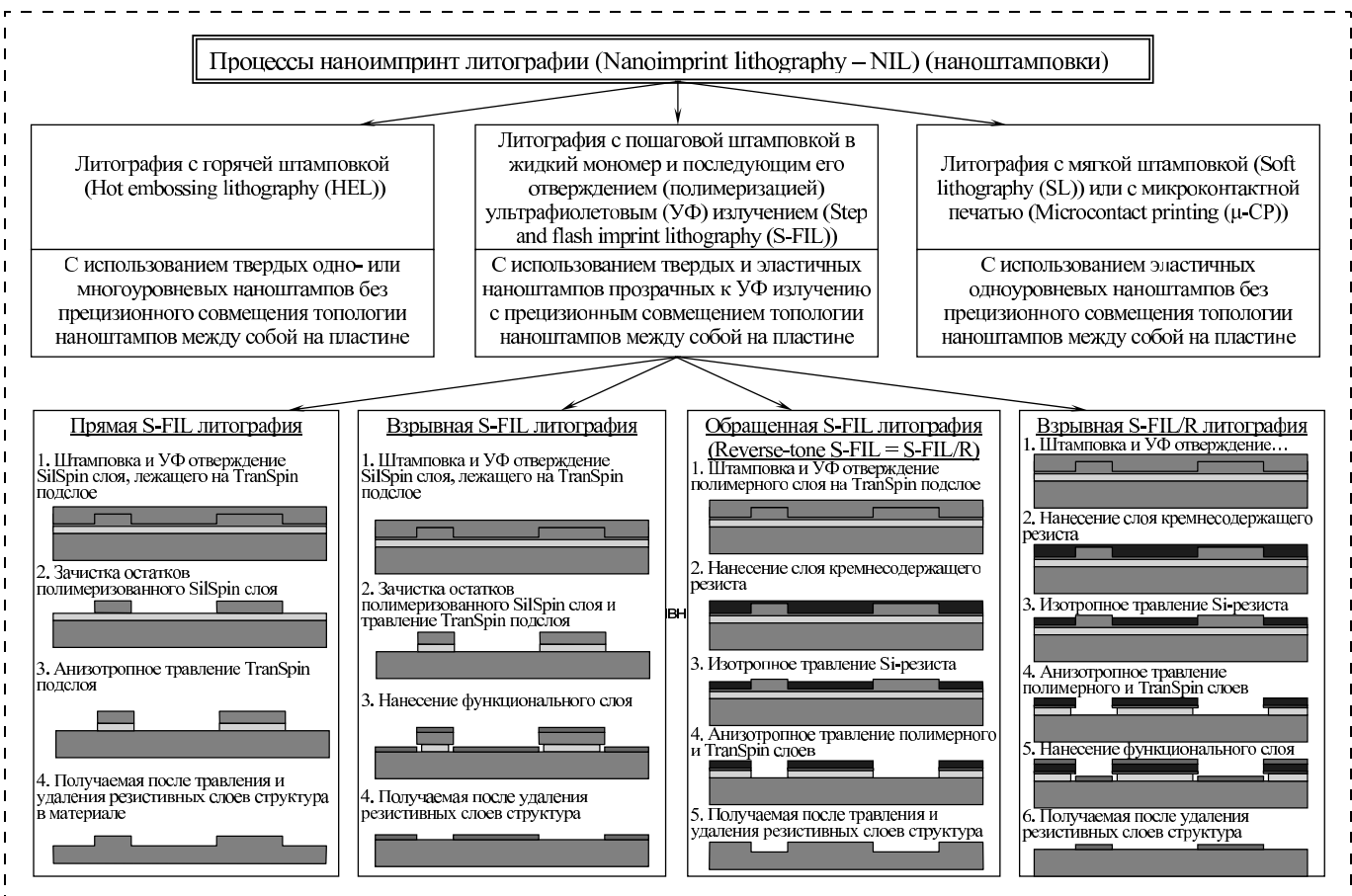


Рис. 1. Классификация процессов наноимпринт литографии (наноштамповки)

руются топологические элементы больших размеров, на втором уровне — средних размеров, а на третьем уровне — самых маленьких размеров, требует большего давления при штамповке и ограничивается специальными изделиями. Например, одновременное формирование маски под топологию верхнего уровня проводников и контактных отверстий к нижнему уровню металлизации в "двойном дамасском" процессе.

В качестве резистивной (полимерной) маски на рабочих пластинах могут быть использованы стандартные фото- и электронорезисты, например полиметилметакрилат (ПММА), а также специальные резисты для наноимпринт литографии с низкой температурой стеклования (например, MR-I 9000) [4]. В некоторых случаях наноштамповка может быть выполнена непосредственно в термопластичных функциональных слоях, например в поликарбонате и алюминии [4, 7]. В НИЛ с горячей штамповкой можно использовать многослойные резисты с переносом сформированного в первом слое резиста топологического рисунка в последующие слои с помощью процессов реактивного ионного травления (*reactive ion etching* — *RIE*), а также различные варианты "взрывной" (*lift-off*) литографии [8].

В зависимости от типа резиста или функционального слоя и типа и размеров наноштампа штамповка (выдавливание) топологического рисунка в резистивной маске или функциональном слое осуществляется при температурах от 50 до 300 °С (температура наноштампа должна быть выше температуры стеклования резиста) и давлениях от 5 до 250 атм. [1]. Для лучшего отделения наноштампа от резистивной маски после штамповки поверхность наноштампа предварительно обрабатывают антиприлипающей аэрозолью из пульверизатора и снижают температуру наноштампа (ниже температуры стеклования резиста) после штамповки.

Качество наноштамповки может быть улучшено вакуумированием камеры с рабочей пластиной и наноштампом или повышением в ней давления выше атмосферного. Необходимость управления температурой и давлением в процессе штамповки ограничивает производительность установок НИЛ с горячей штамповкой на уровне десяти пластин в час и точность совмещения топологии наноштампов между собой на пластине на уровне 1 мкм [1].

Это исключает применение НИЛ с горячей штамповкой в производстве ИМС и приборов с нанотопологией.

В настоящее время основные области применения НИЛ с горячей штамповкой связаны с производством компакт-дисков (CD, DVD и т. д.), дисплеев со светодиодами на гибких подложках, датчиков (*sensors*), фильтров, приборов на поверхностных акустических волнах (*surface acoustic waves* — SAW) и микроэлектромеханических систем (МЭМС) [4, 7—10].

Основной недостаток НИЛ с горячей штамповкой — это невозможность качественного получения нанотопологии на непланарных (не плоских) подложках больших размеров. Использование планаризирующего подслоя, в качестве которого могут выступать толстые (до 2 мкм) слои полиметилметакрилата, полиимида и антиотражающих покрытий (*bottom antireflective coating* — BARC) не всегда решает эту проблему.

2. **НИЛ с мягкой штамповкой (*soft lithography* — *SL*) или с микроконтактной печатью (*microcontact printing* — μ -CP)** проводится с использованием эластичных (на основе гибких и упругих эластомеров) одноуровневых наноштампов размером с обрабатываемую пластину (до 300 мм), на поверхности которых формируется топологический рисунок, аналогичный получаемому на рабочей пластине, с размерами элементов от 50 нм до 100 мкм и высотой элементов от 150 до 200 нм [3, 11].

В отличие от НИЛ с горячей штамповкой в базовом варианте НИЛ с микроконтактной печатью эластичный наноштамп не выполняет физическую деформацию резистивного и функционального слоев, а только наносит на их поверхность (печатает) топологический рисунок из пленки (моно- или полислойной) органических молекул (органических "чернил"), предварительно полученный на выступающих элементах наноштампа методом окунания в раствор [11].

Однако в последние годы появились варианты НИЛ с мягкой штамповкой, в которых эластичный наноштамп осуществляет физическую деформацию специальных мягких резистов [12] или жидких мономеров с последующим их отверждением под действием УФ излучения [11, 13]. В последнем случае эластичный наноштамп должен быть прозрачен для УФ излучения.

В качестве материала эластичных наноштампов чаще всего используются модификации полимера полидиметилсилоксана (*polydimethylsiloxane* — PDMS) [11, 13—15], обладающего низкой поверхностной энергией и высокой ($\geq 85\%$) оптической прозрачностью в диапазоне длин волн излучения от 340 до 600 нм [13]. Также применяются эластичные наноштампы на основе следующих полимерных материалов: MR-I 9000C-XP, MR-L 6000-XP и полидиаллилфталата (*polydiallylphthalate*) [3, 12]. Эластичные наноштампы могут быть как монолитными (целиком из полимерного материала), так и составными (слой полимерного материала с топологическим рисунком сформирован на гибкой неорганической подложке, например, тонкой кремниевой, кварцевой или стеклянной пластине [12]).

Полимерные наноштампы получают методом отливочной формовки, при котором раствор мономера с нужными присадками наносится центрифугированием на поверхность твердого мастер-штампа (например, кремниевой или кварцевой пластины) со сформированным на его поверхности негатив-

ным топологическим рисунком и последующим отверждением (полимеризацией) мономера под действием температуры и УФ излучения [12, 14].

Перед заливкой мономера поверхность мастер-штампа обрабатывается раствором или аэрозолью аморфных фторполимеров или в разряде фторуглеродов в целях создания сверхтонкой (мономолекулярной) пленки для лучшего отделения полимерного наностампа. Аналогичным образом обрабатываются поверхности полимерных наностампов перед окунанием в растворы органических чернил или перед штамповкой в слой резистов [11, 14].

В качестве органических чернил могут быть использованы растворы на основе тиола (*thiol*) [11], например, алкантиола $R-SH$ ($-SH$ — радикал тиола), сополимеров на основе метилметакрилата, стирола и изопрена, протеинов и ферментов [12, 14, 15]. Микроконтактная печать органическими чернилами реализуется на поверхности любых материалов: металлов, полупроводников, диэлектриков и полимеров.

Применение эластичных наностампов позволяет преодолеть основной недостаток НИЛ с горячей штамповкой и печатать качественную нанотопологию на пластинах большой площади с неплоской (не планарной) поверхностью. Кроме того, при НИЛ с микроконтактной печатью используются температуры, близкие к комнатной (не более $50\text{ }^\circ\text{C}$), и низкие давления (не более 1 атм), что позволяет повысить производительность процесса до промышленного уровня [12–14].

Однако деформация эластичных наностампов при НИЛ с микроконтактной печатью на больших (до 300 мм) пластинах не позволяет обеспечить точность совмещения топологии наностампов между собой на пластине лучше 1 мкм.

Это исключает применение НИЛ с микроконтактной печатью в производстве ИМС и приборов с нанотопологией, в которых требуется совмещение между слоями.

В настоящее время основные области применения НИЛ с микроконтактной печатью связаны с изготовлением нейроэлектронных систем (*neuro-electronic systems*) [15], приборов и ИМС на гибких подложках (*printable electronics*) [16], биодатчиков (*biosensors*) и приборов молекулярной электроники (*molecular electronics*).

3. НИЛ с пошаговой штамповкой в жидкий мономер с последующим его отверждением УФ излучением (*step and flash imprint lithography — S-FIL*) проводится с использованием твердых (на основе пластин кварца), обычно одноуровневых, наностампов с малой площадью штамповки (10×10 мм, 25×25 мм, 26×32 мм, 26×33 мм), перемещаемых по поверхности пластин диаметром до 300 мм, на которых негативный по отношению к получаемому на рабочей пластине топологический рисунок с размерами элементов до 10 нм формируется на

одном уровне по высоте в слоях кварца или пленках двуокиси кремния толщиной от 100 до 200 нм [2, 11, 17–19].

Наностампы обычно изготавливают из кварцевой фотошаблонной заготовки размером $152 \times 152 \times 6,35$ мм. По базовому варианту на нее осаждается слой хрома толщиной 15 нм, на который наносится пленка позитивного электронного резиста (например, ZEP 520A) толщиной 80–100 нм. Электронорезист экспонируется высокоэнергетическим (100 кэВ) электронным пучком с диаметром несколько нанометров на современном электронном экспонирующем оборудовании (например, Leica VB6) [17].

После жидкостного проявления и плазменной зачистки проявленного топологического рисунка в электронорезисте осуществляется травление пленки хрома и удаление остатков электронорезистивной маски. Хром служит маской для реактивного ионного травления (*reactive ion etching — RIE*) кварца в плазме на основе хладона-23 (CHF_3) на глубину от 100 до 200 нм. Селективность травления кварца относительно хрома лежит в диапазоне от 6:1 до 18:1 в зависимости от состава плазмы и режима травления [11].

Затем слой хрома удаляется в жидкостном травителе с поверхности кварца, и на поверхности кварца путем травления в растворе плавиковой кислоты через маску формируется пьедестал высотой 15 мкм и площадью штамповки 25×25 мм (для системы НИЛ Imprio 100 фирмы *Molecular Imprints, Inc.*). Из одной фотошаблонной заготовки с помощью резки и обработки можно получить четыре наностампа размером 65×65 мм [17].

В целях обеспечения возможности контроля топологии кварцевого наностампа на электронном микроскопе на его поверхность для стока заряда наносится тонкая (5–10 нм) прозрачная для УФ излучения (коэффициент пропускания $>90\%$ для $\lambda = 365$ нм) пленка оксидов индия и олова (*indium tin oxide — ITO*).

Разработаны более простые варианты изготовления наностампа:

- осаждение на поверхность кварцевой заготовки пленки ITO, нанесение на нее в плазмоактивированном процессе химического осаждения из газовой фазы (*plasma enhanced chemical vapor deposition — PE CVD* [3]) слоя диоксида кремния (SiO_2) толщиной 100–200 нм и проведение электронолитографии с последующим реактивным ионным травлением (RIE) для формирования требуемой нанотопологии в пленке SiO_2 .
- на пленку ITO на поверхности кварцевой заготовки методом центрифугирования наносится слой водородного силсесквиоксана (*hydrogen silsesquioxane — HSQ*), который можно использовать как негативный электронорезист. После проявления его создается требуемая нанотополо-

гия и с помощью термообработки слой HSQ превращается в пленку SiO₂ [11].

Формирование пьедестала и резка кварцевой заготовки в этих вариантах осуществляются так же, как в базовом варианте изготовления нанштампа, но полученные нанштампы обладают меньшим ресурсом по сравнению с монокристаллическим кварцевым нанштампом.

Перед штамповкой поверхность нанштампов обрабатывается или раствором, или аэрозолем аморфных фторполимеров, или в разряде фторуглеродов для создания на их поверхности сверхтонкой (мономолекулярной) пленки в целях лучшего отделения нанштампа от материала после штамповки.

Различные варианты процессов S-FIL литографии показаны на рис. 1.

В процессе прямой S-FIL литографии поверхность пластины, которая может быть как гладкой, так и с ранее созданным топологическим рельефом, предварительно покрывается с помощью центрифуги органическим планаризирующим слоем (*TranSpin*-слоем), который также называется передаточным слоем (*transfer layer*). В качестве *TranSpin*-слоев могут использоваться слои антиотражающих покрытий BARC (*bottom antireflective coating* — BARC), фоторезистов и полиимидов. Толщина передаточного слоя варьируется в зависимости от высоты рельефа на пластине от 1 до 700 нм [11, 17, 18].

На область пластины, подвергаемую штамповке, с помощью системы подачи из сопла системы НИЛ наносится слой кремнесодержащего фотополимеризуемого (отверждаемого под действием УФ излучения, обычно с $\lambda = 365$ нм) жидкого мономера (*SilSpin*-слоем) с низкой вязкостью ($< 5 \cdot 10^{-3}$ Па·с) [19]. Этот слой называется печатным (*imprint*) или барьерным к травлению (*etch barrier*) слоем, и его толщина варьируется в зависимости от высоты рельефа нанштампа от 15 до 100 нм [11, 17, 18].

Перед штамповкой осуществляется совмещение топологии нанштампа с топологическим рисунком на пластине с помощью набора меток, расположенных на нанштампе и пластине, и устройства совмещения системы НИЛ через прозрачный нанштамп. Системы НИЛ фирмы *Molecular Imprints, Inc.* обеспечивают следующие точности совмещения топологий на нанштампе и пластине: **IMPRIO 55** ≤ 1 мкм, **IMPRIO 100** ≤ 500 нм, **IMPRIO 250** ≤ 50 нм, **IMPRIO 250*** ≤ 20 нм [20].

После нанесения жидкого кремнесодержащего мономера осуществляется процесс штамповки (т. е. впечатывание нанштампа в жидкий мономер) при комнатной температуре и давлениях, меньших 0,07 атм. Затем происходит УФ облучение (обычно с $\lambda = 365$ нм) жидкого мономера через кварцевый нанштамп для его фотополимеризации (отверждения). При полимеризации объем мономера немного уменьшается, что позволяет легко

извлечь нанштамп из затвердевшего печатного слоя [11].

При проведении **прямой S-FIL литографии** (см. рис. 1) после штамповки на поверхности пластины в местах выступов топологии нанштампа остается тонкая пленка кремнесодержащего полимера, т. е. остаточный барьерный слой (*residual etch barrier*) (прямая S-FIL литография, первый этап). Для ее удаления (зачистки) используется анизотропное реактивное ионное травление (RIE) во фторосодержащей плазме (прямая S-FIL литография, второй этап).

После зачистки топологический рисунок переносится из печатного (барьерного) слоя в передаточный органический *TranSpin* слой путем его анизотропного реактивного ионного травления (RIE) в кислородсодержащей плазме до поверхности подложки или подлежащего функционального слоя (рис. 1, прямая S-FIL литография, третий этап). При этом барьерный к травлению слой (кремнесодержащий полимер) выступает как маска, стойкая к травлению, из-за превращения содержащегося в ней кремния в кислородсодержащей плазме в SiO₂. Селективность травления барьерного слоя к передаточному *TranSpin*-слою составляет от 1:3 до 1:10 в зависимости от содержания кремния в барьерном слое, состава плазмы и режимов травления [2, 11].

После получения маски, состоящей из остатков барьерного слоя и целого передаточного *TranSpin*-слоя, в процессе прямой S-FIL литографии проводится реактивное ионное травление (RIE) поверхностного функционального слоя и удаление маски (жидкостное химическое и/или плазмохимическое) (рис. 1, прямая S-FIL литография, четвертый этап).

В процессе **взрывной S-FIL литографии** на сформированную маску наносится функциональный слой, который после удаления (взрыва — *lift-off*) маски остается на немаскированных участках подложки (пластины) (рис. 1, взрывная S-FIL литография, четвертый этап). Для лучшего удаления (взрыва — *lift-off*) маски на поверхность пластины перед формированием передаточного *TranSpin*-слоя обычно наносится специальный легко удаляемый в растворах слой (*lift-off layer* — LOL).

При проведении обратной (**негативной** — **reverse-tone**) **S-FIL литографии** или **S-FIL/R литографии** (рис. 1) в качестве печатного слоя используется жидкий органический фотополимеризующийся мономер без содержания кремния, наносимый на планаризирующий *TranSpin*-слой. В жидком мономере проводится процесс печати топологии нанштампа, аналогично описанному выше процессу (рис. 1, S-FIL/R литографии).

Затем на поверхность этого полимерного слоя с топологическим рисунком с помощью центрифуги наносится слой кремнесодержащего полимера и проводится его изотропное травление (жидкостное химическое или плазмохимическое) до выхода на поверхность границы органического фотопол-

мерного слоя (рис. 1, S-FIL/R литография, второй и третий этапы). После этого проводится анизотропное травление (RIE) в кислородсодержащей плазме фотополимерного и TranSpin-слоев до поверхности подложки или подлежащего функционального слоя и формируется обращенная (негативная) топологии наностампа маска (рис. 1, S-FIL/R литография, четвертый этап).

После формирования маски в процессе S-FIL/R литографии проводится анизотропное травление (RIE) поверхностного функционального слоя и удаление маски (жидкостное химическое и/или плазмохимическое) (рис. 1, S-FIL/R литография, пятый этап). В процессе взрывной S-FIL/R литографии на сформированную маску наносится функциональный слой, который после удаления (взрыва — *lift-off*) маски остается на немаскированных участках подложки (пластины) (рис. 1, взрывная S-FIL/R литография, шестой этап). Для лучшего удаления (взрыва — *lift-off*) маски на поверхность пластины перед формированием передаточного TranSpin-слоя или вместо него обычно наносится специальный легко удаляемый в растворах слой (*lift-off layer* — LOL).

Обращенная S-FIL/R литография по сравнению с прямой S-FIL литографией позволяет получать более качественный наноразмерный топологический рисунок на не пленарных (не плоских) поверхностях пластин в более толстых передаточных TranSpin-слоях, поэтому является лучшим вариантом для создания нанотопологии в функциональных слоях интегральных микросхем ИМС [21].

S-FIL/R и S-FIL литографии могут быть совмещены со стандартной оптической проекционной фотолитографией для получения топологии на критических слоях (слоях с самыми малыми размерами). Для этого наностамп (или набор наностампов) совмещается с комплектом фотошаблонов по площади печатаемых на пластине кристаллов и меткам совмещения топологии. В работе [18] приведен технологический процесс изготовления МОП-транзисторов с совмещением операций стандартной фотолитографии и операции S-FIL литографии на слое формирования затворов транзисторов, причем S-FIL литография позволяла получать длину затвора транзисторов до 30 нм.

Таким образом, процессы S-FIL и S-FIL/R литографии, выполняемые на промышленной системе НИЛ IMPRIO 250 с автоматической загрузкой пластин и наностампов, обеспечивают возможность изготовления ИМС с размерами элементов вплоть до 22 нм, но обладают низкой производительностью.

Действительно, исходя из площади штамповки наностампа $26 \times 32 = 832 \text{ мм}^2$ [20] и обеспечиваемого в настоящий момент времени одной штамповки около 20 с для полной запечатки 150 мм пластины потребуется 16 штамповок, для 200 мм пластины — 31 штамповка и для 300 мм пластины — 74 штамповки. Это соответствует производи-

тели 11 пластин/ч при обработке 150 мм пластин, 6 пластин/ч при обработке 200 мм пластин и 2 пластины/ч при обработке 300 мм пластин [46].

Однако стоимость образцов иммерсионных фотолитографических систем с эксимерными лазерами на ArF ($\lambda = 193 \text{ нм}$) для уровней технологии (УТ) 45—32 нм будет составлять около 20 млн долл. [22], тогда как система НИЛ IMPRIO 250 стоит в 3 раза меньше.

Следовательно, использование двух систем НИЛ для УТ (45—32) нм будет дешевле, чем применение одной иммерсионной фотолитографической системы, а две системы НИЛ будут обеспечивать при обработке 150 мм пластин производительность 22 пластины/ч. Такая производительность недостаточна для завода с запуском 25 000 пластин/мес, но вполне подходит для минифабрики с запуском 250 пластин/мес. Кроме того, фирма *Molecular Imprints Inc.* намеревается довести в ближайшие три года производительность систем НИЛ IMPRIO 250 до 20 пластин/ч для 300 мм пластин.

Кроме того, системы НИЛ (S-FIL/R и S-FIL) позволяют формировать прямо на поверхности кристаллов, изготовленных по стандартной КМОП технологии, дополнительные слои. Это можно использовать, например, для формирования на поверхности микропроцессоров слоев памяти большого объема, что открывает возможность создания быстродействующих однокристалльных компьютеров со встроенными операционными системами и информационной базой для бортовой и мобильной аппаратуры.

Таким образом, в условиях минифабрики системы наноимпринт литографии могут быть конкурентоспособными с системами иммерсионной фотолитографии с эксимерными лазерами на ArF ($\lambda = 193 \text{ нм}$) для уровней технологии (УТ) 45—32 нм.

В настоящее время для промышленного производства ИМС используется проекционная оптическая литография, или сокращенно фотолитография (ФЛ), с уменьшением топологического рисунка фотошаблона (ФШ) в фоторезистивной (ФР) маске соответственно в 5 и 4 раза, а для промышленного изготовления ФШ применяется электронно-лучевая литография.

Для ФЛ разрешение, или минимальный размер элемента или зазора, в регулярных плотно упакованных структурах $L_{\min} = 1/2 \text{ min pitch}$, воспроизводимо и стабильно получаемое в ФР маске, определяется выражением

$$L_{\min} = k_1(\lambda/NA). \quad (1)$$

Другим важным параметром ФЛ является глубина фокуса D_f , т. е. область около фокальной плоскости выходной (последней) проекционной линзы литографической системы, в которой уменьшенное (обычно в 4 или 5 раз) изображение топологического рисунка фотошаблона (ФШ) еще имеет адекватную (достаточную) для процесса пе-

реноса на ФР слой пластины четкость. Глубина фокуса (*deep of focus* — DOF) рассчитывается по формуле

$$D_f = k_2 [\lambda / (NA)^2]. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2): λ — длина волны экспонирующего излучения; $NA = n \sin(\alpha/2)$ и α — числовая апертура и апертурный угол выходной проекционной линзы; n — показатель преломления среды между выходной проекционной линзой и слоем ФР на пластине; k_1 и k_2 — характеристические постоянные, отражающие специфику всего литографического процесса.

Из формул (1) и (2) легко получить связь между глубиной фокуса и получаемым минимальным размером элемента (разрешением)

$$D_f = (k_2/k_1^2)(L_{\min}^2/\lambda), \quad (3)$$

т. е. чем выше разрешение (меньше L_{\min}), тем более жесткие требования предъявляются к планарности рельефа на поверхности пластины.

Таким образом, достижение максимального разрешения требует введения в технологический маршрут изготовления ИМС операций планаризации рельефа на поверхности пластины.

Наиболее распространенными для экспонирования ФР слоев на пластинах являются проекционные фотолитографические системы степеры или степеры-сканеры. Степер (от английского слова "stepper") осуществляет пошаговый перенос (мультиплицирование, размножение) топологического рисунка кристалла с ФШ на покрытую слоем ФР пластину, расположенную на координатном столе. Степер-сканер (от английского словосочетания "step and scan") при переносе топологического рисунка с ФШ на пластину делает по одной координате шаг и в пределах этого шага сканирует по другой координате вырезанным пучком излучения. Так как степер-сканер проецирует на пластину исходно меньшее поле, чем степер, то с его помощью проще получить качественное изображение с высоким разрешением.

В настоящее время в промышленных проекционных фотолитографических системах используется монохроматическое излучение со следующими длинами волн:

- в УФ области с $\lambda = 436$ нм (g — линия спектра ртутной лампы) и с $\lambda = 365$ нм (i — линия спектра ртутной лампы);
- в области глубокого УФ (*deep UV* — DUV) с $\lambda = 248$ нм (эксимерный лазер на KrF) и с $\lambda = 193$ нм (эксимерный лазер на ArF).

В стадии лабораторных испытаний находится ФЛ система с эксимерным лазером на F_2 , использующая излучение с $\lambda = 157$ нм и проекционная литография на экстремальном УФ излучении (ЭУФ литография) (*extreme* — UV EUV) с $\lambda = 13$ нм (11,8—

13,4 нм), генерируемом с помощью плазмы, создаваемой лазерным лучом в сверхзвуковой струе ксенона.

Проведем анализ формулы (1) для не иммерсионной ($n = 1$) ФЛ с учетом, что величина $NA = \sin(\alpha/2)$ может изменяться от 0,4 для наименее совершенных проекционных систем до 0,93 для наиболее совершенных проекционных систем [23, 24]. Тогда формулу (1) можно записать в виде

$$L_{\min} = (2,5 \div 1,08) k_1 \lambda. \quad (4)$$

Согласно дифракционному критерию Рэля (*Rayleigh limit*) для оптических проекционных систем без использования техники повышения разрешения (*resolution enhancement techniques (RETs)*) $k_1 = 0,61$. Поэтому выражение (4) можно переписать в виде

$$L_{\min} = (1,52 \div 0,66) \lambda. \quad (5)$$

Исходя из этого соотношения всю ФЛ можно разделить на сверхдлинноволновую ($L_{\min} > \lambda$) и субдлинноволновую ($L_{\min} < \lambda$), переход между которыми произошел в 1993—1994 гг.

Воспроизведение в ФР маске элементов ФШ с размерами, меньшими длины волны экспонирующего излучения, требует применения техники (приемов и способов) повышения разрешения [47], которая позволяет значительно уменьшить величину k_1 в формулах (1) и (4) по сравнению с дифракционным критерием ($k_1 = 0,61$). К технике повышения разрешения относятся [25]:

- использование внеосевого освещения (*off-axis illumination* — OAI) ФШ путем вырезания с помощью диафрагм из осевого цилиндрического пучка излучения внеосевых трубчатых (кольцевых в сечении), дипольных (два полюса в сечении) или квадрупольных (четыре полюса в сечении) пучков освещения;
- использование различных типов поляризации экспонирующего излучения;
- проведение коррекции эффектов оптической близости (*optical proximity correction* — OPC) элементов топологического рисунка на ФШ путем добавления к этим элементам дополнительных служебных элементов, повышающих точность передачи рисунка на ФР маску;
- использование фазосдвигающих ФШ (*phase shift mask* — PSM), позволяющих так изменять фазу и коэффициент пропускания проходящего через топологический рисунок ФШ излучения, чтобы повысить его разрешение на ФР слое пластины;
- использование пленок контрастоусиливающих материалов поверх слоя ФР, позволяющих повысить контраст передачи изображения в ФР слой;
- использование пленок антиотражающих покрытий (АОП) под слоем ФР для уменьшения влияния отраженного от функционального слоя

(ФС) (подложки) излучения на точность передачи топологического рисунка в слой ФР.

Оптимальное применение техники повышения разрешения проекционной оптической ФЛ позволяет в настоящее время достичь значений $k_1 = 0,3$ (при теоретическом пределе $k_1 = 0,25$ [25]). Подставляя $k_1 = 0,3$ в формулу (4) для наиболее совершенных проекционных систем с $NA = 0,93$, можно получить выражение

$$L_{\min} = 0,32\lambda, \quad (6)$$

из которого следует, что при $\lambda = 365$ нм можно достичь максимального разрешения $L_{\min} = 130$ нм, при $\lambda = 248$ нм — $L_{\min} = 90$ нм и при $\lambda = 193$ нм — $L_{\min} = 65$ нм [26].

В прогнозах развития технологии производства ИМС в 2001-м и 2003-м годах планировалось, что для реализации УТ 45 нм будет использована система проекционной оптической ФЛ с эксимерным лазером на F_2 и длиной волны экспонирующего излучения $\lambda = 157$ нм, а для УТ 32 нм должно вводиться следующее поколение перспективных систем литографии (*next generation lithography — NGL*) на основе проекционных систем экстремального ультрафиолета (*extreme UV — EUV*) с $\lambda = 13$ нм (11,8—13,4 нм), потоков электронов и ионов, а также системы контактной рентгеновской литографии (КРЛ) ($1 \times X$ -ray system) с $\lambda = 1$ нм [27, 28].

Однако в последнем прогнозе в декабре 2005 г. указанная выше концепция развития литографии подверглась полной ревизии. Такая ревизия вызвана следующими событиями, произошедшими в последние два года.

1. Выпуск промышленных систем иммерсионной проекционной ФЛ с $\lambda = 193$ нм и числовой апертурой (NA) больше единицы (*hyper-NA immersion systems*), таких как ХТ:1700i с $NA = 1,2$ фирмы *ASM Lithography* (Голландия) и NSR-S610C с $NA = 1,3$ фирмы *Nikon* (Япония), на основе воды с показателем преломления $n = 1,44$, подающейся в пространство между выходной линзой и экспонируемой поверхностью пластины [24]. Успешное внедрение иммерсионной ФЛ в производство ИМС [29].

2. Получение $L_{\min} = 30$ нм в лабораторной системе проекционной иммерсионной ФЛ на основе органической иммерсионной жидкости с $n = 1,64$ и выходной линзы из кристаллического кварца высокой плотности с $n = 1,67$ (плавленый кварц, обычно используемый при изготовлении линз, имеет $n = 1,56$) [30].

3. Создание эффективных устройств контроля поляризации (линейной, азимутальной, радиальной) экспонирующего излучения с $\lambda = 193$ нм, позволяющих на 20 % улучшить контраст изображения, а следовательно, увеличить разрешение и глубину фокуса и уменьшить неровность ширины линий (*line width roughness — LWR*). Их успешное внедре-

ние в промышленные системы обычной (сухой) и иммерсионной ФЛ [24, 31].

4. Разработка и успешное опробование в промышленных системах обычной и иммерсионной ФЛ с $\lambda = 193$ нм метода двойного экспонирования одного поля, связанного с разбиением топологического рисунка одного функционального слоя на две части, содержащие соответственно горизонтальные (X) и вертикальные (Y) топологические элементы, сформированные на двух отдельных ФШ, и их последовательное экспонирование соответствующим линейно поляризованным излучением (с X поляризацией и Y поляризацией), созданным с помощью внеосевого дипольного освещения (*double exposure — DE or double dipole lithography — DDL*) [24, 31—33]. Метод двойного экспонирования позволяет преодолеть теоретический предел одиночного экспонирования для фактора $k_1 = 0,25$ [25] (см. формулу (1)) и практически уменьшить его значения до уровня 0,2 [32] и тем самым еще больше повысить разрешение оптической ФЛ.

5. Разработка и успешное внедрение для промышленных систем ФЛ продвинутых симуляторов (моделирующих программ) и систем автоматического проектирования (САПР) (*computer aided design — CAD or electronic design automation — EDA*), позволяющих рассчитывать на основе технологии интерференционной карты (*interference mapping technology — IMT*) и рисовать топологию слоев на ФШ с учетом коррекции эффектов оптической близости (ОРС) в следующих случаях [24, 25]:

- для обычной и иммерсионной ФЛ с различными значениями числовой апертуры, вплоть до $NA = 1,7$;
- для различных систем осевого и внеосевого освещения: круговых, кольцевых, дипольных и квадрупольных;
- для различных видов поляризации экспонирующего излучения: линейной, азимутальной и радиальной, генерируемой на различных элементах светового тракта;
- с учетом трехмерных эффектов (*3D effects*) на фазосдвигающих фотошаблонах (ФШ) различных видов;
- с учетом разбиения топологического рисунка на две составляющие с горизонтальными и вертикальными элементами при использовании в схеме двойного экспонирования.

6. Разработка и успешное внедрение полностью интегрированного для производства процесса проектирования топологии функциональных слоев (ФС) ИМС (*design-for-manufacturing — DFM*) на основе новых установок проектирования, работающих с гибкими моделями баз данных (например, модельный стандарт *OpenAccess*), позволяющего учитывать в процессе проектирования все ограничения, накладываемые на топологию ФС:

- многократное использование техники повышения разрешения (RETs);

- особенности других технологических операций, например химико-механической планаризации (ХМП);
 - правила проектирования,
- а также проводить коррекцию и верификацию топологии всего разрабатываемого кристалла до начала изготовления комплекта ФШ. Процесс DFM значительно ускоряет проектирование ФШ за счет ликвидации этапа коррекции ФШ по результатам экспериментальных испытаний и устраняет потери дорогостоящих ФШ из-за неверных данных [24, 25, 34, 35].

Таким образом, система иммерсионной ФЛ с $\lambda = 193$ нм на основе воды с показателем преломления $n = 1,44$ имеет числовую апертуру $NA = 1,3$ (теоретический предел для NA с водой составляет 1,35) [24], поэтому формулу (6) для минимального размера, полученную для $k_1 = 0,3$ и $NA = 0,93$, можно переписать в виде

$$L_{\min} = 0,23\lambda, \quad (7)$$

из которой следует, что при $\lambda = 193$ нм можно достичь максимального разрешения $L_{\min} = 45$ нм.

Применение метода двойного экспонирования позволяет уменьшить величину фактора k_1 до 0,2 [32], тогда выражение (7) преобразуется следующим образом:

$$L_{\min} = 0,15\lambda, \quad (8)$$

из которого следует, что при $\lambda = 193$ нм можно достичь максимального разрешения $L_{\min} = 32$ нм.

Использование органической иммерсионной жидкости с показателем преломления $n = 1,64$ и выходной линзы из кристаллического кварца высокой плотности с показателем преломления $n = 1,67$ позволяют увеличить значение числовой апертуры (NA) систем иммерсионной ФЛ до 1,55. С учетом этого значения формулу (8) можно записать в виде

$$L_{\min} = 0,12\lambda, \quad (9)$$

из которой следует, что при $\lambda = 193$ нм можно достичь максимального разрешения $L_{\min} = 22$ нм.

Таким образом, проекционная иммерсионная ФЛ с $\lambda = 193$ нм при высокой производительности (больше 60 пластин/ч) обеспечит УТ 45 нм, со снижением производительности в 2 раза за счет двойного экспонирования обеспечит УТ 32 нм и имеет все технические возможности для достижения УТ 22 нм.

Поэтому в последнем прогнозе развития технологии производства ИМС [2] область применения иммерсионной ФЛ с $\lambda = 193$ нм расширена на УТ 45 нм и 32 нм, что не предполагает дальнейшего развития ФЛ с $\lambda = 157$ нм [33] и отодвигает введение следующего поколения систем литографии (*next generation lithography — NGL*) на УТ 22 нм или предполагает их конкуренцию при условии эконо-

мической эффективности с иммерсионной ФЛ с $\lambda = 193$ нм на УТ 32 нм [32].

Среди следующего поколения систем литографии перспективность развития подтверждена в последнем прогнозе только для [33]:

- проекционной экстремальной УФ (ЭУФ) литографии (*EUV lithography*) на экстремальном ультрафиолетовом излучении с $\lambda = 13$ нм на основе зеркальной оптики;
- НИЛ в вариантах S-FIL и S-FIL/R литографии;
- безмасочной многолучевой (несколько тысяч электронных пучков) электронной литографии (*maskless lithography — ML2*) [36].

Каждое уменьшение минимального размера элементов (переход на следующий УТ), достигаемое проекционной фотолитографией, сопровождается усложнением как самих литографических систем, так и комплектов используемых фотошаблонов. Кроме того, с каждым УТ повышается степень интеграции микросхем, а следовательно, растет число функциональных слоев, особенно слоев металлизации и изоляции, что увеличивает число ФШ в комплекте. В связи с этими факторами стоимость комплекта ФШ с каждым уровнем технологии непрерывно растет и особенно быстро, когда минимальный размер элементов ИМС становится меньше длины волны экспонирующего излучения ($L_{\min} < \lambda$).

В табл. 1 приведены стоимости систем проекционной ФЛ и перспективных систем литографии и их возможности по реализации УТ микросхем [22]. В табл. 2 показаны стоимости комплекта фотошаблонов (ФШ) для производства ИМС и участка изготовления ФШ для различных уровней технологии (УТ) [23, 25, 37].

Несмотря на высокую (39 млн долл.) стоимость участка изготовления ФШ для УТ 45 нм даже в минимальной комплектации, обеспечение информационной безопасности диктует необходимость его создания.

Крупные фирмы производители ИМС за рубежом имеют свои участки для изготовления ФШ. При развитии микроэлектроники на базе мини-фабрик более рентабельно создавать участок изготовления ФШ как центр общего пользования в каждом регионе или стране, тем более что этот участок может быть использован и для производства нанощтампов. Постоянно растущая стоимость комплектов ФШ (1 млн долл. для УТ 65 нм и 1,4 млн долл. для УТ 45 нм (см. табл. 2)) и рост числа фирм, производящих микросхемы на заемном производстве (*fabless firms*), позволяют надеяться на быструю окупаемость участка изготовления ФШ.

Анализ данных табл. 1 подтверждает, что не иммерсионные системы ФЛ могут обеспечивать получение минимальных размеров (L_{\min}) на уровне 1/3 от длины волны λ используемого экспонирующего излучения. Однако для $L_{\min} \leq 0,5\lambda$ резко уве-

Таблица 1
Системы литографии и их возможности по реализации уровней технологии ИМС

Система литографии и ее стоимость	Уровень технологии, нм									
	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
Системы ФЛ с $\lambda = 365$ нм, стоимость 3,0–5,0 млн \$	■	■								
Системы ФЛ с $\lambda = 248$ нм, стоимость 8,0–10 млн \$			■	■	■					
Системы ФЛ с $\lambda = 193$ нм, стоимость 13–15 млн \$				■	■	■				
Системы иммерсионной ФЛ с $\lambda = 193$ нм на основе воды, стоимость 16–18 млн \$						■	■	■		
Системы иммерсионной ФЛ с $\lambda = 193$ нм на основе жидкостей и линз с $n \geq 1,7$, стоимость 19–21 млн \$								■	■	
Система ЭУФ литографии ФЛ с $\lambda = 13$ нм, стоимость 25–30 млн \$									■	■
Система наноимпринт (S-FIL) литографии, стоимость 5,0–7,0 млн \$									■	■
Системы безмасочной многолучевой электронной литографии, стоимость 20–25 млн \$									■	■

личивается сложность и стоимость комплекта ФШ (см. табл. 2).

Поэтому необходимо использовать системы ФЛ с длиной волны экспонирующего излучения, наиболее близкой к требуемому минимальному размеру, чтобы сэкономить на стоимости комплекта ФШ. Это особенно актуально для минифабрик, которые используют большое число комплектов ФШ для изготовления небольших объемов ИМС.

По этой причине в настоящее время системы ФЛ с $\lambda = 365$ нм практически не используются для производства микросхем с УТ 180 нм и 130 нм, а системы ФЛ с $\lambda = 248$ нм очень ограниченно используются для изготовления ИМС с УТ 90 нм.

Относительно низкая стоимость системы наноимпринт литографии (НИЛ) по сравнению с другими литографическими системами, приведенными в табл. 1, а также оценка стоимости комплекта наностампов в 1 млн долл. для УТ 45 нм по сравнению с оценкой стоимости комплекта ФШ в 1,4 млн долл. для этого уровня технологии (см. табл. 2), позволяет прогнозировать экономическую эффективность внедрения НИЛ в минифабричное производство ИМС, начиная с УТ 45 нм.

Проведенные в НИИСИ РАН работы в области НИЛ, результаты которых будут подробно изложены в отдельной статье, позволили:

- изготовить кварцевый наностамп с площадью штамповки 15×15 мм и с минимальным размером тестовых структур 50 нм;
- сформировать с его помощью в маске высотой 200 нм тестовые структуры с неравномерностью минимального размера по поверхности пластины и от пластины к пластине не более $\pm 6\%$ (рис. 2);
- перенести указанные тестовые структуры с маски в различные функциональные слои.

Реализация прогноза для НИЛ так же, как и внедрение других перспективных систем литографии, будет зависеть от двух основных факторов:

- стоимости адаптации новой системы и нового процесса литографии к существующей инфра-

Таблица 2
Стоимость (в млн долл.) комплекта фотошаблонов для производства ИМС и участка изготовления фотошаблонов для разных уровней технологии

Фотошаблон	Уровень технологии, нм									
	500	350	250	180	130	90	65	45	32	22
Комплект ФШ	50	60	75	140	350	700	1000	1400*	2000*	2800*
Участок изготовления ФШ	10	18	21	28	39	58	68	79*	88*	100**

Примечания: 1. В таблице приведена стоимость комплекта ФШ при условии расположения топологии одного функционального слоя на одном ФШ, т. е. когда размер кристалла больше половины максимального литографического поля.
2. В случае кристаллов малого размера, когда на одном ФШ может быть размещена топология от двух до четырех функциональных слоев, стоимость комплекта ФШ снижается в 1,5–2,0 раза.
3. В таблице приведена стоимость участка изготовления ФШ с производительностью 2 ФШ уровня 90 нм в день.
4. Для минимального набора оборудования (без резервирования) стоимость участка снижается примерно в 2 раза.
5. * — оценка.
6. ** — оценка для производства зеркальных ФШ для ЭУФ литографии.

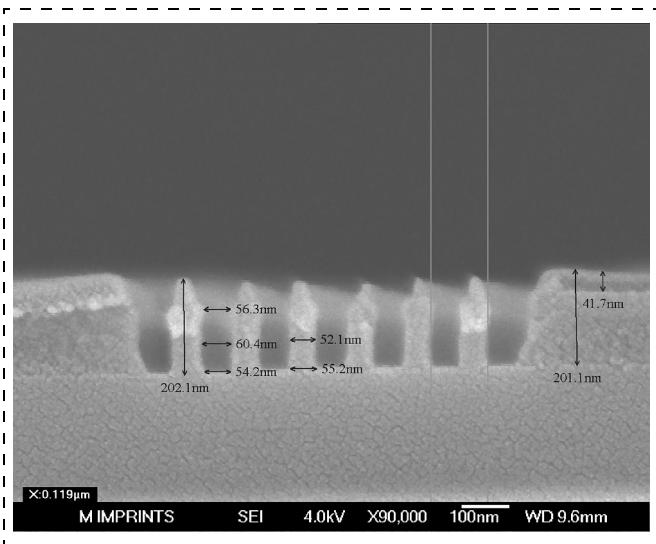


Рис. 2. Поперечное сечение элемента тестовой структуры, полученного в резистивной маске на кремниевой пластине с помощью процесса нанопринт литографии

структуре, созданной под системы и процессы фотолитографии;

- стоимости разработки и внедрения промышленных образцов сопутствующего оборудования для изготовления, отмывки и контроля соответственно масок для ЭУФ литографии, наностампов для НИЛ и прецизионных матриц электромагнитных линз для многолучевой электронной литографии.

Можно с уверенностью утверждать, что только те технологические инновации (нововведения) в производство ИМС будут успешными, которые смогут извлечь выгоду на существующих инфраструктурах и технологических платформах путем улучшения параметров процессов, характеристик изделий или расширения области применения процессов на новые перспективные изделия.

Все преимущества НИЛ проявляются в приборах на базе регулярных структур, в которых основные характеристики повышаются с уменьшением размеров. К таким приборам относятся: устройства памяти на туннельных полупроводниковых, магнитных и фазовых переходах, сенсоры газов и паров на встречно штыревых структурах, болометры, датчики магнитного поля, приборы на поверхностных акустических волнах (*surface acoustic waves — SAW*), элементы телекоммуникационной аппаратуры, микро- и наноэлектромеханические системы, устройства на гибких подложках (*printable electronics*), биодатчики (*biosensors*), позволяющие идентифицировать сложные молекулы, например ДНК, высокочастотные радиометки (RFID) [38].

Таким образом, в ближайшие два—три года следует ожидать создания минифабрик на базе систем нанопринт литографии для изготовления ука-

занных приборов с минимальными размерами в диапазоне 45—22 нм, а уже потом внедрение НИЛ в производство ИМС с уровнями технологии 45, 32 и 22 нм. Такой подход к коммерциализации НИЛ развивают ведущие производители промышленных систем НИЛ фирмы *Molecular Imprints, Inc.* (США) и *EV Group* (Австрия) [39, 40].

Выводы

- ♦ Для обеспечения информационной безопасности в области производства ИМС следует в кратчайшее время создать в России современный участок изготовления фотошаблонов и наностампов.
- ♦ До уровня технологии 45 нм основным промышленным методом литографии будет оставаться иммерсионная проекционная фотолитография с длиной волны 193 нм.
- ♦ В связи с замедлением темпа развития и быстрым удорожанием систем фотолитографии и комплектов фотошаблонов для уровней технологии менее 45 нм в условиях минифабрик экономически эффективными становятся системы нанопринт литографии.
- ♦ Стратегически правильно создать в России на основе систем нанопринт литографии минифабрику для уровней технологии менее 45 нм, включив в ее состав все образцы оборудования для реализации передовых технологических процессов, отсутствующих в стране:
 - формирования подзатворных диэлектриков с высоким значением диэлектрической постоянной (*high-k dielectrics*) методом атомного (последнего) химического осаждения из газовой фазы (*atomic layer deposition — ALD*);
 - прецизионного на атомном уровне, импульсного (последнего) травления (*atomic layer etching — ALET*) функциональных слоев в плазме высокой плотности (*high density plasma — HDP*);
 - формирования системы медной металлизации, включая операции нанесения барьерных и зародышевых слоев и электрохимической планаризации слоев меди (eCMP);
 - формирования межслойных диэлектриков с низким значением диэлектрической постоянной (*low-k dielectrics*) методами химического осаждения из газовой фазы (*chemical vapor deposition — CVD*).

Список литературы

1. Roos N., Luxbacher T., Glinsner T. et al. Nanoimprint lithography with a commercial 4 inch bond system for hot embossing // Proc. SPIE. 2001. V. 4343. P. 427—435.
2. Resnick D. J., Sreenivasan S. V., Willson C. G. Step and flash imprint lithography // Materials Today. February 2005. P. 34—42.

3. **Michel B., Bernard A., Bietsch A.** et al. Printing meets lithography: Soft approaches to high-resolution patterning // IBM J. Res. & Dev. 2001. V. 45. P. 697–719.
4. **Heidari B., Maximov I., Montelius L.** Nanoimprint lithography at 6 in. wafer scale // Vac. Sci. Technol. B. Nov./Dec. 2000. V. 18. N 6. P. 3557–3560.
5. **Haataninen T., Ahopelto J., Gruetzner G.** et al. Step and stamp imprint lithography using commercial flip chip bonder // Proc. SPIE. 2001. V. 3997. P. 874–878.
6. **Haataninen T., Ahopelto J.** Pattern transfer using step and stamp imprint lithography. Physica Scripta. 2003. V. 67. P. 357–360.
7. **Pang S. W., Tamamura T., Nakao M.** et al. Direct nano-printing on Al substrate using a SiC mold // J. Vac. Sci. Technol. B. May/Jun. 1998. V. 16. N 3. P. 1145–1149.
8. **Sun X., Zhuang L., Zhang W.** et al. Multilayer resist methods nanoimprint lithography on nonflat surfaces // J. Vac. Sci. Technol. B. Nov/Dec 1998. V. 16. N 6. P. 3922–3925.
9. **Kao P.-C., Chu S.-Y., Chen T.-Y.** et al. Fabrication of large-scaled organic light emitting devices on the flexible substrates using low-pressure imprint lithography // IEEE Trans. Electron Devices. August 2005. V. 52. N 8. P. 1722–1726.
10. **Glinsner T., Hangweier P., Luesebrink H.** et al. Nanoimprint lithography enables patterned tracks for high-capacity hard disks // Solid State Technology. March 2005. P. 51–54.
11. **Resnick P. J., Dauksher W. J., Mancini D.** et al. Imprint lithography for integrated circuit fabrication // J. Vac. Sci. Technol. B. Nov/Dec 2003. V. 21. N 6. P. 2624–2631.
12. **Pfeiffer K., Fink M., Ahrens G.** et al. Polymer stamps for nanoimprinting / Microelectronic Engineering. 2002. V. 61–62. P. 393–398.
13. **Plachetka U., Bender M., Fuchs A.** et al. Wafer scale patterning by soft UV-nanoimprint lithography // Microelectronic Engineering. 2004. V. 73–74. P. 167–171.
14. **Choi D.-G., Yu H. K., Yang S.-M.** 2D nano/micro hybrid patterning using soft/block copolymer lithography // Materials Science & Engineering C. 2004. V. 24. P. 213–216.
15. **Parton E., Winters K., Braeken D.** et al. Patterning neurons-on-chip devices using microcontact printing // Solid State Technology. December 2005. P. 28–30.
16. **Kim D., Moon J.** Highly conductive ink jet printed film of nanosilver particles for printable electronics // Electrochemical and Solid-State Letters. 2005. V. 8. N 11. P. J30–J33.
17. **Mancini D. P., Resnick D. J., Sreenivasan S. V.** et al. S-FIL for sub-80 nm contact hole patterning // Solid State Technology. February 2004. P. 55–58.
18. **Smith B. J., Stacey N. A., Ponnely J. P.** et al. Employing step and flash imprint lithography for gate level patterning of a MOSFET device // Proc. SPIE. 2003. V. 5037. P. 1029–1034.
19. **Wang D., Rafferty T., Schumaker P.** et al. Advanced prototyping using step and flash imprint // Solid State Technology. December 2005. P. 60–62.
20. **Product** catalog. 2005. Molecular Imprints, Inc. — www.molecularimprints.com.
21. **Sreenivasan S. V., McMackin I., Xu F.** et al. Using reverse-tone bi-layer etch in UV nanoimprint lithography // Micro Magazine. January/February 2005. P. 37–45.
22. **Кибалов Д. С.** Волнообразные структуры на поверхности кремния, инициируемые ионной бомбардировкой ... Диссер. на соискание ученой степ. д-ра физ.-мат наук, Ярославль, ИМЭИ РАН, 2004. 305 с.
23. **Silverman P. J.** EUV: Will it be ready? // Solid State Technology. February 2004. P. 90–91.
24. **Hand A.** Hyper-NA immersion faces polarization challenges // Semiconductor International. February 2006. P. 30–34.
25. **Stand W., Chen F., Hsu S.** et al. Subwavelength imaging at $k_1 < 0,3$ // Semiconductor International. September 2005. P. 52–59.
26. **Levenson M. D.** Getting small at SPIE microlithography // Microlithography World. May 2005. V. 14. N 2. P. 20.
27. **The International Technology Roadmap for Semiconductors** // Semiconductor Industry Association, San Jose, CA. 2001.
28. **The International Technology Roadmap for Semiconductors** // Semiconductor Industry Association, San Jose, CA. 2003.
29. **Gil D., Brunner T.** First microprocessors printed with immersion lithography // Microlithography World. May 2005. V. 14. N 2. P. 4–6, 18.
30. **IBM** and **JSR** show immersion lithography can be pushed beyond 32 nm // Solid State Technology. April 2006. P. 20.
31. **Nikon** develops flexible polarization for high-NA 193 nm scanners // Solid State Technology. June 2005. P. 22.
32. **Chipmakers** lean towards extending immersion lithography to 32 nm // Solid State Technology. February 2006. P. 22–24.
33. **Hector S.** Many options expected in the future of lithography // Solid State Technology. February 2006. P. 52–58.
34. **Miller M., Mayor P., Ng W.** Semiconductor suppliers turn to DFM at nanometer nodes // Solid State Technology. December 2005. P. 38–39.
35. **Naber B., Staud W.** Encrypting process information for litho-aware OPC models // Solid State Technology. April 2006. P. 28–30.
36. **Haraguchi T., Sakazaki T., Hamaguchi S., Yasuda H.** Development of electromagnetic lenses for multielectron beam lithography system // J. Vac. Sci. Technol. 2002. V. 20. N 6. P. 2726–2729.
37. **Hand A.** Infrastructure steps closer to EUV lithography // Semiconductor International. September 2005. P. 38–42.
38. **Hutchby J. A., Bourianoff G. I., Zhirnov V. V.** et al. Extending the road beyond CMOS // IEEE Circuits and Devices Magazine. 2002. V. 18. N 2. P. 28–41.
39. **Nanoimprint** litho going global. — Microlithography World. February 2005. V. 14. N 1. P. 16.
40. **Hand A.** Nanoimprint lithography and its predicted liftoff // Semiconductor International. December 2005. P. 26.

НОВЫЕ КНИГИ

Коллектив авторов: Н. В. Гапоненко, Т. Ю. Медведева, П. Б. Паршин, И. Г. Дежина

Нанотехнологии: Форсайт / Под ред. Н. В. Гапоненко. М.: Современная экономика и право, 2006. — 272 с.

В предлагаемой читателю монографии впервые в российской практике приставлены методологические основы Форсайта, а также результаты исследований по ключевым проблемам, важным для понимания перспектив развития нанотехнологий.

Монография ориентирована на ученых, преподавателей вузов, студентов, аспирантов, чиновников федеральных и региональных структур власти, венчурных капиталистов, руководителей подразделений крупных российских компаний, ФПП, малых технологических фирм.

УДК 548.0; 537.226

И. П. Александрова, д-р физ.-мат. наук,
Ю. Н. Иванов, канд. физ.-мат. наук,
А. А. Суховский, канд. физ.-мат. наук,
С. Б. Вахрушев*, д-р физ.-мат. наук,
Институт физики им. Л. В. Киренского
Сибирского отделения РАН, Красноярск
*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
РАН, г. Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА-РЕЛАКСОРА $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$ МЕТОДОМ ЯМР ^{23}Na

Ориентационные зависимости формы линии ЯМР ^{23}Na в $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$ измерены в интервале температур 290...780 К. Наилучшее согласие экспериментальных и расчетных спектров получено для модели, когда ионы Na в полярных кластерах имеют компоненту смещения вдоль направления [111] и разупорядоченное по кластерам смещение в ортогональной плоскости. Относительный вес моноклинных кластеров при 293 К около 45 %.

Введение

Кристалл сегнетоэлектрика-релаксора $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$ (NBT), исследованный в данной работе, испытывает последовательность фазовых переходов из кубической структуры $Pm\bar{3}m$ при температуре 813 К (T_1) в тетрагональную $P4bm$, $Z = 2$ и, при температуре около 600 К (T_2), в тригональную фазу $R3c$, $Z = 6$ [1–3]. В интервале температур 533...693 К находится обширная область сосуществования тетрагональной и тригональной фаз [3, 4]. Примерно при 470 К появляется спонтанная поляризация, наблюдаемая по петлям диэлектрического гистерезиса, меняются скачком коэффициенты электромеханической связи [5, 6] и при температуре около 500 К происходит резкое возрастание уровня генерации второй оптической гармоники [3]. Однако дифракционные исследования не обнаруживают изменения пространственной группы кристалла в окрестности 500 К. Диффузное рассеяние нейтронов, наблюдаемое в широком интервале температур, указывает на присутствие областей с локальной структурой, отличающейся от средней.

Из исследования квазиупругого рассеяния нейтронов известно, что при температурах выше 540 К зависимость квадрата обратного радиуса корреляции сегнетоэлектрических флуктуаций линейно меняется с температурой, ниже 450 К радиус корреляции остается почти постоянным. Таким образом, дальний сегнетоэлектрический порядок в тригональной фазе NBT не устанавливается. Средний размер полярных нанодоменов при комнатной температуре — порядка 110 Å (11 нм) [7]. Локальная поляризация в NBT возникает, согласно [2], в результате смещения иона Na вдоль псевдокубического направления [111], совпадающего с осью C_3 тригональной структуры (далее все обозначения направлений указаны в осях псевдокубической ячейки).

Аномальная диэлектрическая релаксация по существующим представлениям возникает в области температур, где под воздействием тепловых флуктуаций дипольный момент кластера может перепрыгивать между несколькими ориентациями, равновероятными в средней структуре. При понижении температуры прыжковый механизм "вымораживается" и дипольные моменты случайным образом застревают в равновероятных ориентациях, сохраняя симметрию средней структуры.

Смещение катиона A вдоль направления [111], приводящее к ромбоэдрическому искажению структуры кластера, было обнаружено во многих релаксорах, включая модельный кристалл $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PMN). Однако недавно при исследовании дифракции нейтронов и рентгеновской дифракции высокого разрешения в PMN и смешанном кристалле $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3/\text{PbTiO}_3$ (PMN/PT) большие тепловые факторы на атомах свинца были объяснены существованием разупорядоченной компоненты смещения иона Pb в направлении ортогональном [111]. Основным подтверждением этой идеи в работе [8] является сравнительный анализ фактора достоверности R в серии уточнений, которые проводились в предположении смещения Pb вдоль одного из направлений: [100], [111], [110], [123]. При высоких температурах минимум R -фактора не зависел от направления смещения. Однако при понижении температуры, в области, где появляется диффузное рассеяние, минимум R -фактора четко определился для направления [100]. Такое смещение характерно для тетрагональной фазы. Однако тетрагональный тип смещения в структуре кластера согласно [8] имеет только Pb. Все остальные ионы испытывают смещения вдоль направления [111]. Полярный кластер имеет моноклинную

структуру. Ортогональная компонента смещения в высокотемпературной области динамически разупорядочена по шести равновероятным направлениям псевдокубической ячейки. В цитируемой работе высказывается предположение о том, что локальные структуры как в PMN, так и в системе PMN/PT, определяются конкуренцией двух типов упорядочения: полярного тетрагонального и полярного ромбоэдрического. Предположение о конкуренции в структуре NBT двух типов порядка может оказаться полезным при рассмотрении характера изменения локальной структуры тригональной фазы в области температур 500...610 К.

Недавно при исследовании спектров ядерного магнитного резонанса (ЯМР) ^{23}Na в NBT нами было обнаружено характерное температурное сужение линии спектра, принадлежащей полярным кластерам. Уменьшение значения второго момента линии с возрастанием температуры возникает как следствие позиционного обмена Na между несколькими минимумами его потенциального рельефа. Ромбоэдрическому типу смещения соответствует потенциальный рельеф Na, имеющий восемь минимумов. При высокой частоте переходов усреднение происходит в кубическую позицию. Однако в NBT подобный тип подвижности Na обнаруживается лишь при температуре выше 680 К в тетрагональной фазе [9].

Мы предположили, что в полярных кластерах существует компонента смещения в плоскости ортогональной оси симметрии ячейки C_3 . Эта компонента разупорядочена по трем равновероятным положениям относительно тригональной оси.

В низкотемпературной области тригональная структура, определенная по Брэгговским рефлексам является средней. Симметрия полярных областей в этом случае также моноклинная.

В высокотемпературной области тригональной фазы ион Na в среднем по времени находится на оси C_3 . Эта симметричная модель близка к рассмотренной выше для кристаллов группы PMN.

В обоих случаях в полярных областях существует общий сдвиг иона A вдоль направления [111] и динамически разупорядоченная в релаксорной области ортогональная компонента. Суммарное смещение в нашей модели не направлено вдоль [001], а лишь отклонено на некоторый угол от оси C_3 .

Строение релаксоров на микроуровне и динамика дипольных моментов кластеров исследовались методами рассеяния нейтронов, рентгеновской дифракции, комбинационного рассеяния света и ИК-спектроскопии. Но даже для модельных релаксоров не существует полной ясности относительно направления в ячейке сегнетоактивных смещений, симметрии полярных кластеров и взаимосвязи локальной и средней структур.

Данные предыдущей работы [9] показали, что спектр ЯМР квадрупольного ядра ^{23}Na содержит достаточно важную информацию о процессах,

происходящих в структуре NBT при различных температурах. Однако извлечение этой информации методами, обычно используемыми в ЯМР, невозможно ввиду низкого разрешения компонент частотного распределения. В данной работе была разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитать форму линии спектра для любой ориентации кристалла в магнитном поле, исходя из предложенного варианта структурной модели. В программе существует возможность исследования как гомогенных по составу структур с дальним порядком, так и структур, сочетающих различные типы локального порядка.

Спектры, симулированные с помощью программы, сопоставлялись с экспериментальными спектрами ^{23}Na в NBT при температурах 729, 580, 500 и 293 К.

Эксперимент

Измерения ориентационных зависимостей формы линии центральной компоненты спектра ЯМР ^{23}Na были проведены на ларморовской частоте 15,7 МГц при вращении монокристалла NBT вокруг оси [110]. Ориентационные зависимости были измерены при температурах 293, 500, 580, 729 и 780 К с использованием непрерывного метода регистрации. Для увеличения отношения сигнал/шум осуществлялось накопление спектров.

Форма линии спектра и модель

Типичный спектр кристалла NBT показан на рис. 1. Как видно из рисунка, характерной особен-

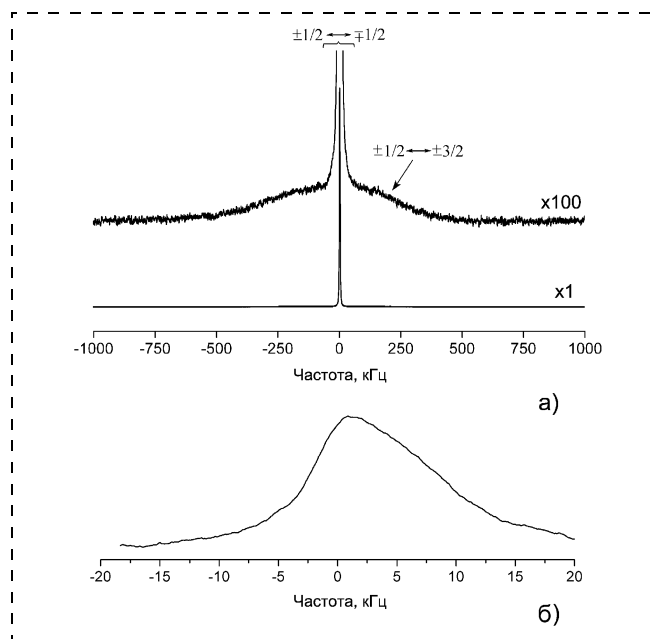


Рис. 1. Спектр ЯМР ^{23}Na монокристалла NBT в ориентации, когда магнитное поле направлено вдоль псевдокубической оси [100]:

a — высокое поле, частота 79,4 МГц; *б* — центральная компонента в низком поле, частота 15,7 МГц

ностью спектра является его низкое разрешение, создающее значительные трудности для анализа

Спектр ЯМР ^{23}Na в сильном поле, когда значение квадрупольного взаимодействия много меньше ларморовской частоты, состоит из центральной компоненты (переход $1/2 \leftrightarrow -1/2$), положение которой в первом порядке теории возмущений не зависит от квадрупольного взаимодействия, и двух равноотстоящих от нее спутников (переходы $\pm 3/2 \leftrightarrow \pm 1/2$). Интенсивности компонент соотносятся как 2:3:2.

Как видно из рис. 1, а, спектр ^{23}Na в монокристалле NBT состоит из узкой центральной компоненты и широкой компоненты малой интенсивности, образованной спутниками. Такая форма спектра совершенно не характерна для монокристаллов и свидетельствует о большом разбросе параметров тензоров градиента электрического поля (ГЭП) на ядрах натрия в кристалле. Отметим также, что при комнатной температуре с изменением ориентации кристалла ширина и форма широкой компоненты спектра меняются очень слабо и получить достоверную информацию о локальной структуре кристалла из спектров в высоком поле весьма затруднительно.

Сдвиг центральной компоненты во втором порядке теории возмущений обратно пропорционален ларморовской частоте ν_L . Форма центральной компоненты спектра ЯМР в низком поле (ларморовская частота 15,7 МГц) определяется сверткой функций $f(\nu')$, которая зависит от частотного распределения компонент спектра и $L(\nu)$, обусловленной межъядерным диполь-дипольным взаимодействием:

$$F(\nu) = \int f(\nu')L(\nu - \nu')d\nu'. \quad (1)$$

Вклад дипольного уширения сравнительно мал [9].

В работе [9], исходя из средней структуры ромбоэдрической фазы, была выбрана специальная ориентация кристалла, где спектр может быть представлен как суперпозиция двух перекрывающихся линий с изменяющимся с температурой взаимным положением. Более узкая линия принадлежит сравнительно мало искаженным областям кристалла ("матрице"), а широкая — полярным кластерам. Однако информация, которая может быть получена из температурной зависимости спектров в одной ориентации кристалла, ограничена. Дальнейшее расширение информации требует исследования ориентационных зависимостей формы линии спектров при нескольких значениях температуры. С этой целью была разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитать форму линии спектра для любой ориентации кристалла в магнитном поле исходя из заданного набора возможных смещений иона Na. В NBT основной вклад в электрический дипольный момент кластера вносит смещение именно того иона, на ядре которого ведется наблюдение. Эта особенность

позволяет использовать модель приемлемой сложности.

При расчетах использована зависимость квадрупольного сдвига второго порядка от ориентации кристалла в магнитном поле для аксиально симметричного тензора ГЭП [10]:

$$\Delta = \text{const} \cdot q_{zz}^2 (1 - \cos^2\theta) (9 \cos^2\theta - 1), \quad (2)$$

где θ — угол между главной осью тензора ГЭП V_{zz} и направлением магнитного поля; q_{zz} — главное значение тензора ГЭП на ядре, которое определяется, в данном случае, значением смещения иона Na из его позиции в кубической фазе. Для уточнения однородного уширения магнитным диполь-дипольным взаимодействием с соседними ядрами был проведен расчет второго момента линии (M_2) в радиусе 5 нм (50 Å). Расчет ориентационной зависимости M_2 проводился для кубического кристалла, что не является заметной погрешностью.

Для анализа модели в программу вводятся: тип смещения иона Na из положения в кубической фазе, число возможных равновероятных ориентаций дипольного момента кластера и диполь-дипольное уширение для каждой заданной ориентации кристалла. Варьируемыми параметрами являются q_{zz} и Гауссово уширение, связанное с разбросом частот подстановочным замещением Na/Bi. В программе заложена возможность исследования как однородных по составу структур с дальним порядком, так и структур, сочетающих различные типы локального порядка с учетом весового соотношения состояний.

При сопоставлении расчетных спектров с экспериментальными использовался метод наименьших квадратов для единого массива данных из набора спектров, представляющих ориентационную зависимость.

Обсуждение результатов

Температуру 729 К можно считать проверочной для программы, поскольку при этой температуре существует только тетрагональная структура с дальним порядком. Смещение Na происходит вдоль направлений типа [100] псевдокубической ячейки.

На рис. 2 видно хорошее совпадение формы расчетных и экспериментальных спектров и спектров, полученных при вращении кристалла вокруг оси [110].

Необходимо отметить, что наилучшую сходимость дает близкое к нулю содержание какой-либо второй (не тетрагональной) фазы, что независимым образом подтверждает данные о фазовом составе в этой области температур. Отметим также, что при повышении температуры до 780 К происходит резкое сужение линий ЯМР ^{23}Na , практически исчезает асимметрия спектра и ориентационная зависимость. Это свидетельствует о приближе-

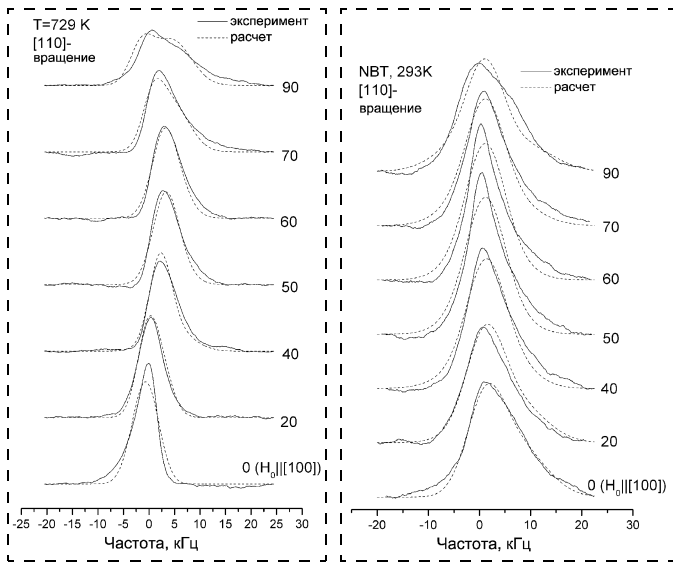


Рис. 2. Ориентационные зависимости формы линии спектра и результаты моделирования ориентационной зависимости спектров ЯМР ^{23}Na в кристалле $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$ при температуре 729 К

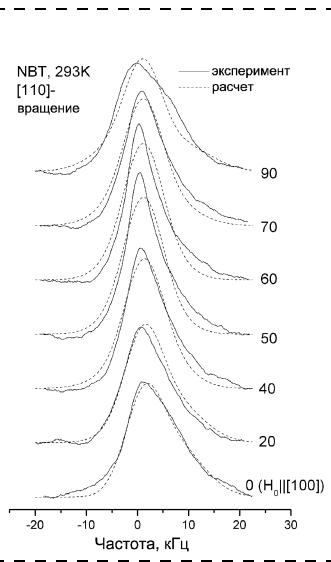


Рис. 3. Результаты моделирования ориентационной зависимости формы линии спектров ЯМР ^{23}Na в кристалле $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$ при температуре 293 К

нии к пределу быстрого движения, восстанавливающего кубическую симметрию.

Для расчета формы линии при 293 К в программу была введена модель, где смещение Na в кластерах происходит вдоль ромбоэдрического направления [111] и потенциальный рельеф Na имеет восемь минимумов. Массив данных состоит из 10 спектров, соответствующих углам поворота от 0 до 90° с шагом 10°. Наилучшее согласие экспериментальных и расчетных спектров в этом случае достигается не для монофазного состава. Расчет-

ные спектры, показанные на рис. 3, получены для весовой доли тригональных кластеров ~ 45 %.

Интересно отметить, что для варианта расчета, когда симметрия "матрицы" заранее не закладывается в модель как кубическая, подгонка также приводит к малому значению q_{zz} для этой фазовой компоненты и дает такую же долю тригональной фазы (см. таблицу).

При температурах 500 и 580 К, как уже отмечалось, в структуре NBT сосуществуют тригональная и тетрагональная фазы. В программе было задано два типа сосуществующих смещений Na: вдоль направления [111] (тригональное) и вдоль направления [100] (тетрагональное). Экспериментальные формы линии хорошо описываются моделью (рис. 4) при содержании тетрагональной фазы около 72 % при 580 К и 58 % при 500 К.

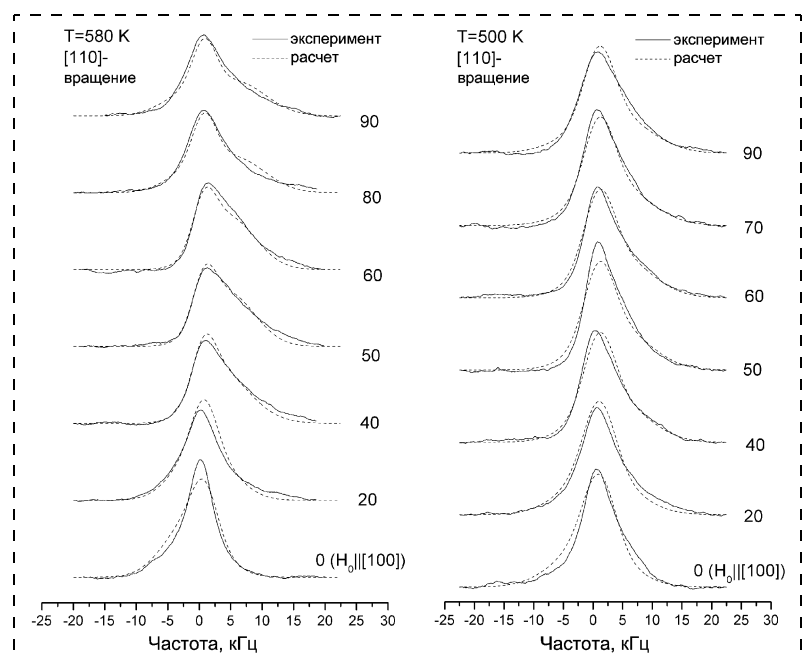
Значение q_{zz} для тетрагональной фазы при этих температурах близко к найденному при 729 К. Интересно отметить, что при повышении температуры от комнатной до 500 К значение q_{zz} , характеризующее искажение тригональной фазы уменьшается до значения, когда модель уже практически не различает тип смещения (см. таблицу).

Использованное в модели выражение (2), как уже отмечалось, применимо лишь для аксиально симметричных тензоров ГЭП. Это условие нарушается, если ион Na смещается с оси симметрии. Однако, если ортогональная компонента смещения в моноклинном кластере значительно меньше продольной компоненты (направление [111]), программа по нашим оценкам применима. При температуре 293 К, где подвижность дипольных моментов кластеров выморожена, проведенный в данной работе расчет подтверждает модель, предложенную нами в работе [9]. Важным фактом в пользу выбора моноклинной симметрии класте-

Таблица

Температура, К	Тригональная		Тетрагональная	
	q_{zz}	Доля фазы	q_{zz}	Доля фазы
293	2,21	0,45	0,3	0,55
500	0,03	0,42	1,4	0,58
580	0,01	0,28	1,7	0,72
729	—	0,0	1,5	1,0

Рис. 4. Результаты моделирования ориентационной зависимости спектров ЯМР ^{23}Na в кристалле $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$ при температурах 580 и 500 К



ра в NBT является также температурная зависимость второго момента спектра. Значение M_2 в тригональной фазе значительно больше, чем в высокотемпературной области тетрагональной фазы, где выше 680 К наблюдаются движения в потенциальном рельефе с восемью минимумами [9].

При температурах 500 и 580 К расчет дает значительно более высокий процент содержания тетрагональной фазы, чем было определено дифракционными методами [2, 3]. Это не указывает на недостаток программы, так как выше 500 К форма спектра заметно отличается от наблюдаемой при комнатной температуре. Сопоставляя значения вариационного параметра расчета q_{zz} для различных температур, можно видеть значительное его уменьшение для тригонального смещения при 500 и 580 К. Для тетрагонального смещения величина q_{zz} не очень заметно меняется в интервале температур 500...729 К (см. таблицу). Следует отметить, что в предложенной модели параметры q_{zz} отслеживают локальные искажения структуры раздельно в полярном кластере и матрице, а также в различных сосуществующих фазах. Модель строения релаксора, которая исследовалась нами при 500 и 580 К, как выяснилось, является слишком упрощенной для этой области температур. С целью развития модели необходимо более подробное экспериментальное исследование температурного интервала между 290 и 500 К. Это позволит более надежно интерпретировать обнаруженные при 500 К резкие изменения параметров модели.

В качестве заключительного замечания отметим, что, по крайней мере для NBT, анализ ориентационных зависимостей формы линии ЯМР указывает на четкое соответствие частотного распределения $f(\nu')$ рассмотренным выше позиционным моделям. Ранее для описания спектра ЯМР некоторых Рb-содержащих релаксоров в высоком поле была использована модель изотропного стекла RBRF (случайные взаимодействия — случайные поля) [11].

Отметим также, что созданная для данного исследования программа пригодна также для анализа различных гетерофазных объектов, где малые смещения в структуре приводят к малым значениям сдвигов квадрупольных частот на фоне уширения линий, сопоставимого со сдвигами. Ранее такие случаи, насколько нам известно, методом ЯМР не исследовались.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-02-16437-а) и гранта Президента РФ "Научная школа" (РИ-112/001/041).

Список литературы

1. Смоленский Г. А., Исупов В. А., Аграновская А. И., Крайник Н. Н. Новые сегнетоэлектрики сложного состава. IV // ФТТ. 1960. Т. 11. № 11. С. 2982—2985.

2. Вахрушев С. Б., Иваницкий П. Г., Квятковский Б. Е. и др. Нейтроноструктурные исследования натрий-висмутного титаната // ФТТ. 1983. Т. 25. № 9. С. 2613—2616.

3. Jones G. O., Thomas P. A. Investigation of the structure and phase transitions in the novel A-site substituted distorted perovskite $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ // Acta Cryst. 2002. V. B58 P. 168—178.

4. Вахрушев С. Б., Квятковский Б. Е., Малышева Р. С. и др. Исследование фазовых переходов в сегнетоэлектрическом кристалле $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ методом рассеяния нейтронов // ФТТ. 1989. Т. 34. № 1. С. 154—158.

5. Емельянов С. М., Раевский И. П., Смотраков В. Г., Савенко Ф. И. Пьезоэлектрические свойства кристаллов титаната натрия-висмута // ФТТ. 1984. Т. 26. № 6. С. 1897—1899.

6. Roleder K., Franke I., Glazer A. M., Thomas P. A., Miga S., Suchanicz J. The piezoelectric effect in $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ceramics // J. Phys: Condens. Matter. 2002. V. 14. N 21. P. 5399—5406.

7. Вахрушев С. Б., Квятковский Б. Е., Малышева Р. С. и др. Исследование размытого фазового перехода в $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ методом рассеяния нейтронов // ФТТ. 1985. Т. 27. № 3. С. 737—740.

8. Dkhil B., Kiat J. M., Calvarin G., Baldinozzi G., Vakhruшев S. B., Suard E. Local and long range order in the relaxor-ferroelectric compounds $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ and $\text{PbMg}_{0,3}\text{Nb}_{0,6}\text{Ti}_{0,1}\text{O}_3$ // Phys. Rev. B. 2002. V. B65.

9. Александрова И. П., Иванов Ю. Н., Суховский А. А., Вахрушев С. Б. ЯМР ^{23}Na в сегнетоэлектрике-релаксоре $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$ // ФТТ. 2006. Т. 48. № 6. С. 1055—1058.

10. Абрагам А. Ядерный магнетизм. М.: ИЛ, 1963.

11. Blinc R., Dolinsek J., Gregorovic A., Zalar B., Filipic C., Kutnjak Z., Levstik A., Pirc R. NMR and the spherical random bond-random field model of relaxor ferroelectrics // Phys. Chem. Solids. 2000. V. 61. P. 177—183.

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ

Напоминаем, что продолжается
подписка на журнал

"Нано- и микросистемная техника".

Оформить подписку можно через
подписные агентства.

Подписные индексы по каталогам:

Роспечать — 79493;

Пресса России — 27849.

В. М. Колешко д-р техн. наук, проф.,
А. В. Сергейченко,
Белорусский национальный технический
университет, г. Минск

ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ

Рассмотрены методы золь-гель технологии формирования наноструктурированных металлооксидных и углеродных материалов для сенсорных микросистем. Рассмотрены зависимости характеристик газовых сенсоров от размера нанокристаллов активного слоя. Приведена чувствительность к газам некоторых наноструктурированных оксидов металлов, полученных методами золь-гель технологии.

Многие фундаментальные свойства поликристаллических материалов (температура плавления, ширина запрещенной зоны у полупроводников, остаточный магнетизм, прочность, адсорбция и т. п.) связаны определенной зависимостью с размером кристаллитов, их образующих, в нанометровом диапазоне. Это позволяет получать целые поколения материалов с уникальными характеристиками, не меняя их химического состава, а лишь регулируя размеры и форму нанокристаллов.

Для газового анализа возможность контролируемо формировать наноструктуру активного слоя является, пожалуй, важнейшим условием при создании высокочувствительных селективных сенсоров. Например, при размере зерна наноструктурированного SnO_2 в диапазоне 2...10 нм наблюдается хорошая селективность к CO по сравнению с H_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ и C_4H_{10} . Чувствительность к CO повышается в 10 раз при снижении размера зерна со 100 до 5 нм. Максимальное быстродействие имеют сенсоры с размером частиц 8...10 нм, а долговременную стабильность — с размером свыше 20 нм [1]. Процессы адсорбции и окислительно-восстановительные реакции на поверхности наноструктурированных материалов имеют очень высокие скорости и играют основную роль в формировании выходного сигнала [2].

В технологии существует несколько методов формирования наноструктурированных материалов [3, 4, 5]: различные методы напыления, анодное окисление, газофазный (конденсация паров) и плазмохимический синтез, термическое разложение и восстановление, механосинтез, детонационный синтез и электровзрыв, упорядочение нестехиометрических соединений как метод создания наноструктуры. Однако лишь золь-гель технология позволяет получать изолированные (или наоборот, связанные определенным образом) наночастицы с контролируемым узким распределением их по размерам [6].

Методы золь-гель технологии получения наноструктурированных материалов с контролируемым размером кристаллитов могут различаться как по типу используемых предшественников (водные растворы солей, алкоксиды и др.), так и по методам формирования (метод наращивания, аэрозоль-гель метод, криохимический синтез и др.). В общем случае последовательность операций золь-гель технологии может быть представлена схемой, приведенной на рис. 1.

Предшественниками (исходными материалами синтеза) могут быть растворы солей, алкоксиды, сложные углеродсодержащие вещества. Реакция гидролиза приводит к зарождению и росту до определенного размера коллоидных частиц, которые затем, агрегируясь, образуют пространственный каркас. После удаления растворителя трехмерная сетка образовавшегося геля остается.

Среди методов золь-гель технологии получения оксидных наноматериалов наибольшую популярность приобрели те, в которых в качестве предшественников используются органические соединения [6, 7]. Применяемые при этом алкоколяты получают растворением солей металлов в спиртах. Причем рекомендуется использовать для этих целей высшие спирты [8] — это способствует повышению дисперсности формируемых нанокристаллов.

Методы получения металлооксидных наноматериалов

Формирование наноструктурированных материалов путем наращивания коллоидных частиц. Суть метода заключается в наращивании коллоидных частиц свежесажженного геля. Наращивание происходит за счет притягивания заряженных ионов, находящихся в растворе веществ, электрическим полем сформировавшейся коллоидной частицы.

Наращиваемый слой может быть как аналогичным составу исходного геля (в целях получения материала заданной пористости), так и отличным от него. Возможны различные варианты взаимодействия: наращиваемые слои могут быть химически инертными к исходному материалу; могут вступать с ним во взаимодействие с образованием нового кристаллического вещества; наносимые последующие слои могут быть инертными к основе, однако при от-

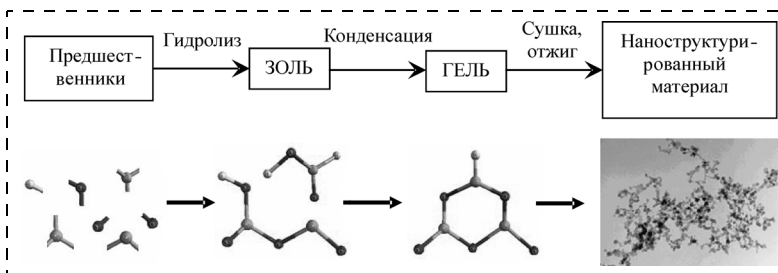


Рис. 1. Общая схема золь-гель процесса

жиге реагировать между собой и т. д. Число наращиваемых слоев теоретически может быть неограниченным. Итоговая структура образовавшегося пористого материала определяется многими факторами: химическим составом, значениями pH начала и полного осаждения в случае совместного осаждения (табл. 1 и рис. 2), термостабильностью компонентов.

Например, в случае, когда первый материал не термостабилен, а капсулирующий его — напротив, после отжига могут образовываться частицы с внутренней пористостью. Степень разбавленности раствора, температура и продолжительность осаждения, порядок сливания исходных компонентов также являются определяющими факторами [9].

Иногда гели используются в качестве монолитов-носителей рабочего вещества, различных красителей, люминофоров, ферментов и т. д. [7]. В этом случае собственной пористости может быть недостаточно. Для формирования гелевого каркаса с необходимым размером пор в золи вводят дополнительные формообразующие добавки [12, 13].

Аэро-золь-гель метод. Проводя сушку в особых условиях, возможно получение гелей, пористость которых достигает 98 %. Это так называемые аэрогели. Предшественники находятся в жидком виде, однако непосредственное взаимодействие компонентов происходит в парообразном состоянии. Подаются последние в реактор посредством барботирования жидкостей газом-носителем (высушенный азот или воздух). Концентрацией компонентов управляют путем разогрева предшественников до необходимой температуры. Камера ламинарного течения обеспечивает "выравнивание" потоков составляющих компонентов и разогрев их до определенной температуры с целью предотвращения преждевременной конденсации. В реакционной зоне происходят реакции гидролиза/конденсации с одновременной тепловой конденсацией и пере-

ходом в аэрозоль. Взаимодействие происходит при комнатной температуре и атмосферном давлении. Результирующий размер нанокристаллов и их форма зависят от температуры разогрева предшественников, скорости подачи компонентов, конструкции реактора и т. п. и может достигать 4 нм [14]. Удельная поверхность при этом достигает 800 м²/г.

Криохимический синтез. Криохимический синтез оксидных нанопорошков с регулируемым размером частиц включает в себя несколько методов формирования, отличающихся друг от друга наличием специфических промежуточных операций [9, 15].

Контролировать размер и наноструктуру материалов при криохимическом синтезе можно практически на всех стадиях процесса: вначале при формировании коллоидного раствора с определенным размером коллоидных частиц, затем на стадии распыления, где используются разного рода форсунки. Простейшие из них работают на принципе пневматического дробления струи жидкости. Помимо пневматических форсунок для распыления жидкостей применяются струйные, центробежные и ультразвуковые форсунки.

Структуру криогранул можно регулировать, используя различные скорости охлаждения замораживаемых систем до температуры кипения жидкого азота (77 К) или варьируя уровень замораживания. Следующими определяющими факторами являются температура нагрева материала и скорость удаления газообразных продуктов разложения. Например, наиболее оптимальным режимом для получения материалов, имеющих повышенную адсорбционную и каталитическую активность, является комбинация умеренной температуры нагрева (<900 К) и высокой скорости удаления газообразных веществ. Такая комбинация позволяет получать многокомпонентные оксиды гомогенной структуры. Важна также скорость нагрева: высокая

Таблица 1
Значения pH осаждения гидроксидов металлов [9, 10, 11]

Гидроксид	pH начала осаждения	pH полного осаждения	Гидроксид	pH начала осаждения	pH полного осаждения
Sn(OH) ₄	2,0	3—4	Si(OH) ₄	2,0	—
Zn(OH) ₂	5,2	8—11	Mn(OH) ₂	7,8	10,4
Cu(OH) ₂	5,3	8—10	Y(OH) ₃	6,95	>9
Ni(OH) ₂	6,7	9—10	La(OH) ₃	7,82	8,4
Co(OH) ₂	6,6	9—14	Ce(OH) ₃	7,6	>9
Cr(OH) ₃	4,0	6,8	Pr(OH) ₃	7,35	>9
W(OH) ₆	2,0	—	Nd(OH) ₃	7,31	>9
Pb(OH) ₂	—	6,0	Sm(OH) ₃	6,92	>9
Al(OH) ₃	3,3	5,2	Eu(OH) ₃	6,82	>9
Mg(OH) ₂	9,4	12,4	Gd(OH) ₃	6,83	>9
Bi(OH) ₃	3,8	—	Dy(OH) ₃	6,37	>9
Fe(OH) ₃	1,5	4,1	Er(OH) ₃	6,76	>9
Ti(OH) ₄	—	1,5	Tm(OH) ₃	6,4	>9
Cd(OH) ₂	7,2	9,7	Yb(OH) ₃	6,3	>9

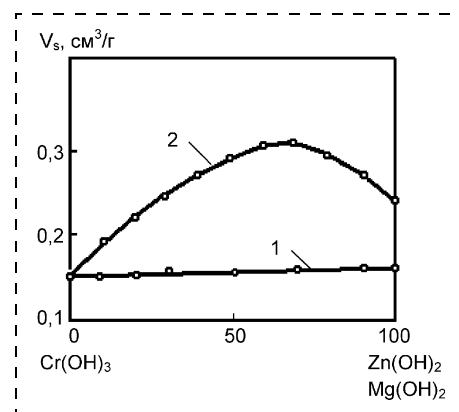


Рис. 2. Зависимость предельной сорбционной емкости от состава соосажденных гидрогелей:

1 — pH начала и полного осаждения совпадают (система Cr(OH)₃—Zn(OH)₂); 2 — pH начала и полного осаждения не совпадают (система Cr(OH)₃—Mg(OH)₂)

скорость нагрева вплоть до начала термического разложения позволяет сохранить высокую химическую однородность в многокомпонентных системах. Химическая однородность наноструктурированных поликристаллических материалов крайне важна при использовании их в качестве чувствительных слоев в сенсорных системах газового анализа.

Газовая чувствительность наноструктурированных оксидов металлов

Как известно, поликристаллические оксиды металлов обладают полупроводниковыми свойствами и широко применяются в качестве чувствительных слоев в резистивных газовых сенсорах. При этом чувствительность газовых сенсоров сильно зависит от размеров кристаллитов наноструктурированного чувствительного слоя. Она может повышаться в десятки и более раз при приближении размера отдельного кристаллита к значению, равному удвоенной длине Дебая (L_D):

$$L_D = (\epsilon_0 K T / n_0 e^2)^{1/2},$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; n_0 — концентрация носителя заряда; e — заряд носителя; K — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Зависимость чувствительности S от длины Дебая описывается выражением

$$S = \Delta G / G_0 = (\Delta n / n_0) L_D,$$

где ΔG — изменение электропроводности активного слоя под действием адсорбированного газа; G_0 — исходное значение электропроводности; Δn — изменение концентрации носителя заряда.

При таких размерах около 50 % атомов, составляющих наночастицу, оказываются на поверхности и участвуют в реакциях взаимодействия с адсорбированными газами. Это хорошо видно из приведенной модели нанокристалла SnO_2 (рис. 3). С учетом того, что параметры кристаллической решетки большинства соединений Sn—O находятся в пределах 0,5...0,6 нм, представленная модель нанокристалла SnO_2 имеет размеры 3...4 нм.

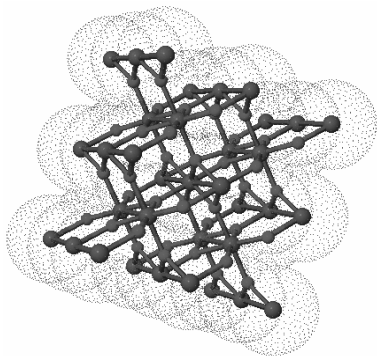


Рис. 3. Модель наноразмерного кристалла SnO_2

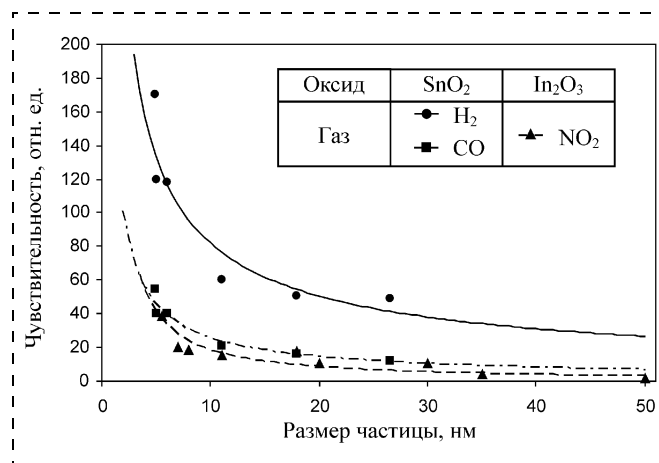


Рис. 4. Зависимость чувствительности газовых сенсоров от размера зерна наноструктурированного чувствительного слоя

Экспериментальное подтверждение сказанного было получено для оксидов олова и индия [16, 17] (рис. 4).

В табл. 2 приведены чувствительности к различным газам некоторых нанокристаллических оксидов, полученных по золь-гель технологии.

В колонке "чувствительность $S^{(*)}$ " верхними индексами обозначены следующие варианты расчета чувствительности: $S^{(1)} = R_a / R_g$; $S^{(2)} = R_g / R_a$; $S^{(3)} = (R_a - R_g) / R_g$; $S^{(4)} = (I_g - I_a) / I_a$; $S^{(5)} = I_a / I_g$; $S^{(6)} = (R_g - R_a) / R_a$, где R_g , R_a , I_g , I_a — значения сопротивлений и токов, протекающих через чувствительный слой, в присутствии определяемого газа и в воздухе, соответственно.

Получение углеродных наноматериалов

Золь-гель технология используется и при создании наноструктурированных углеродных материалов. Углеродный аэрогель обычно представляет собой своего рода пену, заполненную воздухом. Матрица аэрогеля состоит из связанных между собой, подобных коллоидным, частиц углерода или полимерных углеродных цепочек. Структура определяется несколькими факторами: природой предшественников, обычно это резорцин и формальдегид, молярным отношением предшественник/катализатор; температурой пиролиза, обычно около 1050 °С, и процедурами активации [31, 32]. Содержание углерода в материале составляет не менее 95 %. В итоге углеродный аэрогель характеризуется следующими параметрами: размер частиц в диапазоне 3...30 нм, открытая пористая структура с малым межзерненным расстоянием (<50 нм), высокая и, что важно, управляемая площадь поверхности (400...1100 м²/г). Плотность может достигать 1,2 г/см³. Варьируя параметры процесса получения, можно создать углеродные аэрогели, обладающие свойствами следующих типов материалов: адсорбенты, катализаторы, изоляторы, полупроводники, пьезоэлектрики, диэлектрики, сегнетоэлект-

Сенсорная чувствительность к газам некоторых наноструктурированных оксидов, полученных по золь-гель технологии

Оксид	Легирующая добавка, %	Размер зерна, нм	Газ	Чувствительность S^* , отн. ед., (концентрация газа)	Рабочая температура, °C	Источник
SnO ₂	—	—	C ₂ H ₅ OH	10 ¹ (1000 ppm)	350	[18]
SnO ₂	—	40—60	CO	4,7 ¹ (100 ppm)	250	[19]
SnO ₂	—	20	NO ₂	~12 ² (2 ppm)	230	[20]
SnO ₂	Ru (0,2)	15	C ₄ H ₁₀	28 ² (2000 ppm)	350	[21]
SnO ₂	Ru (0,2)	15	бензин	30 ² (100 ppm)	330	[21]
SnO ₂	Au (2)	15—40	CO	12 ³ (100 ppm)	370	[22]
SnO ₂	Pd (2)	15—25	CH ₄	9 ³ (500 ppm)	360	[22]
SnO ₂	Pt (0,2)	80	CO	10 ¹ (100 ppm)	230	[20]
SnO ₂	Os	6—12	CH ₄	7 ⁴ (1000 ppm)	275	[23]
In ₂ O ₃	—	19	NO ₂	10 ² (0,7 ppm)	250	[24]
In ₂ O ₃	—	8—10	O ₃	1500 ² (100 ppb)	300	[25]
WO ₃	—	—	O ₃	35 ³ (80 ppb)	400	[26]
SnO ₂ —CeO ₂	CeO ₂ (1)	—	H ₂ S	4 ² (5 ppm)	57	[27]
SnO ₂ —WO _x	WO _x (1)	40—90	NO ₂	3,2 ² (10 ppm)	250	[19]
In ₂ O ₃ —SnO ₂	SnO ₂ (5)	—	H ₂	100 ⁴ (100 ppm)	500	[28]
In ₂ O ₃ —MoO ₃	Mo (10)	15—20	NO ₂	25 ⁶ (1 ppm)	250	[29]
In ₂ O ₃ —NiO	Ni (1,8)	10—15	NO ₂	43 ⁶ (1 ppm)	150	[29]
In ₂ O ₃ —MoO ₃	Mo (10)	15—20	O ₃	22 ⁶ (200 ppm)	120	[29]
MoO ₃ —TiO ₂	TiO ₂ (25)	—	NO ₂	2,7 ² (2 ppm)	300	[30]

рики, контролеры диффузии, электрические проводники, электрические изоляторы, оптические материалы. Это определяет в перспективе широчайшее применение данного материала как основного при изготовлении различных устройств, так и вспомогательного при получении других сложно-структурированных материалов (возможно использование углеродного аэрогеля в качестве основания для выращивания углеродных нанотрубок [33]).

Влияние силовых полей на формирование наноструктурированных материалов

Помимо задач получения материалов с максимально возможной (или заданной) дисперсностью золь-гель технология позволяет создавать мотивированно упакованные структуры [9]. В частности, данную задачу можно решать путем наложения электрического поля на дисперсные системы, в результате чего происходит ориентирование и срастание коллоидных частиц вдоль силовых линий поля. В формировании цепочек большую роль играют поляризационные силы: вслед за деформацией и разрушением ионных оболочек коллоидных частиц в действие вступают ван-дер-ваальсовы силы сцепления. Далее в местах непосредственного контакта ядер развиваются рекристаллизационные процессы, что обуславливает относи-

тельную устойчивость цепочек после снятия поля. Структура сформированного образца характеризуется определенным равновесием сил сжатия и сил противодействия скелета геля, поддерживающих структурный каркас образца в соответствующем архитектурном оформлении. В результате такого выстраивания происходит перестройка структуры за счет более рациональной упаковки частиц. В результате этого удельная поверхность способна увеличиться в 3—4 раза. Особенно это относится к гидрогелям, частицы которых имеют иглообразную или пластинчатую форму. Еще лучшие результаты могут быть достигнуты, когда на-

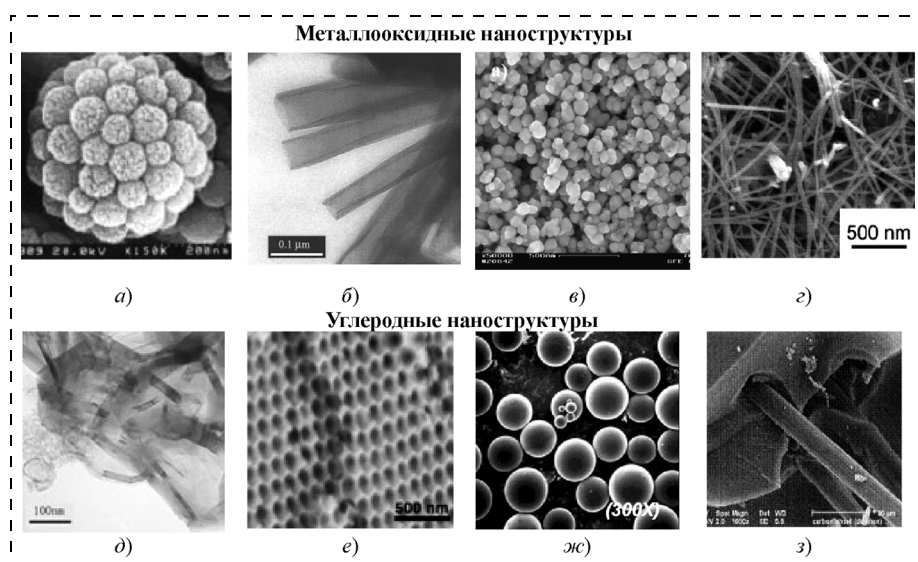


Рис. 5. Примеры наноструктурированных элементов для сенсорных микросистем, созданных на базе золь-гель технологии:

a — сферический кремний оксидный золь [35]; *b* — ванадий оксидные нанотрубки [36]; *в* — цинк оксидный нанопорошок [37]; *г* — цинк оксидные нанопровода [38]; *д* — углеродные наноленты [32]; *е* — углеродная слоистая структура с контролируемой пористостью [32]; *ж* — углеродные микросферы [32]; *з* — углеродная нанопена [39]

равне с электрическим полем процесс формирования ориентированно агрегированного геля проходит под действием ультразвука. Ультразвук предотвращает спонтанное образование агрегатов частиц геля и, более того, способствует диспергированию самих коллоидных частиц.

Таким образом, используя различные приемы и способы воздействия на золь-гель растворы, выдерживая определенные параметры процессов технологии, можно формировать сложные наноструктурированные материалы [34, 35]. Примеры мотивировано структурированных наноматериалов, полученных по золь-гель технологии, представлены на рис. 5.

* * *

Характеристики и свойства сенсорных микросистем зависят от структуры и свойств материалов их составляющих. Определенная упорядоченность структуры на наноуровне является определяющей для свойств данных материалов. Возможность создавать мотивировано упакованные наноструктурированные материалы является одним из наиболее важных достоинств золь-гель технологии. Материалы, формируемые с помощью данной технологии, используются не только как непосредственно функциональные материалы сенсорных микросистем, но и как базовые при производстве других сложноструктурированных наноматериалов, что еще больше расширяет области применения золь-гель технологии.

Список литературы

1. **Fan Lu** et al. Nanosized tin oxide as the novel material with simultaneous detection towards CO, H₂ and CH₄ // *Sensors and Actuators*. 2000. В 66. Р. 225—227.
2. **Мешков Л. Л., Нестеренко С. Н.** Синтез нанокристаллического диоксида титана для газовых сенсоров // *Сенсор*. 2002. № 1. С. 49—61.
3. **Гусев А. И., Рампель А. А.** Нанокристаллические материалы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. 224 с.
4. **Колешко В. М., Ковалевский А. А.** Поликристаллические пленки полупроводников в "микрoэлектронике". Минск: Наука и техника, 1978. 344 с.
5. **Берри Р., Холл П., Гаррис М.** Тонкопленочная технология. М.: Энергия, 1972. 336 с.
6. **Родионов Ю. М., Слюсаренко Е. М., Лунин В. В.** Перспективы применения алкоксотехнологии в гетерогенном катализе // *Успехи химии*. Т. 65. 1996. № 9. С. 865—880.
7. **Гапоненко Н. В.** Пленки, сформированные золь-гель методом на полупроводниках и в мезопористых матрицах. Минск: Наука, 2003. 136 с.
8. **Mazdiyasi K. S.** Powder synthesis from metal-organic precursors // *Ceram. Int.* 1982. V. 8. P. 42—56.
9. **Комаров В. С.** Адсорбенты: вопросы теории, синтеза и структуры. Минск: Наука, 1997. 287 с.
10. **Суйковская Н. В.** Химические методы получения тонких прозрачных пленок. Л.: Химия, 1971. 200 с.
11. **Коровин С. С., Зимица Г. В., Резник А. М.** и др. Редкие и рассеянные элементы: химия и технология. Минск: МИСИС. В 3 т. Том 1. 1996. 376 с.
12. **Пат. США 5071674** МКИ В 05 D 003/12. Method of producing large silica sol-gels doped with inorganic and organic compounds / J.-L. Nogues, L. L. Hench, Shi-Ho Wang (США); The University of Florida. — № 611490; Заявл. 06.11.1990; Оpubл. 10.12.1991.

13. **Пат. США 5009688** МКИ С 03 В 019/09. Process for producing porous glass / K. Nakanishi (США); Asahi Glass Company, Ltd. — № 408299; Заявл. 18.09.1989; Оpubл. 23.04.1991.

14. **Hyeon-Lee J., Beaucage G., Pratsinis S. E.** Aero-Sol-Gel synthesis of nanostructured silica powders // *Chem. Mater.* 1997. V. 9. P. 2400—2403.

15. **Третьяков Ю. Д., Олейников Н. Н., Можаяев А. П.** Основы криохимической технологии. М.: Высш. шк., 1987. 143 с.

16. **Yamazoe N.** New Approaches for Improving Semiconductor Gas Sensors // *Sensors and Actuators*. 1991. В 5. P. 7—19.

17. **Gurlo A.** et al. In₂O₃ and MoO₃-In₂O₃ Thin Film Semiconductor Sensors: Interaction with NO₂ and O₃ // *Sensors and Actuators*. 1998. В 47. P. 92—99.

18. **Mishra S.** et al. Alcohol sensing of tin oxide thin film prepared by sol-gel process // *Bull. Mater. Sci.* 2002. V. 25. N. 3. P. 231—234.

19. **Chiorio A.** et al. Preparation and characterization of SnO₂ and WO_x-Sn₂ nanosized powders and thick films for gas sensing // *Sensors and Actuators*. 2001. В 78. P. 89—97.

20. **Dieguez A.** et al. Influence on the gas sensor performances of the metal chemical states introduced by impregnation of calcinated SnO sol-gel nanocrystals // *Sensors and Actuators*. 2000. В 68. P. 94—99.

21. **Pan Q.** et al. Gas-sensitive properties of nanometer-sized SnO₂ // *Sensors and Actuators*. 2000. В 66. P. 237—239.

22. **Cabot A.** et al. Analysis of the noble metal catalytic additives introduced by impregnation of as obtained SnO sol-gel nanocrystals for gas sensors // *Sensors and Actuators*. 2000. В 70. P. 87—100.

23. **Siciliano P.** Preparation, characterisation and applications of thin films for gas sensors prepared by cheap chemical method // *Sensors and Actuators*. 2000. В 70. P. 153—164.

24. **Cantalini C.** et al. NO₂ response of In₂O₃ thin film gas sensors prepared by sol-gel and vacuum thermal evaporation techniques // *Sensors and Actuators*. 2000. В 65. P. 101—104.

25. **Epifani M.** et al. In₂O₃ thin films obtained through a chemical complexation based sol-gel process and their application as gas sensor devices // *J. of Sol-Gel Scie. and Techn.* 2003. N 26. P. 741—744.

26. **Cantalini C.** et al. Investigation on the O₃ sensitivity properties of WO₃ thin films prepared by sol-gel, thermal evaporation and r. f. sputtering techniques // *Sensors and Actuators*. 2000. В 64. P. 182—188.

27. **Fang G.** et al. Room temperature H₂S sensing properties and mechanism of CeO₂-SnO₂ sol-gel thin films // *Sensors and Actuators*. 2000. В 66. P. 46—48.

28. **Колешко В. М., Таратын И. А., Сергейченко А. В.** Интегральные микросенсоры — основные элементы "электронного носа" для мониторинга газовых сред: Сб. научн. трудов "Машиностроение". Вып. 17. Под ред. И. П. Филонова. Минск: УП "Технопринт", 2001. С. 443—445.

29. **Ivanovskaya M.** et al. Mechanism of O₃ and NO₂ detection and selectivity of In₂O₃ sensors // *Sensors and Actuators*. 2001. В 3869. P. 1—4.

30. **Galatsis K.** et al. Semiconductor MoO₃-TiO₂ film gas sensors // *Sensors and Actuators*. 2001. В 77. P. 472—477.

31. http://www-cenerg.cma.fr/Public/themes_de_recherche/energetique_et_mater/aerogel_de_carbonne/carbon_aerogel.

32. **Pekala R. W.** Organic aerogels from the polycondensation of resorcinol with formaldehyde // *J. of Mat. "ScTence*. 1989. Vol. 24. P. 3221—3227.

33. <http://www-cms.llnl.gov>

34. **Ивановский А. Л.** Неуглеродные нанотрубки: синтез и моделирование // *Успехи химии*. 2002. Т. 71. № 3. С. 203—224.

35. **Раков Э. Г.** Химия и применение углеродных нанотрубок // *Успехи химии*. 2001. Е 70. № 10. С. 934—973.

36. <http://home.hiroshima-u.ac.jp>

37. **Michael E. Spahr** et al. Vanadium Oxide Nanotubes A New Nanostructured Redox-Active Material for the Electrochemical Insertion of Lithium // *Journal of The Electrochemical Society*. 1999. V. 146. P. 2780—2783.

38. **Tobias J. Koplin** et al. Workflow for High Throughput Screening of Gas Sensing Materials // *Sensors*. 2006. V. 6. P. 298—307.

39. <http://www.nano.ait.ac.th/member/abhi/index.html>

40. <http://www.mkt-intl.com/aerogels/pages/semphotos.html>

П. В. Шерстнёв, А. С. Батурич, канд. физ.-мат. наук,
Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук., **А. И. Князев**,
 Московский физико-технический институт
 (государственный университет),
 Центр автоэмиссионных технологий

МАГНИТНОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ПОРОШКОВ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОЭМИССИОННОГО КАТОДА

Проанализировано поведение несферических частиц углеродного порошка в однородном магнитном поле. Представлена зависимость времени прихода к равновесию частиц от их геометрических размеров, тензора магнитной проницаемости, напряженности магнитного поля и вязкости среды. Была осуществлена экспериментальная проверка данного эффекта. Предлагается использовать этот эффект для ориентации углеродных частиц в процессе изготовления катодов методом электрофоретического осаждения с целью увеличения количества эммитирующих частиц.

Введение

Производство автоэмиссионных катодов из углеродных порошков [1, 2] имеет ряд существенных достоинств. Во-первых, порошки могут быть легко приготовлены практически из любого углеродного материала: углеродных волокон, графитов, коксов, пироуглеродных пленок. Во-вторых, порошок достаточно простыми способами может быть нанесен на поверхность любой формы. Однако эмиссионные катодные структуры, получаемые различными методами, не обеспечивают желаемой равномерности эмиссионного тока по поверхности катода несмотря на то, что выбором технологических параметров удается получать ровные и однородные покрытия.

Подробное изучение показало, что это связано, в первую очередь, с анизотропией автоэлектронной эмиссии [1, 3]. Например, эмиссия с торца углеродного волокна превышает эмиссию с боковой поверхности на несколько порядков при одинаковом макроскопическом электрическом поле. Аналогичная ситуация наблюдается для пироуглерода, где эмиссия происходит преимущественно с торцевой поверхности пласти-

ны. Таким образом, для увеличения эффективности автоэмиссионного катода необходима ориентация частиц порошка. Один из методов ориентирования несферических частиц заключается в помещении образца в сильное магнитное поле.

Теоретические расчеты

Определим момент сил $M_{\text{маг}}$, который действует на анизотропный эллипсоид вращения в однородном магнитном поле с напряженностью H , помещенный в изотропную среду (жидкость) с магнитной проницаемостью $\mu^{(e)}$. Выберем неподвижную правостороннюю систему координат XYZ с началом координат, расположенным в центре тяжести эллипсоида. Оси X , Y , Z направлены вдоль осей симметрии эллипсоида, причем ось Y является осью вращения эллипсоида и вектор H лежит в плоскости XY . Согласно работе [4] поле внутри эллипсоида напряженности $H^{(i)}$ будет однородным, но вообще говоря $H^{(i)}$ не параллельно H . Если тензор магнитной проницаемости эллипсоида $\mu_{jk}^{(i)}$ имеет только диагональные члены, отличные от нуля, то компоненты вектора на-

пряженности $H^{(i)}$ определяются выражением

$$H_j^{(i)} = \frac{\mu^{(e)} H_j}{(1 - n^{(j)})\mu^{(e)} + n^{(j)}\mu_{jj}^{(i)}}, \quad (1)$$

где $n^{(j)}$ — коэффициенты размагничивания, зависящие от геометрических размеров эллипсоида и связанные соотношением $n^{(x)} = n^{(z)} = (1 - n^{(y)})/2$. Компоненты вектора магнитного момента m , создаваемого внешним магнитным полем внутри эллипсоида, равны

$$m_j = V H_j^{(i)} (\mu_{jj}^{(i)} - 1) / 4\pi, \quad (2)$$

где V — объем эллипсоида. Момент сил, действующий на эллипсоид, вычисляется по формуле

$$M_{\text{маг}} = [mH]. \quad (3)$$

В выбранной системе координат $H_x = H \sin \theta$, $H_y = H \cos \theta$, $H_z = 0$, где θ — угол между направлением H и осью Y . Тогда, в соответствии с (2, 3), вектор m лежит в плоскости XY и момент сил $M_{\text{маг}}$ будет направлен вдоль оси Z . По формулам (1–3) найдем абсолютное значение $M_{\text{маг}}$:

$$M_{\text{маг}} = \frac{V \mu^{(e)} H^2 \sin 2\theta}{8\pi} (k_1 - k_2),$$

$$k_1 = \frac{2(\mu_{xx}^{(i)} - 1)}{\mu_{xx}^{(i)}(1 - n^{(y)}) + (1 + n^{(y)})\mu^{(e)}}, \quad (4)$$

$$k_2 = \frac{(\mu_{yy}^{(i)} - 1)}{n^{(y)}\mu_{yy}^{(i)} + (1 - n^{(y)})\mu^{(e)}}.$$

Таким образом, момент сил стремится повернуть ось вращения эллипсоида в положение, параллельное или перпендикулярное к полю при $(k_1 - k_2) > 0$ или $(k_1 - k_2) < 0$ соответственно. Значение параметров k_1 и k_2 зависит от геометрических размеров, магнитных проницаемостей среды и эллипсоида. Далее для удобства обозначим $\gamma = \mu^{(e)} V (k_1 - k_2) / 8\pi$.

В данной работе в качестве экспериментальных образцов ис-

пользованы отрезки углеродных волокон. Углеродные волокна имеют цилиндрическую форму. Однако, так как средняя длина волокна около $L \approx 40$ мкм и радиус $R \approx 5$ мкм, то в предельном случае можно рассматривать цилиндр как вытянутый эллипсоид вращения. Тензор магнитной проницаемости углеродных волокон имеет диагональный вид с отличными от нуля элементами, причем $\mu_{xx}^{(i)} = \mu_{zz}^{(i)}$. Поэтому в рамках нашей модели расчет магнитного момента сил $M_{\text{маг}}$, действующего на углеродные частицы, будет осуществляться по формуле (4).

Найдем момент силы трения $M_{\text{тр}}$, действующий на цилиндр длиной L и радиуса R , вращающийся относительно центра тяжести в вязкой среде с угловой скоростью ω , направленной вдоль оси Z . Данная задача была решена в работе [5] при условии, что влияние инерции жидкости пренебрежимо мало по сравнению с влиянием вязкости среды, т. е. число Рейнольдса $Re \ll 1$. Момент сил трения в этом случае определяется выражением

$$M_{\text{тр}} = -\frac{\pi\eta L^3}{\ln\frac{L}{R}-0,8} \omega = -\beta\dot{\theta}, \quad (5)$$

где обозначено $\beta = \frac{\pi\eta L^3}{\ln\frac{L}{R}-0,8}$, η —

вязкость жидкости; $\dot{\theta}$ — вектор угловой скорости, равный ω . Число Рейнольдса определяется выражением $Re = \rho AU/\eta$, где ρ — плотность жидкости; A — характерный геометрический размер цилиндра, приблизительно равный L ; v — скорость потока. В рассматриваемой модели максимальная линейная скорость равна $v_{\text{макс}} = \omega L/2$, поэтому условие $Re \ll 1$ можно переписать в виде:

$$\omega \ll \frac{2\eta}{\rho L^2}. \quad (6)$$

Таким образом, в рассматриваемой модели считаем, что момент сил трения определяется выражением (5) при условии (6).

Запишем уравнение движения цилиндра. На цилиндр будут действовать противоположно направленные моменты сил $M_{\text{маг}}$ и $M_{\text{тр}}$, значения которых вычисляются по формулам (4) и (5). Соответственно, закон сохранения момента импульса в проекции на ось Z запишется следующим образом:

$$\ddot{\theta} + 2\delta\dot{\theta} + \frac{\omega_0^2}{2} \sin 2\theta = 0, \quad (7)$$

где $\delta = \beta/2I$, $\omega_0 = H(2\gamma/I)^{0,5}$; $I = \rho_{\text{ц}}\pi R^2 L(3R^2 + L^2)/12$ — момент инерции цилиндра относительно оси вращения [6]; $\rho_{\text{ц}}$ — плотность цилиндра; $\dot{\theta}$ — проекция вектора угловой скорости на ось Z ; $\ddot{\theta}$ — проекция вектора углового ускорения на ось Z . При малых θ синус в выражении (7) может быть разложен в ряд Тейлора и уравнение (7) сводится к типичному дифференциальному уравнению для колебательных систем:

$$\ddot{\theta} + 2\delta\dot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0. \quad (8)$$

В случае если $\omega_0 > \delta$ — периодический характер колебаний, если $\omega_0 < \delta$ — аperiodический характер, при $\omega_0 = \delta$ — критический режим работы [6]. Критическое значение напряженности магнитного поля $H_{\text{кр}}$, когда $\omega_0 = \delta$, в соответствии с формулами (4), (5), (7) равно

$$H_{\text{кр}} = \frac{\beta}{2\sqrt{2}\gamma I}. \quad (9)$$

Таким образом, если внешнее магнитное поле $H > H_{\text{кр}}$, то характер колебаний будет периодический, а при $H < H_{\text{кр}}$ — аperiodический.

Зададим начальные условия в виде $\theta(0) = \theta_0$, $\dot{\theta}(0) = 0$, тогда ре-

шение задачи Коши уравнения (8) при условии $H > H_{\text{кр}}$ будет

$$\theta(t) = \frac{\theta_0 \exp(-\delta t)}{\cos(\arctan(\delta/\omega_0))} \times \cos(\omega t - \arctan(\delta/\omega_0)), \quad (10)$$

где $\omega = (\omega_0^2 - \delta^2)^{0,5}$ — характерная частота. Характерное время прихода к равновесию определяется выражением

$$\tau = 1/\delta. \quad (11)$$

В случае $H < H_{\text{кр}}$ решение уравнения (8) при заданных начальных условиях будет

$$\theta(t) = \frac{\theta_0}{2\omega_1} [(\delta + \omega_1) \times \exp(-\delta + \omega_1)t + (\omega_1 - \delta) \times \exp(-\delta - \omega_1)t], \quad (12)$$

где $\omega_1 = (\delta^2 - \omega_0^2)^{0,5}$. Характерное время прихода к равновесию в этом случае определяется выражением

$$\tau = 1/(\delta - \omega_1). \quad (13)$$

Решения (10) и (12) являются приближенными аналитическими решениями уравнения (7) при условии малого значения угла θ . Для оценки точности полученных решений уравнение (7) было решено численным методом. Численные и аналитические решения уравнения (7) при $\theta_0 = 45^\circ$, $\delta = 0,1$; $\omega = 1$ и при $\theta_0 = 45^\circ$, $\delta = 10$, $\omega = 1$ представлены на рис. 1, 2.

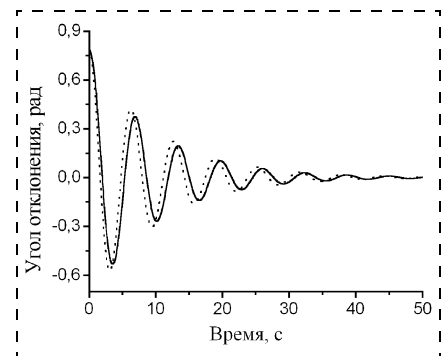


Рис. 1. Зависимости амплитуды колебаний угла отклонения от времени:

сплошная кривая — точное решение; пунктирная кривая — аналитическое решение; $\theta_0 = 45^\circ$; $\delta = 0,1$; $\omega = 1$

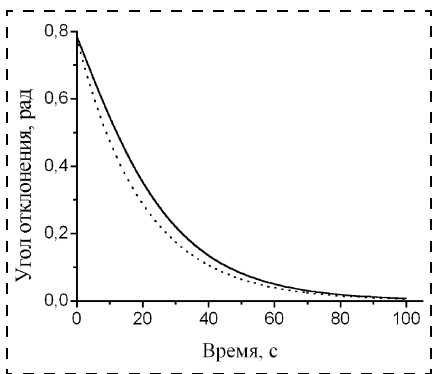


Рис. 2. Зависимости амплитуды колебаний угла отклонения от времени:

сплошная кривая — точное решение; пунктирная кривая — аналитическое решение; $\theta_0 = 45^\circ$; $\delta = 10$, $\omega = 1$

Из рис. 1, 2 видно, что зависимости изменения амплитуды колебаний угла отклонения от времени в случае аналитического и численного решений практически совпадают. Значит, аналитические решения (10) и (12) также применимы для больших значений начального угла θ_0 .

Время ориентирования необходимо знать, чтобы ориентационный процесс происходил в течение заданного периода. В частности, при электрофоретическом осаждении [7–10], частицы должны успеть сориентироваться перпендикулярно подложке за период, меньший, чем время, требуемое для осаждения частиц на подложку.

Экспериментальное наблюдение ориентации углеродных волокон

Для проверки теоретических результатов был проведен эксперимент. Два постоянных магнита были помещены в специальный держатель. Напряженность создаваемого магнитного поля равнялась $H \approx 210$ Э. Стекланная ячейка с терпинеолом ($\eta = 2 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\rho = 936$ кг/м³, $\mu^{(e)} = 0,99999915$) и углеродными волокнами ($R = 5$ мкм, $L = 40$ мкм, $\rho_{ц} = 2,2 \cdot 10^3$ кг/м³, $\mu_{xx}^{(i)} = 0,99999912$, $\mu_{yy}^{(i)} = 0,9999538$) устанавливалась в держатель между двумя магнитами. Значения магнитных про-

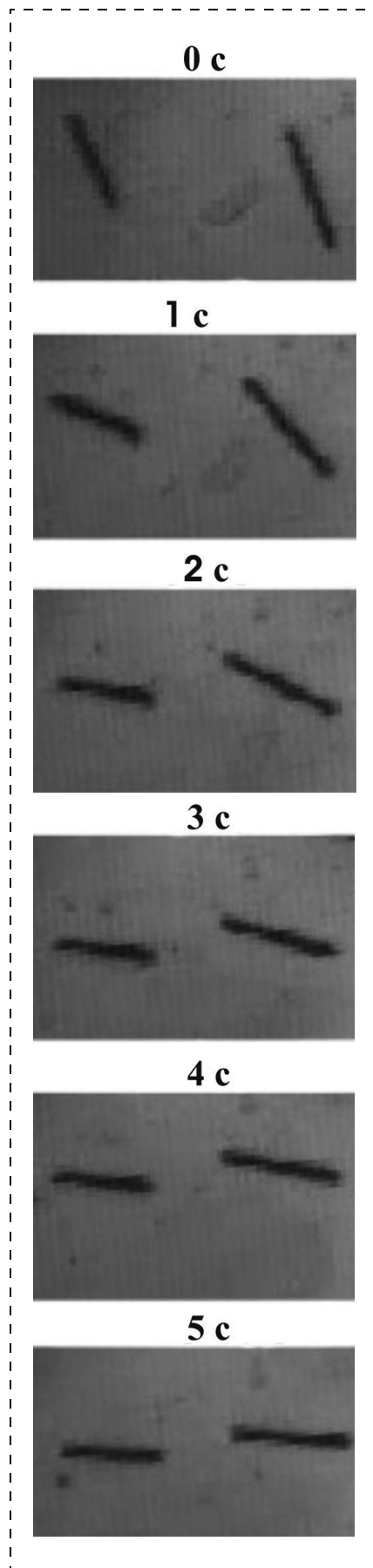


Рис. 3. Стадии ориентации углеродных волокон в терпинеоле

ницаемостей $\mu^{(e)}$ и $\mu_{jj}^{(i)}$ были вычислены по данным соответствующих магнитных восприимчивостей веществ, взятых из справочника [11].

Механическим способом частицы дезориентировались в ячейке. Затем держатель помещался под оптический микроскоп, что позволяло наблюдать движение углеродных частиц. При заданных параметрах, в соответствии с формулой (8), напряженность критического поля равна $H_{кр} \approx 15 \cdot 10^4$ Э. Так как $H_{кр} \gg H$, то ориентация волокон будет происходить аperiodически и время прихода к равновесию, вычисленное по формуле (13), равно $\tau_{теор} \approx 6,3$ с. Значение $(k_1 - k_2) > 0$, т. е. волокна должны ориентироваться вдоль магнитного поля. Следует отметить, что при заданных экспериментальных параметрах условие (6) выполняется, когда $\omega \ll 2671$ рад/с. Теоретическое максимальное значение ω , вычисленное путем дифференцирования уравнений (10) и (12), равно $\sim 0,27$ рад/с. Таким образом, условие (6) выполняется при заданных параметрах задачи.

На рис. 3 показаны стадии процесса ориентации волокон. Конечная картина через $\tau_{эксп} \approx 5$ с представлена на рис. 4. В согласии с теоретическими расчетами наблюдались аperiodические колебания и все частицы ориентировались вдоль магнитного поля. Важно отметить, что экспериментальное время прихода к равновесию меньше, чем время, вычисленное теоретически, $\tau_{эксп} < \tau_{теор}$.

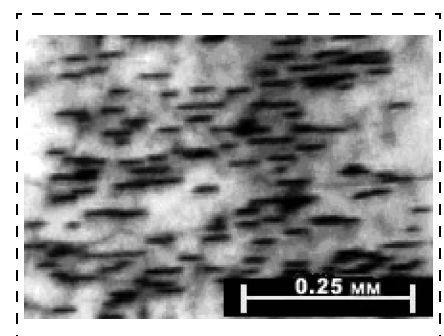


Рис. 4. Установившееся положение углеродных волокон через 5 с после дезориентации

Значит, в процессе электрофоретического осаждения за время $\tau_{\text{теор}}$ частицы успеют сориентироваться вдоль магнитного поля.

Эмиссионные испытания

Описанный выше метод ориентации частиц был применен при изготовлении автоэмиссионных катодов. Автоэмиссионные катоды изготавливались электрофоретическим осаждением [9]. Магнитное поле было приложено параллельно электрическому полю в электрофоретической ячейке. В этом случае осажденные частицы должны ориентироваться перпендикулярно к поверхности подложки. Для определения влияния магнитного поля на эмиссионные характеристики катодов были приготовлены катоды в присутствии и в отсутствие магнитного поля. Эмиссионные испытания проводились в следующей диодной конструкции. Анод — стеклянная пластина с проводящим слоем ИТО и нанесенным на него люминофором. Расстояние анод—катод устанавливалось равным 200 мкм с помощью стеклянных спейсеров. Эксперимент проводился в вакуумной камере при давлении порядка 10^{-6} Тор ($133,3 \cdot 10^{-6}$ Па).

На рис. 5 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) для двух типов катодов. Более высокое значение тока соответствует катоду, приготовленному в присутствии магнитного поля. Эмиссионный ток данного като-

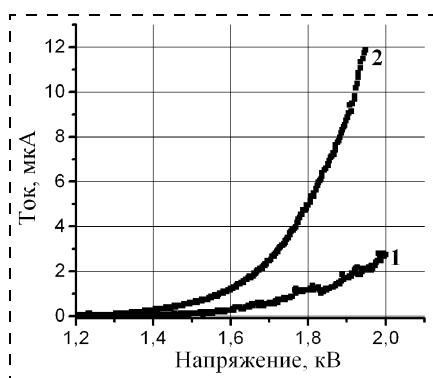


Рис. 5. ВАХ катодов, приготовленных: 1 — в отсутствие магнитного поля; 2 — в присутствии магнитного поля

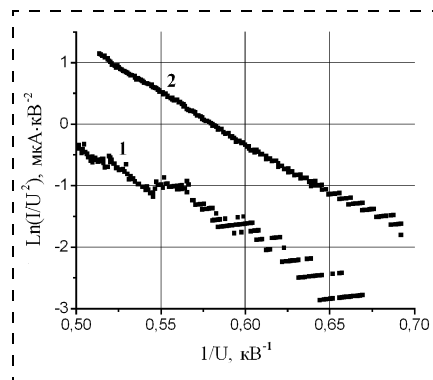


Рис. 6. ВАХ, построенные в координатах Фаулера—Нордгейма:

1 — в отсутствие магнитного поля; 2 — в присутствии магнитного поля

да в 5 раз больше, чем ток катода, приготовленного в отсутствие магнитного поля при одинаковых рабочих напряжениях (рис. 5). Так как угол наклона кривых, построенных в координатах Фаулера—Нордгейма, одинаковый, то данная разница не может быть обусловлена изменением геометрических размеров эмиссионных центров или работой выхода (рис. 6). Вероятнее всего, это связано с увеличением числа эмиссионных центров. Поэтому логично считать, что увеличение эмиссионных центров произошло за счет ориентации углеродных частиц под действием магнитного поля во время электрофоретического осаждения.

Заключение

Получено и исследовано решение уравнения движения частиц цилиндрической формы, соответствующих отрезкам углеродных волокон, помещенных в вязкую среду, в присутствии постоянного магнитного поля. Уравнение движения решено численным и математическим методами. Получены формулы для вычисления времени прихода к равновесию частиц в зависимости от значения коэффициента вязкости среды, напряженности магнитного поля, геометрических размеров частиц и их магнитных проницаемостей.

Были проведены сравнительные измерения параметров катодов, изготовленных методом электрофоретического осаждения углеродных волокон при наличии и в отсутствие магнитного поля. Показано, что с помощью данного метода ориентирования частиц ток катода увеличивается в 5 раз по сравнению с катодом, изготовленным без магнитного поля, при одинаковых рабочих напряжениях. Показано, что увеличение тока связано с увеличением эммитирующей площади катода. Таким образом, данный метод эффективен и прост в реализации для изготовления автоэмиссионных катодов из углеродных волокон способом электрофоретического осаждения.

Список литературы

1. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов М.: МФТИ, 2001.
2. Sheshin E. P., Baturin A. S., Nikolskiy K. N., Tchesov R. G., Sharov V. B. Field emission cathodes based on milled carbon fibers // The International vacuum electronic source conference (IVESC). 2004. P. 114—116.
3. Sheshin E. P. Field emission of carbon fiber // Ultramicroscopy. 1999. V. 79. P. 101—108.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 621 с.
5. Губанов А. Оптические явления, связанные с ориентацией продолговатых частиц в потоке жидкости // Успехи физических наук. 1939. Т. XXII. Вып. I.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. М.: Наука, 1988. 215 с.
7. Nakayama Y., Akita S. Field-Emission with Carbon Nanotubes for a Flat Panel Display // Synthetic Metals. 2001. V. 117. P. 207—231.
8. Haifeng Zhao, Hang Song, Zhiming Li, Guang Yuan, Yixin Jin. Patterned deposition and field emission properties of carbon nanotubes by electrophoresis // Elsevier applied surface science 251. 2005. P. 242—244.
9. Батурин А. С., Курносков Д. А., Никольский К. Н., Шешин Е. П., Чесов Р. Г. Способ изготовления автоэмиссионного катода // Патент RU 2225052 С1 7Н01J1/14, 2004.
10. Духин С. С., Дерягин Б. В. Электрофорез. М.: Наука, 1976 328 с.
11. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.372.54

В. М. Макаров, канд. техн. наук.,
П. Г. Иванов, канд. техн. наук., **В. Г. Зая**,
Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

Разработаны модели расчета характеристик кольцевых фильтров на ПАВ с реверсивными и U-образными многополосковыми ответвителями, основанные на методе эквивалентных схем. Адекватность моделей подтверждена экспериментальными исследованиями кольцевых фильтров на различных пьезоэлектрических подложках.

Введение

В настоящее время в приемопередающих каскадах систем мобильной связи широко используются фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с малыми вносимыми потерями (до 5 дБ). Требования по заполосному подавлению сигнала и уровню пульсаций в полосе таких фильтров становятся все более жесткими. На сегодняшний день существуют несколько видов конструкций устройств такого класса: это резонаторные, импедансные и кольцевые фильтры.

Структуры резонаторных и импедансных фильтров [1, 2] в настоящее время широко применяются для обработки сигналов на высоких частотах (более 100 МГц). Кольцевые фильтры также имеют удовлетворительные характеристики, однако являются менее изученными. В литературе отсутствует описание расчетных моделей таких конструкций.

Особенностью кольцевых структур является то, что они, в отличие от резонаторных и импедансных конструкций, работают в режиме бегущей волны. Их свойства слабо зависят от толщины электродного покрытия. Это обстоятельство дает таким фильтрам преимущество при использовании на малых частотах (до 150 МГц), так как им не требуется большая (более 2 мкм) толщина пленочного покрытия.

Настоящая статья посвящена моделированию кольцевых ПАВ фильтров различных типов.

Существуют две основные модификации кольцевых фильтров: фильтры с реверсивными много-

полосковыми ответвителями (МПО) [3, 4] и фильтры с U-образными МПО [5].

В кольцевом фильтре, структура которого показана на рис. 1, взаимосвязь между входным и выходным преобразователями осуществляется через так называемые реверсивные ответвители. Задача этого устройства — передать энергию ПАВ из верхнего канала в нижний. Волны, излученные входным ВШП и преобразованные в ответвителях, попадают с двух сторон на выходной ВШП, распространяясь, таким образом, по кольцевой траектории.

Кольцевой фильтр с U-образными ответвителями (рис. 2) обычно состоит из двух звеньев, электрически соединенных между собой последовательно для увеличения уровня заполосного подавления сигнала и компенсации сигналов тройного прохождения. U-образные ответвители в этом случае

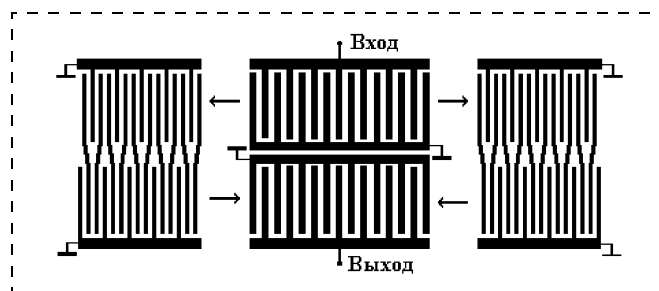


Рис. 1. Кольцевой фильтр с реверсивными ответвителями

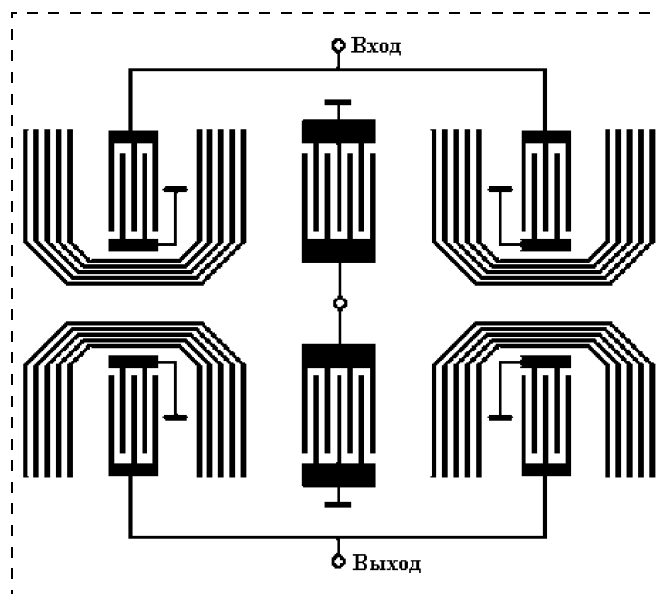


Рис. 2. Двухзвенный кольцевой фильтр с U-образными ответвителями

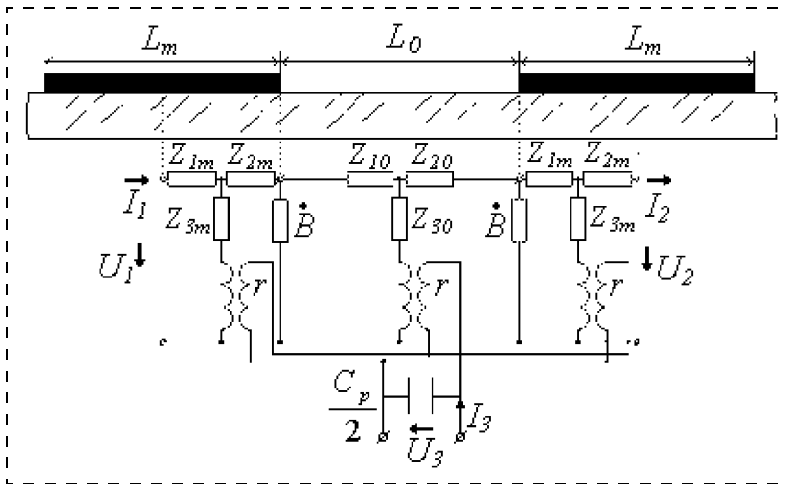


Рис. 3. Эквивалентная схема элементарного участка встречно-штыревой структуры

обеспечивают однонаправленность боковых преобразователей, тем самым снижая вносимые потери устройства.

Моделирование

В настоящей работе моделирование структурных элементов кольцевых фильтров базируется на методе эквивалентных схем Мэсона [6]. Элементарная ячейка встречно-штыревой структуры представляется в виде эквивалентной схемы — шестиполосника с одним электрическим и двумя акустическими выводами (рис. 3).

Токи и напряжения этой схемы связываются матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ U_1 \\ I_3 \end{pmatrix} = (A_{ij}) \begin{pmatrix} I_2 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где A_{ij} — элементы матрицы $A(3 \times 3)$, которые зависят от параметров подложки, свойств пленки и соотношения штырь/зазор встречно-штыревой структуры. Таким образом, элементарная секция ВШП может быть описана матрицей 3×3 . Каждая следующая ячейка соединяется с предыдущей последовательно по акустическим входам и парал-

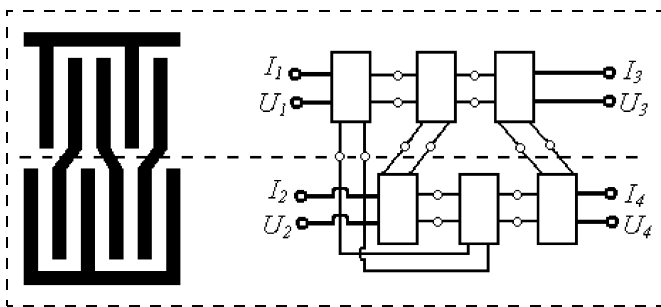


Рис. 4. Моделирование элементарной ячейки реверсивного МПО

льно по электрическим входам. Следовательно, матрица всего преобразователя может быть получена путем последовательного каскадирования матриц элементарных ячеек с учетом уравнений связи для данной системы.

При моделировании кольцевых фильтров с реверсивными МПО наибольшую сложность представляет ответвитель. Для адекватного анализа его характеристики был предложен следующий алгоритм (рис. 4).

В качестве базовой ячейки МПО выбирается фрагмент, соответствующий длине волны ПАВ на центральной частоте. Условно разделив МПО по апертуре на две равные части и соединив элементы из верхнего и нижнего рядов соответствующим образом для обеспечения изменения направления ПАВ, можно получить эквивалентную схему ячейки. Как показано на рис. 4, она представляет собой совокупность электрически связанных друг с другом шестиполосников, которые образуют акустический восьмиполосник.

Полученный восьмиполосник элементарной ячейки описывается матрицей B_{ij} размерностью 4×4 . Как и в случае с ВШП, последовательно соединив элементарные ячейки между собой с учетом уравнений связи, получаем восьмиполосник всего МПО, также описываемый матрицей C_{ij} (4×4), элементы которой зависят от элементов матрицы B_{ij} :

Полученный восьмиполосник элементарной ячейки описывается матрицей B_{ij} размерностью 4×4 . Как и в случае с ВШП, последовательно соединив элементарные ячейки между собой с учетом уравнений связи, получаем восьмиполосник всего МПО, также описываемый матрицей C_{ij} (4×4), элементы которой зависят от элементов матрицы B_{ij} :

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ U_1 \\ I_2 \\ U_2 \end{pmatrix} = (B_{ij}) \begin{pmatrix} I_3 \\ U_3 \\ I_4 \\ U_4 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Для расчета характеристик фильтра по методу эквивалентных схем необходимо получить матрицу проводимости, которая связывает входные токи и напряжения устройства:

$$\begin{pmatrix} I_{\text{вх}} \\ I_{\text{вых}} \end{pmatrix} = (G_{ij}) \begin{pmatrix} U_{\text{вх}} \\ U_{\text{вых}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Поскольку фильтр является электрическим четырехполосником (рис. 5), то он может быть описан матрицей G (2×2).

На схеме фильтра показаны четыре шестиполосника (S_1, S_2, S_3 и S_4) с закороченным электрическим выходом. Таким образом моделируется свободное пространство между элементами фильтра. По сути, этот элемент конструкции является акустическим четырехполосником, однако в рамках нашей модели он описывается матрицей 3×3 , в которой все коэффициенты последней строки и последнего столбца равны нулю. Это делается для

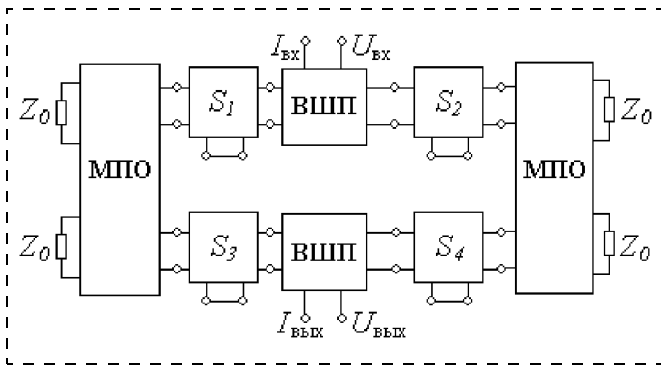


Рис. 5. Эквивалентная схема кольцевого ПАВ фильтра с реверсивными ответвителями

того, чтобы упростить дальнейшее каскадирование матриц.

Также на рис. 5 Z_0 — характеристическое сопротивление пьезоэлектрической среды, которая находится за ответвителями у края подложки. На этом сопротивлении демпфером поглощается остаточная часть энергии ПАВ, которая проходит через МПО без преобразования.

Как видно из рис. 5, при таком включении реверсивный ответвитель из акустического восьмиполосника превращается в акустический четырехполосник и, следовательно, может быть описан матрицей 2×2 . Элементы этой матрицы получаются из элементов матрицы C_{ij} с учетом граничных условий. Таким образом, мы имеем две матрицы ответвителей 2×2 и две матрицы преобразователей 3×3 . Приняв во внимание уравнения связи системы из элементов этих матриц, получаем искомую матрицу проводимости G_{ij} , которая позволяет рассчитывать характеристики фильтра в заданном электрическом тракте.

При моделировании кольцевых фильтров с U-образными ответвителями применяется та же методика, что и для устройств с реверсивным МПО.

Разработка модели U-образного ответвителя основана на использовании модели прямого МПО. Если условно разделить ответвитель пополам (рис. 6), то верхняя и нижняя его части будут представлять собой коллинеарные участки встречно-штыревой структуры, соединенные между собой. Эквивалентной схемой базовой ячейки такого ответвителя будут два шестиполосника, связанные по электрическим входам. Структура МПО в целом так же, как и в случае с реверсивным ответвителем является

акустическим восьмиполосником и описывается матрицей 4×4 .

Как видно из рис. 6 U-образный МПО может быть получен из прямого, если нижняя часть условно разделенного пополам ответвителя "изгибается" и, смещаясь влево, становится вровень с верхней.

После такого преобразования в матричном уравнении, описывающем восьмиполосник, меняются знаки токов I_2 и I_4 . Кроме того, изменяется набор зависимых и независимых переменных: в прямом МПО I_3, U_3, I_4 и U_4 были независимыми переменными, а I_1, U_1, I_2 и U_2 — зависимыми, в то время как в U-образном независимые — I_3, U_3, I_2 и U_2 , а зависимые — I_1, U_1, I_4 и U_4 :

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ U_1 \\ I_4 \\ U_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_3 \\ U_3 \\ I_2 \\ U_2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Все элементы матрицы (D_{ij}) U-образного МПО могут быть получены путем математических преобразований из элементов матрицы прямого ответвителя.

На рис. 7 показана эквивалентная схема коль-

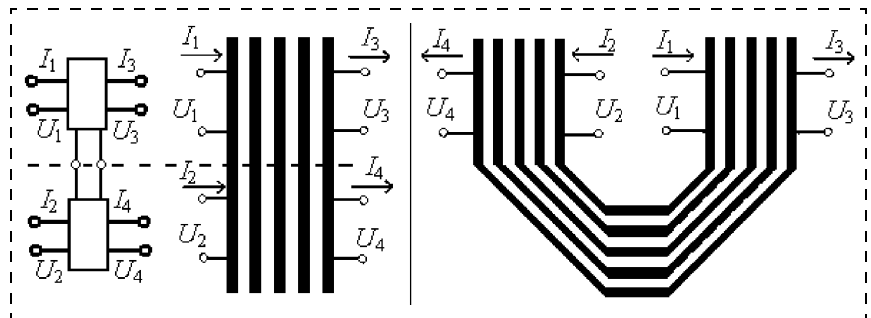


Рис. 6. Условное разделение прямого МПО пополам для получения эквивалентной схемы U-образного ответвителя

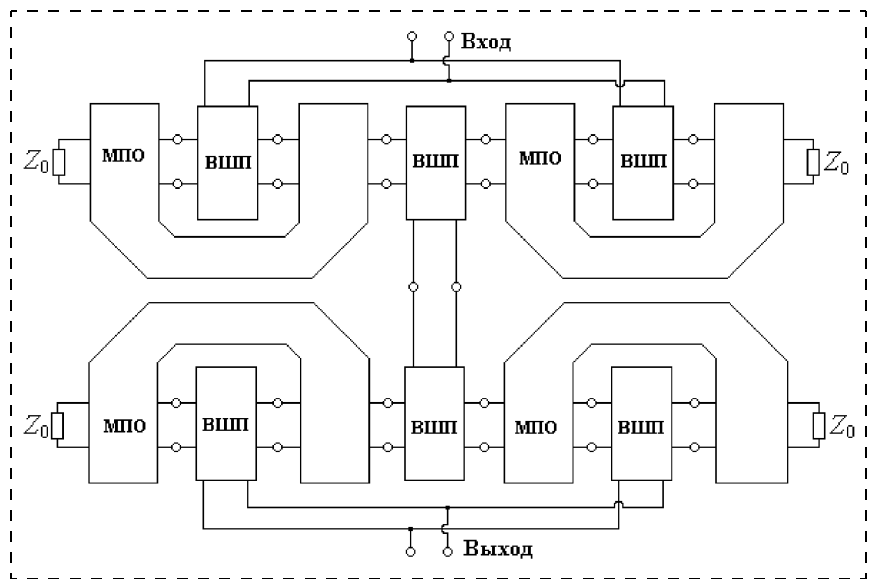


Рис. 7. Эквивалентная схема кольцевого фильтра с U-образным МПО

цевого двухкаскадного фильтра с U-образным ответвителем.

Из рис. 7 видно, что эквивалентная схема секции "ответвитель + ВШП" это не что иное, как шестиполосник ВШП, соединенный по акустическим входам с восьмиполосником МПО. Такой комбинированный элемент сам по себе является шестиполосником и, следовательно, описывается матрицей 3×3 . Матрица шестиполосника-преобразователя была получена с помощью каскадирования элементарных ячеек (см. рис. 3). Коммутация преобразователя и МПО осуществляется посредством матриц свободного пространства.

Если записать уравнения связи этой системы, то можно путем преобразований, используя элементы матриц ВШП 3×3 и МПО 4×4 , вывести значения элементов матрицы секции "ответвитель + ВШП".

Таким образом, каждое звено фильтра состоит из трех шестиполосников (двух ВШП, окруженных U-образными ответвителями и одного центрального ВШП), которые могут быть последовательно свернуты в один по законам каскадирования с добавлением матриц свободной поверхности, подобно тому, как сворачиваются две элементарные секции встречно-штыревой структуры. Точно так же, как и в случае фильтра с реверсивным МПО, боковые выводы структуры соединяются через характеристическое сопротивление среды Z_0 . Таким образом, двухзвенный кольцевой фильтр с U-образными ответвителями становится электрическим четырехполосником и описывается матрицей \mathbf{G} из соотношения (3), используя элементы которой можно рассчитать его характеристики.

На основе разработанных моделей было создано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать характеристики кольцевых фильтров по заданным топологическим параметрам, параметрам пьезокристаллической подложки и пленочного покрытия с учетом эффектов второго порядка

(отражений от электродов, потерь на распространение, накопления энергии и т. д.).

Анализ расчетных характеристик кольцевых структур показал, что полоса пропускания фильтра с реверсивными МПО в основном определяется свойствами МПО, в то время как для конструкций с U-образными МПО ее значение определяется параметрами преобразователей. Кроме того, было установлено, что структуры с реверсивными ответвителями имеют более узкие полосы пропускания по сравнению с устройствами с U-образными МПО.

Результаты эксперимента

С помощью описанных моделей был проведен расчет двух кольцевых фильтров, затем устройства были изготовлены и измерены их экспериментальные характеристики. Экспериментальные и расчетные характеристики кольцевых фильтров с реверсивными и U-образными МПО представлены на рис. 8, а, б.

Фильтр с реверсивными МПО был изготовлен на подложке УХ-128° ниобата лития на частоту 142 МГц. Полоса пропускания фильтра составила 2,3 МГц по уровню 1 дБ, а вносимые потери — 1,4 дБ. Размеры кристалла составляют $3,7 \times 3,5$ мм.

Фильтр с U-образными МПО изготовлен на подложке УХ-36° танталата лития на частоту 233 МГц. Его полоса пропускания по уровню 1 дБ и вносимые потери составили 5,0 МГц и 4,5 дБ соответственно. Размеры кристалла устройства — $4,6 \times 2,7$ мм.

Различия в уровне лепестков справа в полосе заграждения фильтра с U-образными МПО связаны с паразитным влиянием объемных волн, которое может быть уменьшено рифлением обратной стороны подложки. Сравнение экспериментальных и расчетных характеристик свидетельствует о хорошей корреляции результатов, что подтверждает адекватность разработанных моделей.

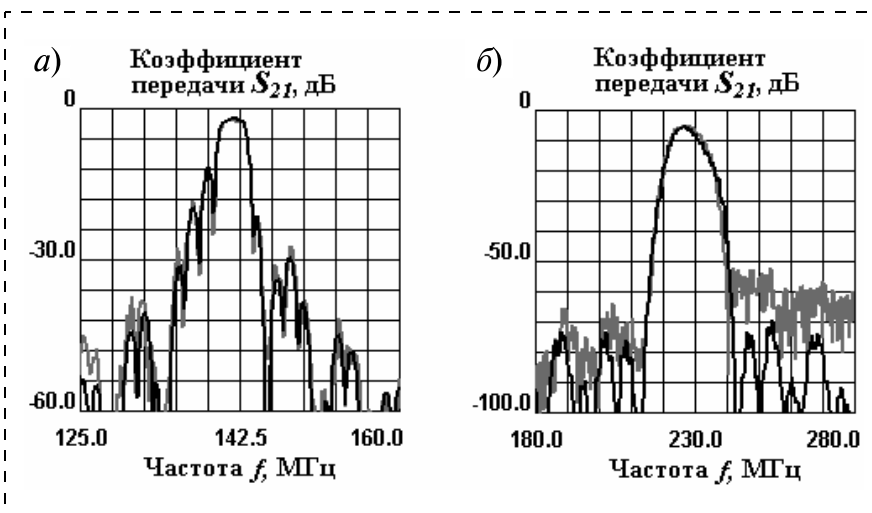


Рис. 8. Экспериментальная (серая линия) и расчетная (черная линия) характеристики кольцевого фильтра с реверсивными МПО (а) и кольцевого фильтра с U-образными МПО (б)

В работе рассмотрены принципы моделирования кольцевых фильтров на ПАВ с реверсивными и U-образными ответвителями по методу эквивалентных схем Мэсона. Были разработаны модели расчета характеристик устройств этого класса. Корректность работы моделей подтверждена экспериментальными исследованиями двух кольцевых ПАВ фильтров на различных срезах ниобата и танталата лития. Разработанные модели в значительной степени облегчают процесс проектирования устройств по заданным техническим требованиям на различных пьезоэлектрических подложках.

Список литературы

1. Kawachi O., Mitobe S., Tajima M., Yamaji T., Inoue S., Hashimoto K. A Low-Loss and Wide-Band DMS filter using Pitch-Modulated IDT and Reflector Structures // IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings. 2004. P. 298–301.
2. Wang S., Chen I., Chung M., Tai C., Choi C. Investigation of RF Ladder Type SAW filters Incorporating Packaging Effects // IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings. 2005. P. 2178–2181.

3. Reindl L. Track-Changing Structures on YZ-LiNbO₃ // IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings. 1997. P. 414–419.
4. Doberstein S., Malyukhov V. Comparative Performances of 460 MHz Low-Loss SAW Ring And Dual-Track Impedance Connected Filters // IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings. 1995. P. 81–84.
5. Doberstein S., Nikolaenko K., Evdokimov M., Razgonyaev V. A Wide-Range Tunable/Switchable Low-Loss SAW Filter // IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings. 2000. P. 87–90.
6. Мэзон У. Физическая акустика. Т. 1. М.: Мир, 1966. 592 с.

КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ

УДК 621.382.3

А. Г. Мустафаев, канд. техн. наук,
ГОУ ВПО "Дагестанский государственный
технический университет"

КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КНИ-МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Рассмотрены эффекты, возникающие в КНИ-МОП-транзисторах при масштабировании (DIBL, уменьшение порогового напряжения, увеличение тока утечки в закрытом состоянии и др.). Показаны конструктивные и технологические способы устранения этих эффектов.

В рамках КМОП-технологии на объемном кремнии физические (квантовые эффекты), а также технологические ограничения (рассеиваемая мощность, туннельные токи) могут существенно замедлить развитие микроэлектроники.

Структуры кремний-на-изоляторе (КНИ), изначально предназначенные для изготовления радиационно-стойких приборов, в настоящее время получили широкое распространение. Технология КНИ имеет много преимуществ перед технологией объемного кремния, в частности, быстродействие, меньшая рассеиваемая мощность, высокая радиационная стойкость, малый эффект короткого канала, небольшие паразитные емкости, высокая крутизна подпорогового напряжения и технологическая совместимость с процессами объемного кремния. Переход от технологии объемного кремния к технологии КНИ позволяет устранить проблемы, обусловленные нежелательными эффектами, возникающими при масштабировании.

Целью настоящей статьи является обзор конструктивных и технологических решений, направленных на улучшение характеристик КНИ-МОП-транзисторов.

Транзисторы этого класса можно разделить на два типа — с полностью и частично обедненной базой. Устранение эффекта короткого канала и регулировка порогового напряжения в таких структурах не требуют формирования сильнолегированного канала [1]. В транзисторах первого типа (рис. 1) тонкая пленка кремния полностью обеднена подвижными носителями заряда при всех значениях смещения. Основным недостатком КНИ-структур с частичным обеднением (рис. 2) является эффект плавающей базы.

К короткоканальным эффектам относят: смыкание областей сток-исток, понижение потенциального барьера на истоке индуцированного проникновением поля стока (*drain induced barrier lowering — DIBL*), увеличение тока транзистора в выключенном состоянии, уменьшение порогового напряжения. Основная причина возникновения короткоканальных эффектов связана с тем, что при уменьшении длины канала затвор контролирует меньший заряд в подложке и область обеднения стока проникает в канал [1]. Однако их нельзя

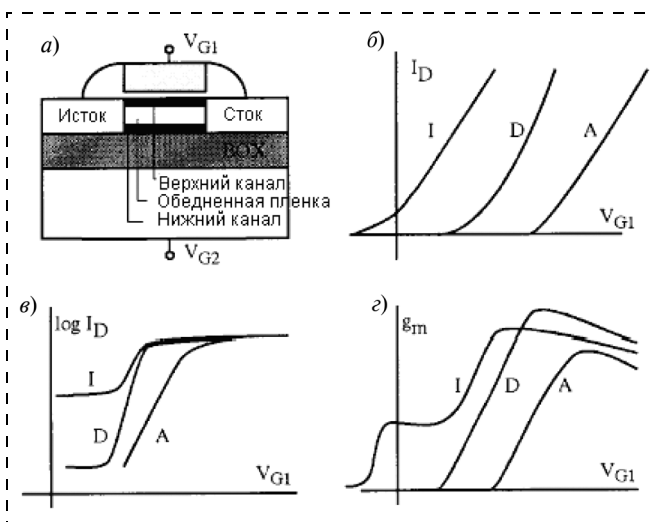


Рис. 1. Конструкция и характеристики полностью обедненного КНИ-МОП-транзистора (*I* — режим инверсии; *D* — режим обеднения; *A* — режим аккумуляции)

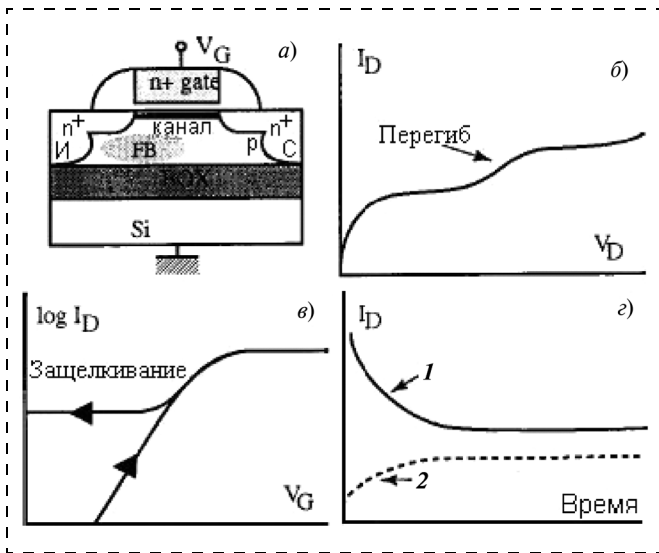


Рис. 2. Конструкция частично обедненного КНИ-МОП-транзистора и типичные эффекты, обусловленные плавающей базой: 1 — уровень сигнала выше уровня питания; 2 — уровень сигнала ниже уровня земли

устранить путем простого повышения концентрации легирующей примеси в подложке, поскольку при этом растет подпороговый ток и уменьшается подвижность носителей в канале, вызывающая деградацию нагрузочной способности транзистора. Наиболее распространенным решением этой проблемы является реализация так называемого обратного эффекта короткого канала, когда с уменьшением длины канала пороговое напряжение возрастает. Этого можно достичь применением ореола (*halo*) вокруг областей истока и стока (рис. 3). Для этого после изготовления глубоких областей стока и истока проводится отжиг с быстрым подъемом и спадом температуры. Затем области *halo* сужаются путем ионной имплантации под углом к ним.

Схематическое изображение DIBL-эффекта, вследствие бокового проникновения электриче-

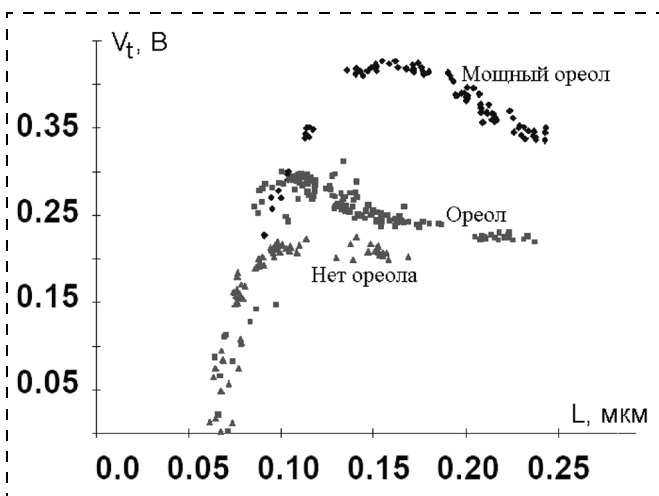


Рис. 3. Зависимость порогового напряжения от длины канала при наличии *halo*-области и без нее

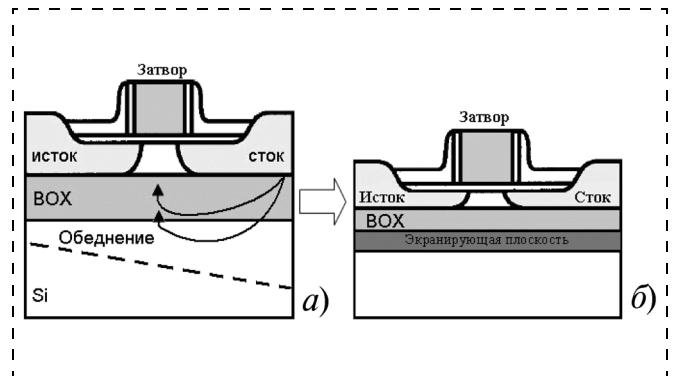


Рис. 4. Схема проникновения поля стока в базу через слой BOX и подложку (DIBL-эффект) (а); оптимизированная МОП-структура с использованием экранирующей плоскости (б)

ского поля в скрытый слой BOX (*buried oxide*) и подложку, показано на рис. 4, а [2, 3].

Одним из интересных проявлений эффекта короткого канала в КНИ-транзисторе является трансформация частично обедненного транзистора в полностью обедненный. Боковые обедненные области, обусловленные стоком и истоком, не только покрывают большую часть базы, но также уменьшают эффективную концентрацию примеси в базе, таким образом, вызывая полное обеднение, управляемое затвором.

Принципы масштабирования объемных МОП-транзисторов требуют уменьшения глубины переходов и увеличения степени легирования, что неблагоприятно сказывается на емкости перехода и подвижности носителей [4]. Трудности, связанные с легированием, возможно приостановят масштабирование объемных кремниевых или частично обедненных КНИ-МОП-транзисторов при размерах затвора 35...50 нм [5]. При этом необходимо отметить, что правила масштабирования и конструкторские ограничения позволяют работать в этом направлении с полностью обогащенными КНИ-МОП-транзисторами. Вследствие наличия у них дополнительных регулируемых параметров (толщина пленки и слоя BOX, легирование подложки, смещение) возможна оптимизация прибора [1].

Минимальная длина канала предполагается равной $L \approx 3\lambda$, где λ — это длина канала, при которой сохраняется длинноканальный характер транзистора, и вычисляется решением уравнения Пуассона. Различные авторы предлагают несколько выражений [6, 7]:

$$\lambda = \left[0,5 \left(\frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_{Ox}} \right) d_{Si} d_{Ox} \right]^{0,5} \quad \text{или}$$

$$\lambda = \left[d_{Si} + \left(\frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_{Ox}} \right) d_{Ox} \right] / \pi,$$

которые показывают, что необходимая длина стремительно уменьшается при использовании ультра-

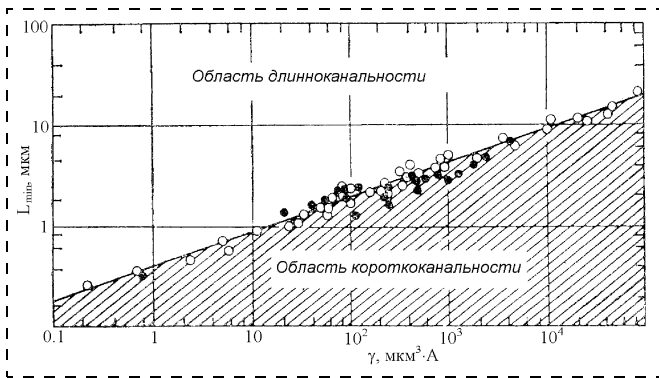


Рис. 5. Зависимость минимальной длинноканальной длины от параметра γ [8]

тонких кремниевых пленок, тогда как влияние легирования становится несущественным.

Результаты большого числа измерений, выполненных в МОП-транзисторах, параметры которых варьировались в широких пределах, обобщаются следующим эмпирическим соотношением [8] (рис. 5):

$$L_{\min} = 0,4[r_i d(W_s + W_d)^2]^{1/3} = 0,4\gamma^{1/3},$$

где L_{\min} — минимальная длина канала, при которой подпороговый участок сохраняет длинноканальный характер; r_i — глубина переходов; d — толщина слоя оксида; W_s и W_d — толщины обедненных слоев стока и истока, вычисленные в приближении резкого p - n -перехода.

На рис. 6, а показано, что короткоканальные эффекты, такие как смыкание (*charge sharing, CSE*) и DIBL быстро сводятся к нулю при уменьшении толщины пленки и увеличении легирования. Фактически ниже некоторой критической толщины пленки легирование не нужно вообще. Это очень выгодно в смысле большей подвижности носителей,

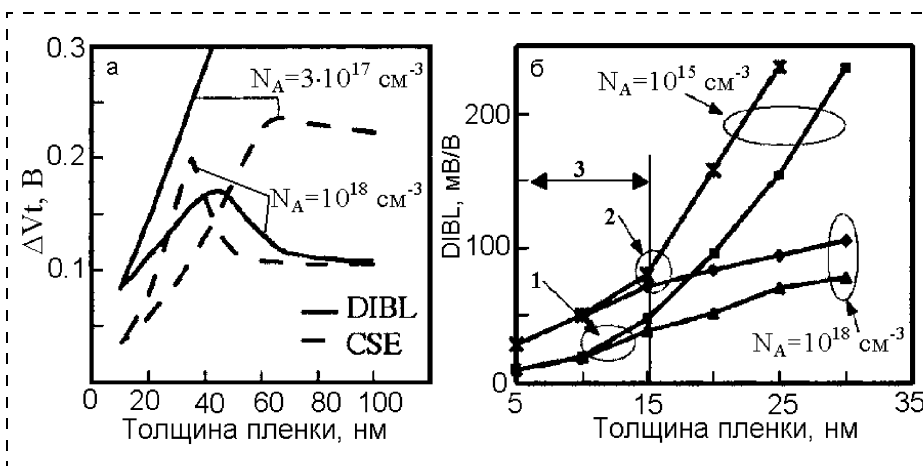


Рис. 6. Изменение порогового напряжения при DIBL- и CSE-эффектах от толщины пленки кремния (а); зависимость DIBL-эффекта от толщины пленки кремния (б) [3]:

1 — транзистор с экранирующей плоскостью; 2 — обычный КНИ-транзистор; 3 — область, нечувствительная к степени легирования

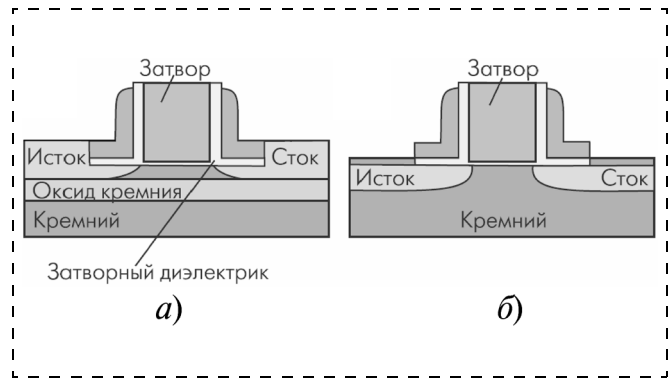


Рис. 7. Структура TeraHertz-транзистора (а). Для сравнения показан объемный МОП-транзистор (б)

но подразумевает использование металлических затворов для контроля порогового напряжения.

Экранирующая плоскость (*ground plane*), расположенная под BOX (рис. 4, б), подавляет проникновение поля и обеднение областей в подложке. На рис. 6, б показано, что эффект DIBL значительно улучшен с использованием экранирующей плоскости. Экранирующая плоскость может быть получена ионной имплантацией под слой BOX или сращиванием двух пластин, одна из которых имеет высоколегированный поверхностный слой или металлическую пленку.

Ожидается, что полностью обедненные МОП-транзисторы достигнут предела при длине затвора 20 нм и толщине базы 5 нм [5]. Для разрешения проблемы последовательного сопротивления в ультратонких пленках необходимо приподнять области стока и истока. Такая структура легла в основу созданного Intel TeraHertz-транзистора, частота переключения которого по оценкам разработчиков сможет достичь 1 ТГц [9]. Чтобы снизить (на 30 %) паразитное сопротивление, присущее приборам с тонкой подложкой, и способствовать лучшему формированию контактов из силицида кремния, области истока/стока приподняты

(рис. 7). Наличие слоя оксида под всей структурой транзистора привело к снижению тока утечки канала на два порядка. Кроме того, замена диоксида кремния в структуре затвора диэлектриком с высокой диэлектрической проницаемостью позволила снизить ток утечки через затворный диэлектрик более чем на четыре порядка. Для TeraHertz-транзисторов характерны также низкая емкость перехода, стойкость к воздействию излучения и отсутствие эффекта плавающей подложки.

В работе [10] показано, что

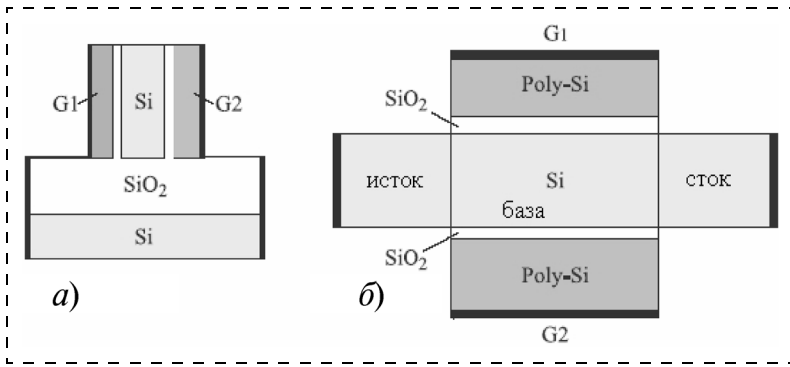


Рис. 8. Схематическое изображение КНИ-МОП-транзистора с двойным затвором:

a — сечение; *б* — вид сверху

для подавления короткоканальных эффектов необходим переход от поликремниевых затворов к затворам с работой выхода, близкой к середине запрещенной зоны кремния.

МОП-транзисторы с двойным затвором рассматриваются как серьезная альтернатива обыч-

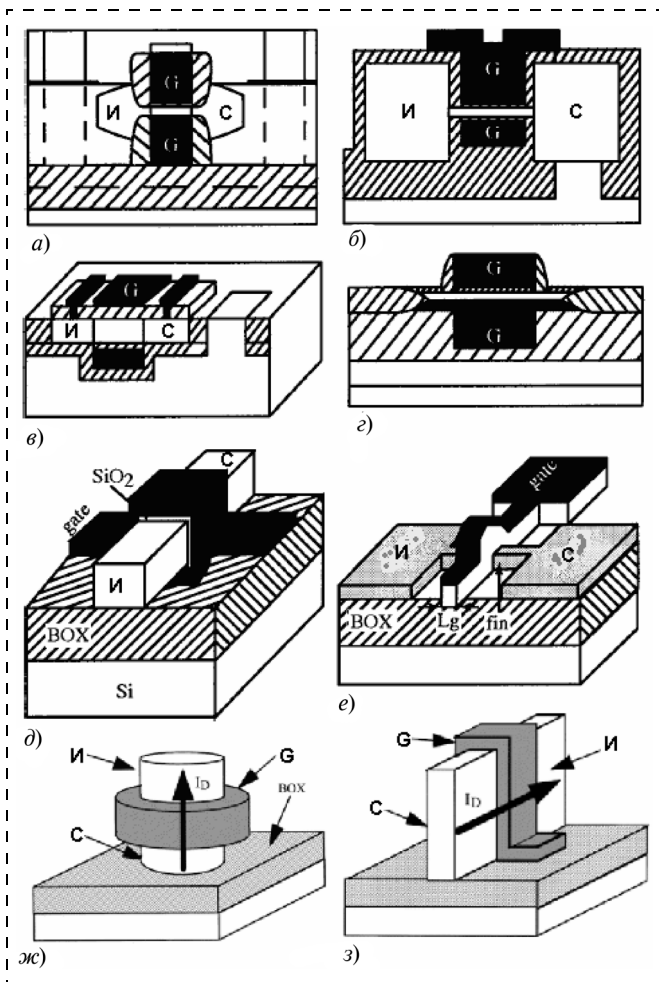


Рис. 9. Конструкции КНИ-МОП-транзисторов:

a — со скрытым SiGe слоем; *б* — с использованием туннельной эпитаксии; *в* — с использованием ELO-технологии; *г* — технология сращивания пластин; *д* — gate-all-around структура; *е* — Fin FET; *ж* — структура с кольцевым затвором; *з* — DELTA/FinFET структура

ным объемным МОП-транзисторам для увеличения интеграции кремниевой технологии в ближайшем будущем. Транзистор с двойным затвором состоит из кремниевой пластины, находящейся между двумя слоями оксида (рис. 8). Металлические или поликремниевые пленочные контакты создаются к каждому слою. Каждая из этих пленок работает как электрод затвора. При этом мы имеем два МОП-транзистора с общей подложкой, стоком и истоком.

КНИ-МОП-транзисторы с двойным затвором более устойчивы к эффекту короткого канала, чем объемные МОП-транзисторы или даже КНИ-МОП-транзисторы в режиме полного обеднения. Кроме

увеличения эффективной площади канала, к преимуществам таких конструкций следует отнести возможность использования слабого легирования базовой области. Разработано много разнообразных конструкций приборов с двойным затвором (рис. 9) [11—21].

Приборы с двойным затвором идеально контролируют потенциал и инверсный заряд, так что короткоканальные эффекты значительно уменьшаются. Образование верхнего и нижнего инверсных каналов приводит к объемной инверсии в тонкой КНИ-пленке (штриховая линия на рис. 10, *a*) [22]. Неосновные носители заряда проходят в середине пленки и испытывают меньшее рассеяние; подвижность, крутизна, управляемость тока улучшаются и снижаются $1/f$ шумы.

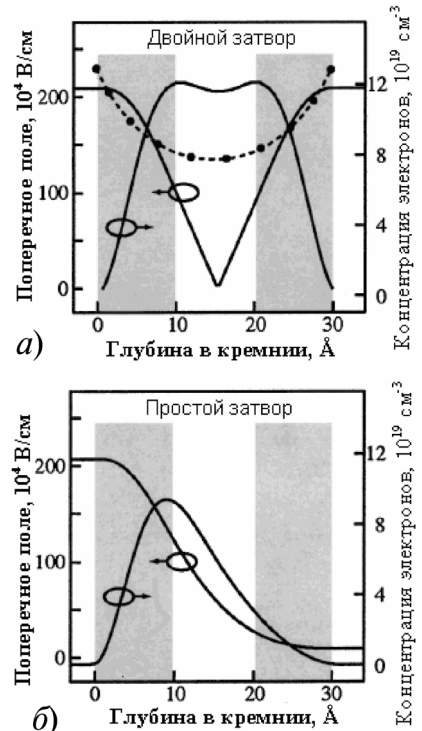


Рис. 10. Сравнение распределения носителей заряда в КНИ-МОП-транзисторе с двойным (*a*) и простым (*б*) затвором [23]

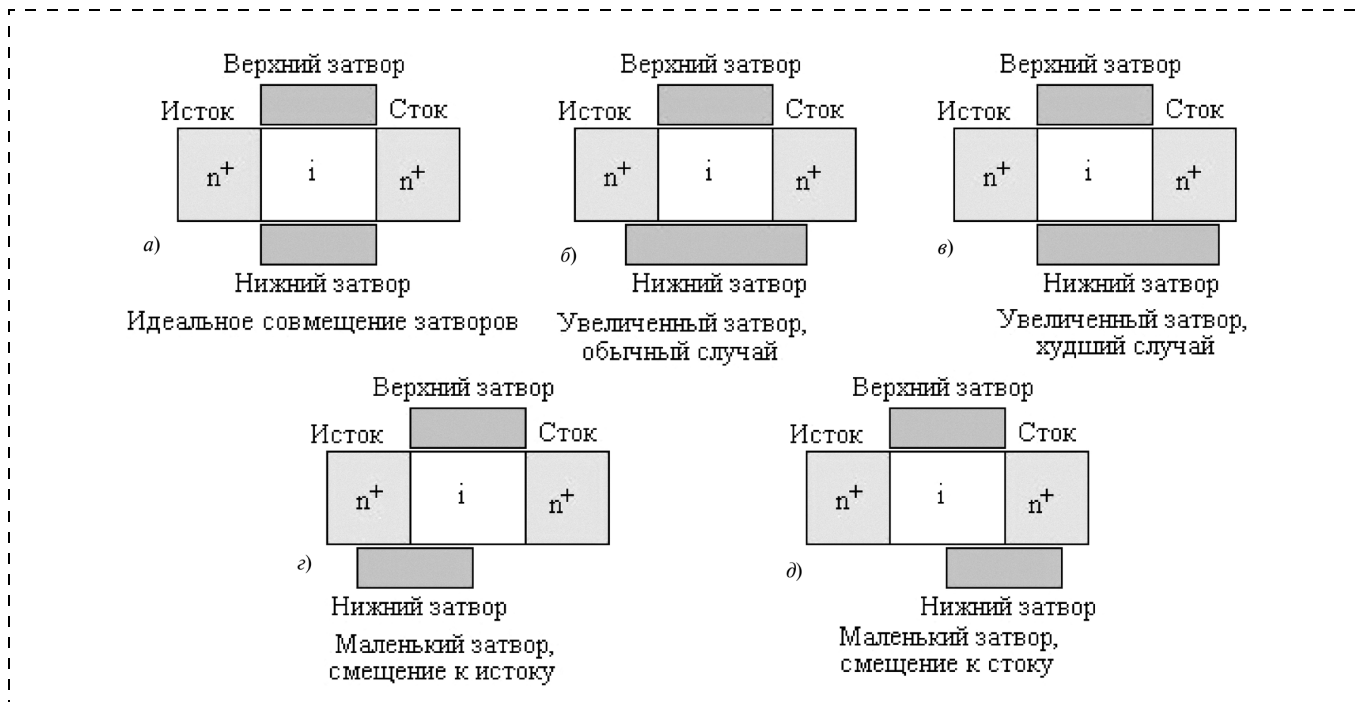


Рис. 11. Варианты рассовмещения затворов

Также стоит вопрос выбора симметричных или асимметричных затворов.

Различные рабочие режимы верхнего и нижнего затворов облегчают корректировку порогового напряжения [24]. Сложность изготовления МОП-транзисторов с двойным затвором, а именно изготовление нижнего затвора и его совмещение с верхним, является серьезным ограничивающим фактором для промышленной технологии. В случае использования технологии изготовления, которая не гарантирует высокую точность совмещения верхнего и нижнего затворов произойдет деградация параметров транзистора. Если известен эффект, производимый рассовмещением, то может быть использована стратегия минимизации влияния этого эффекта [25].

Могут быть рассмотрены три случая (рис. 11):

- идеальное совмещение (рис. 11, а);
- увеличенный нижний затвор (рис. 11, б, в);
- минимальный нижний затвор (рис. 11, г, д).

Более длинный нижний затвор, частично перекрывающий сток и исток может быть очень полезен. Смещение на нижнем затворе не только вызывает инверсию в канале, но и аккумуляцию в прилегающих переходах [26], что увеличивает крутизну. Во втором случае происходит резкое ухудшение параметров прибора. Самосовмещение в структурах с двойным затвором является очень критичным, иначе производительность прибора резко падает вследствие увеличения емкости зоны перекрытия и/или потери контроля тока.

Чтобы эффективно использовать площадь, занимаемую КНИ-транзистором, канал может быть

индуцирован не только с двух сторон, но в идеале, — со всех четырех сторон.

Заключение

Переход от технологии объемного кремния к КНИ-технологии является одним из способов решения проблем при создании субмикрометровых транзисторов. Преимуществом КНИ-транзисторов является решение проблемы короткоканальных эффектов. Наиболее перспективной конструкцией КНИ-транзистора представляется конструкция многоканального транзистора с трехмерным затвором [27].

Перспективность КНИ-структур не является бесспорной. Основная проблема состоит в том, что КНИ-транзисторы имеют увеличенный подпороговый ток вследствие эффекта плавающей подложки, который устанавливает предел понижению потребляемой мощности в выключенном состоянии транзисторного ключа [5]. Стремление понизить этот ток приводит к увеличению порогового напряжения, которое не позволяет снизить напряжение питания для уменьшения потребляемой мощности. Другим доводом является то, что малая собственная емкость КНИ-транзистора перестает быть его преимуществом при дальнейшем сокращении размеров [5], поскольку уже в современных СБИС задержка в межсоединениях превышает задержку в вентилях.

Фирма *Toshiba* развила КНИ-технологию и предложила так называемую технологию "кремний-ни-на-чем" (*silicon-on-nothing*, SON). Предлагается создавать рисунок пустот под затворами транзисторов, что позволило бы существенно

уменьшить их паразитное сопротивление и повысить быстродействие. SON-технология не требует проведения ионной имплантации и высокотемпературного отжига, поэтому она будет намного дешевле обычной КНИ-технологии.

Список литературы

1. **Celler G. K.** Frontiers of silicon on insulator // J. Appl. Phys., 2003, vol. 93, #9, P. 4955–4978.
2. **Yeh P. C., Fossum J. G.** // IEEE Trans. Electron Devices. 1995. Vol. 42. P. 1605–1615.
3. **Enist T., Cristoloveanu S.** SOI Technology and Devices IX, Proc. Vol. PV99-3. Electrochemical Society, Pennington, NJ. 1999. P. 329–334.
4. **Shoji M., Horiguchi S.** Electronic structures and phonon-limited electron mobility of double-gate silicon-on-insulator Si inversion layers // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 85. P. 2722–2730.
5. **Thompson S., Packan P., Bhor M.** MOS scaling: Transistor challenges for the 21st century // Intel Tech. J. 1998. Vol. Q3. P. 1–19.
6. **Yan R.-H., Ouzmard A., Lee K. F.** // IEEE Trans. Electron Device. 1992. Vol. 39. P. 1704–1710.
7. **Oh S.-H., Monroe D., Hergenrother J. M.** // IEEE Electron Device Lett. 2000. Vol. 21. P. 445–451.
8. **Brews J. R., Fichtner W., Nicollian E. N., Sze S. M.** Generalized guide for MOSFET miniaturization // IEEE Electron Dev. Lett., 1980.
9. **Майская В.** Будущее транзисторных структур // Электроника: НТБ. 2002. № 3. С. 64–67.
10. **Kedzierski J., Jeong M., Nowak E.** Silicon-on-insulator technology and devices XI/ Ed. by S. Cristoloveanu (Pennington, N. Y., Electrochemical Society Proc., 2003). PV 2003-05. P. 185.
11. **Hisamoto D., Kaga T., Takeda E.** // IEEE Trans. Electron Devices. 1991. Vol. 38. P. 1419–1425.
12. **Denton J. P., Neudeck G. W.** // IEEE Electron Device Lett. 1996. Vol. 17. P. 17–23.
13. **Suzuki K., Tanaka T., Tosaka Y., Horie H., Sugii T.** // IEICE Trans. Electron. 1995. E78-C. P. 360.
14. **Hisamoto D., Lee W.-C., Kedzierski J., Anderson E., Takeuchi H., Asano K., King T.-J., Bokor J., Hu C.** Proc. IEDM'98 Technical Digest, IEEE, Piscataway, NJ. 1998. P. 1032–1034.
15. **Wong H.-S., Franck D. J., Solomon P. M.** IEDM Technical Digest, IEEE, Piscataway, NJ, 1998. 407 p.
16. **Wong H.-S. P., Chan K. K., Taur Y.** IEDM Technical Digest, IEEE, Piscataway, NJ. 1997. 427 p.
17. **Skotnicki T.** // Silicon-On-Insulator Technology and Devices X. Vol. PV2001-3, Electrochemical Society, Pennington, NJ, 2001. P. 391.
18. **Hisamoto D., Kaga T., Kawamoto Y., Takeda E.** A fully depleted lean-channel transistor (DELTA). A novel vertical ultra thin SOI MOSFET // Technical Digest of IEDM, 1989. P. 833.
19. **Huang X., Lee W. C., Kuo C., Hisamoto D., Chang L., Kedzierski J.** et al. Technical Digest of IEDM, 1999. P. 67.
20. **Hiramoto T.** Proc. IEEE International SOI Conference Proceedings, 2001. P. 8.
21. **Colinge J. P., Gao M. H., Romano A., Maes H., Claeys C.** Silicon on insulator: Gate all around device // Technical Digest of IEDM, 1990. P. 595.
22. **Balestra F., Cristoloveanu S., Benachir M., Brini J., Elewa T.** // IEEE Electron Device Lett. 1987. 8. 410.
23. **Cristoloveanu S., Ernst T., Munteanu D., Ouisse T.** // J. High Speed Electron. Syst. 2000. 10. 217.
24. **Kim K., Fossum J. G.** IEEE Trans. Electron Devices. 2001. 48. 294.
25. **Wong H.-S., Frank D., Taur Y., Stork J.** Design and performance considerations for sub-0.1 μm double-gate SOI MOSFET's // IEDM Tech. Digest. 1994. P. 747–750.
26. **Allibert F., Zaslavsky A., Pretet J., Cristoloveanu S.** // Proceedings of the ESSDERC'2001 / Ed. by H. Ryssel, G. Wachutka, H. Grunbacher. Frontier Group, Neuilly, 2001. P. 267.
27. **Наумова О. В., Антонова И. В., Попов В. П.** и др. Нанотранзисторы кремний-на-изоляторе: перспективы и проблемы реализации // ФТП. 2003. Т. 37. № 10. С. 1253–1259.

НОВЫЕ КНИГИ

Тимофеев В. Н., Погалов А. И., Угольников С. В., Андрианов А. М., Панкратов О. В.

Техническая механика микросистем: Уч. пособие / Под ред. В. Н. Тимофеева. — М: МИЭТ, 2006. — 188 с: ил. ISBN 5-7256-0427-6

Пособие посвящено механике микросистем, являющейся составной частью физики микросистем. Изложены основы теории механических колебаний, анализа напряженно-деформированного состояния несущих элементов, демпфирования, электромеханики. Рассмотрены современные конструкции микрогироскопов, акселерометров, микрозеркала, что обусловлено большим практическим интересом к таким приборам.

Предназначено для студентов старших курсов, обучающихся по направлениям (специальностям) "Микросистемная техника" и "Микроэлектроника и твердотельная электроника". Может быть полезно аспирантам и инженерам, занимающимся исследованием и разработкой микросистемной техники.

УДК 621.3.049.77

**Сабир Кумар Саркар, Анкуш Гош,
Самия Деб Бхатъячарья, К. Сентил Кумар,
Соувик Саркар***,
Факультет электроники и телекоммуникаций,
Университет Ядавпура, Калькутта-32, Индия,
*Резидентный колледж Р. К. Миссии,
Нарендрепур, Индия

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ОДНОСПИНОВОЙ ЛОГИКИ ПРИ СОЗДАНИИ ПСП ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СИСТЕМ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ СПЕКТРОМ

В последние годы системы множественного доступа с кодовым разделением (МДКР) стали самыми важными в области мобильной связи. Для систем прямой последовательности с распределенным спектром (DSSS) очень важен генератор псевдослучайной последовательности (ПСП). Мы представляем дизайн генератора псевдослучайной последовательности для "спинтроники", или "спин-электроники", где классические двоичные биты 1 и 0 кодируются через ортогональную поляризацию спина единичного электрона, захваченного в квантовую точку и помещенного в магнитное поле. Для записи входного спина и чтения выходного спина из заданных входных и выходных ячеек применяли принцип ГМР. ГМР позволяет изготавливать сенсоры, способные чувствовать, или "считывать", крайне маленькие спинтронные устройства. Преимуществом спинтронных устройств является существенно более низкое энергопотребление, чем для обычных устройств, при том, что они обеспечивают существенно более высокую скорость.

Введение

В последние годы системы множественного доступа с кодовым разделением (МДКР) являются основными в области мобильной связи [1, 2]. Две МДКР-системы были приняты как стандарты США для цифровой сотовой телефонии: IS-95 — узкополосная МДКР [3] и IS-665 — широкополосная МДКР [4]. Широкополосная МДКР-технология является базовой разработкой Европейской универсальной системы мобильной телекоммуникации (UMTS) Европейским институтом телекоммуникационных стандартов (ETSI). Системы с распределенным спектром (SS) стали очень популярными в современной коммерческой и военной беспроводной связи. Основная причина широкого применения SS — это повышение качества обслу-

живания и емкости, особенно в мобильных коммуникациях [5—7]. Существует три типа SS систем: с модуляцией скачкообразным переключением частоты (FH), прямой последовательности (DS) и гибридные системы. В этой статье мы рассматриваем только DSSS системы и, в частности, генерирование псевдослучайной последовательности (ПСП) для расширения спектра первоначального сигнала.

Псевдослучайная последовательность — это детерминированный, подобный случайному, несущий сигнал, который используется для расширения полосы энергетического спектра информационного сигнала [8—10]. Поскольку тип и длина кода определяют производительность коммуникационной системы, первостепенное значение имеет нахождение его правильного вида. ПСП код — это псевдослучайная последовательность единиц и нулей, которая не является истинно случайной последовательностью, поскольку она периодическая и может генерировать идентичные последовательности, если известны начальные условия. Основная особенность ПСП — это то, что ее автокорреляционная функция имеет свойства, подобные белому шуму, имеющему постоянную энергию по всем занятым частотам. Это указывает на два важных свойства ПСП: случайность и непредсказуемость. ПСП генерируется с использованием цепей последовательной логики. ПСП нашла широкое применение в компьютерной технике и телекоммуникациях [11—13].

Дисциплина, изучающая манипулирование степенями свободы спина единичного носителя заряда для кодирования, преобразования и доставки информации, называется "спинтроникой" [14—18]. Эта область в своей основе происходит от более развитой области, основанной на принципе магнеторезистивного эффекта для обнаружения и хранения информации [19—24].

Разработка программируемых спинтронных логических устройств на элементах магнитных туннельных переходов [25], считывающих головок для обнаружения очень плотных сред магнитной памяти, энергонезависимой магнеторезистивной памяти (MRAM) [26], линейных приложений, таких как системы управления скоростью вращения [27], устройства позиционирования периферических систем защиты в робототехнике и тому подобных системах (таких, как автомобильные системы) [28], магнетометры и устройства мониторинга больших токов в силовых системах [29] и т. д. — все являются основными ранними проявлениями спинтроники. Есть ряд книг и обзорных статей по спин-

троники, где подчеркиваются преимущества спиновых устройств [30—37].

Измерение спина единичного электрона в твердом теле является фундаментальной проблемой физики твердого тела. Недавно она получила дополнительное практическое значение в связи со многими перспективами спинтроники в области масштабируемых твердотельных квантовых компьютеров. Во всех этих перспективных направлениях необходимо измерять спин одного электрона для считывания результатов квантовых алгоритмов [38, 39]. Спинтронные устройства могут иметь более высокую производительность, чем их аналоги из обычной электроники, если в конструкцию заложены характерные свойства спина [33, 34]. В спиновых устройствах, если одна поляризация спина представляет логический бит "1", а антипараллельная поляризация спина — логический бит "0", то можно переключать логическое устройство, просто переворачивая спин без физического движения зарядов [42—45]. Следовательно, можно сберечь много энергии и получить действительно низкопотребляющее устройство [46, 47]. Предложенные логические ключи могут снизить рассеяние мощности на несколько порядков, а, кроме того, это будет потомок современных спиновых логических ключей [48, 49].

Ввиду вышесказанных утверждений кажется, что ПСП имеет множество важных приложений и спинтронные устройства потенциально более эффективны, чем их традиционные электронные аналоги. Они потребляют меньше мощности и требуют меньше места. Это именно те свойства, которые ищут исследователи, чтобы одновременно достичь и высокой скорости, и малого размера для повышения плотности интегрирования УБИС/СБИС-чипов. Это и подвигло нас на реализацию ПСП-генератора, основанного на односпиновой логике, для применения в компьютерной технике и коммуникациях.

ПСП в современных цифровых МДКР системах

ПСП — это ключевой фактор в системах передачи по широкополосному радиоканалу (DSSS). Они ответственны за расширение и сжатие сигнала базовой полосы. Считается, что для постороннего ПСП напоминают шум. Они считаются *псевдослучайными*, поскольку определены и известны как передатчику, так и приемнику. Три основных свойства, которые могут быть приписаны периодической двоичной последовательности как тест на ее случайность, это следующие:

1. *Баланс*. Хороший баланс требует, чтобы в каждом периоде последовательности число двоичных единиц отличалось от числа двоичных нулей не более, чем на единицу (one digit).

2. *Серийность*. Серия определяется как последовательность одного типа двоичных цифр. Появление противоположной цифры в последовательно-

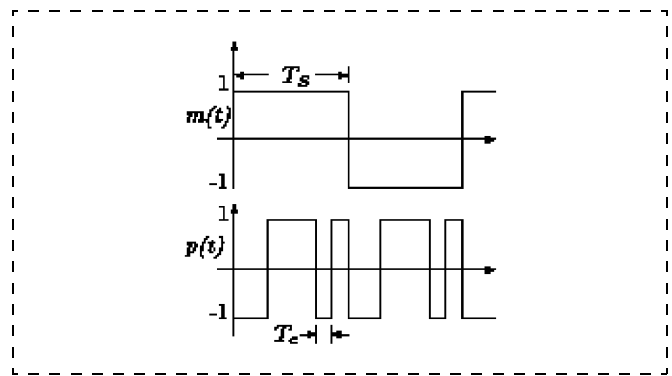


Рис. 1. Сигналы $m(t)$ и $p(t)$ для генератора ПСП максимальной длины с $m = 3$

сти начинает новую серию. Длина серии — это число цифр в серии. Желательно, чтобы в сериях из единиц и нулей в каждом периоде половина из пробегов каждого типа была длины 1, одна четвертая — длины 2, одна восьмая — длины 3 и т. д.

3. *Корреляция*. Если период последовательности сравнивать шаг за шагом с любым циклическим сдвигом ее самой, то лучше всего, если число совпадений отличается от числа несовпадений не более, чем на один отсчет. На рис. 1 представлен оригинальный сигнал $m(t)$ с битовым периодом T_s , и сигнал ПСП $p(t)$ с битовой длительностью T_c .

Рассмотрим сигнал ПСП $p(t)$ для иллюстрации упомянутых выше свойств. Длительность бита ПСП (также называемая *чиповой длительностью*) гораздо менее, чем базовая ширина полосы; это вызывает уширение спектра в частотном домене [50, 51].

Один из хорошо известных и простых способов генерировать ПСП — это использование *последовательностей максимальной длины* (ПМД). ПМД имеет все три свойства ПСП. ПМД генерируется с помощью регистров сдвига и некоторыми логическими схемами в их цепи обратной связи 2 (рис. 2).

Автокорреляционная функция периодического сигнала $p(t)$ с периодом $T_{\text{ПСП}}$ определяется выражением

$$R_s(\tau) = \frac{1}{T_{PN}} \int_{-T_{PN}/2}^{T_{PN}/2} p(t)p(t - \tau)dt, \quad (1)$$

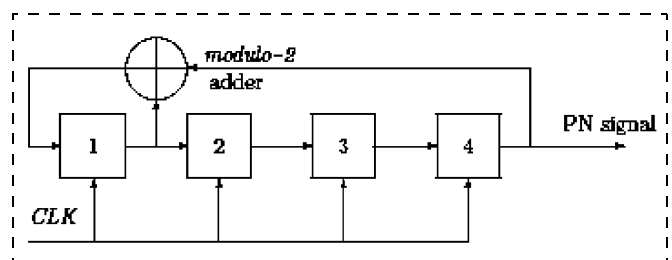


Рис. 2. Блок-схема ПМД генератора ПСП

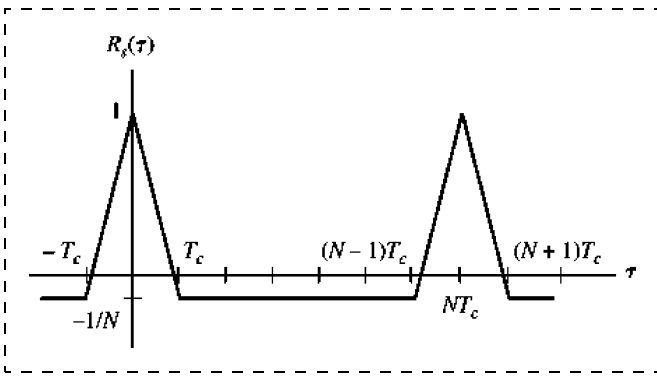


Рис. 3. Автокорреляционная функция сигнала ПСП

где время задержки τ находится в интервале $\left[-\frac{T_{PN}}{2}, \frac{T_{PN}}{2}\right]$. Это уравнение можно упростить:

$$R_s(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{N+1}{NT_c}|\tau| & \text{при } |\tau| \leq T_c \\ -\frac{1}{N} & \text{иначе} \end{cases}$$

График функции представлен на рис. 3. Из графика видно, что пик получается, только когда локально сгенерированная последовательность коррелирует с входящей последовательностью, если же они не коррелируют, то получается шум [52, 53]. Если N велико и T_c мало, то

$$R_s(\tau) \approx T_c \delta(\tau) - 1/N, |\tau| \leq N \frac{T_c}{2}$$

Таким образом, сигнал ПСП принципиально работает как белый шум с очень малой компонентой dc [41].

Известно, что для распознавания приемником сигнала передатчика и, в особенности, для избежания ложной синхронизации важно, чтобы автокорреляционная функция ПСП кода имела максимальный пик при $\tau = 0$ и $\tau = \pm kT_c$ и минимальное значение в других областях [54]. Чтобы минимизировать помехи и/или случайное подслушивание, ПСП должна быть как можно длиннее; чем длиннее последовательность, тем сложнее для несанкционированного слушателя определить правильную последовательность. В системах МДКР, где каждый пользователь имеет уникальный ПСП код, приемник должен быть способен отклонить другие интерферирующие сигналы с распределенным спектром и/или предотвратить ложную корреляцию.

ПСП для приложений МДКР должна иметь следующие характеристики:

- $R_{ss}(0)_{\max}$ относительно $R_{ss}(\tau \neq 0)$ должна быть как можно длиннее;
- если s и t представляют различные ПСП, то $|R_{st}(\tau)|_{\max}$ должно быть минимальным для всех значений τ ;

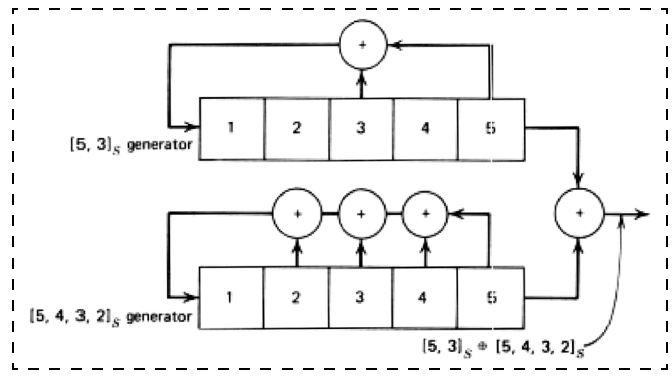


Рис. 4. Пояснение к генерированию "золотого кода" с помощью [5, 3] и [5, 4, 3, 2] генераторов

- возможность минимизировать отношение $|R_{st}(\tau)|_{\max}/R_{ss}(0)$ [55].

К сожалению, последовательности, генерируемые односдвиговым регистром, не имеют достаточно хороших взаимокорреляционных свойств, что делает их неприемлемыми для систем МДКР. Кроме того, для односдвигового регистра генерирование различных выходных последовательностей требует изменения соединений обратной связи; поэтому сдвиговый регистр заданной длины даст нам относительно немного уникальных О/Р последовательностей. Для преодоления этих ограничений "золотые коды" генерируются с помощью комбинации modulo-2 (*исключающее ИЛИ*, прим. *перев.*), выходов двух или более регистров, как показано на рис. 4.

Как показано на рис. 4, последовательность "золотого кода" генерируется путем применения modulo-2 сложения (XOR — *исключающего ИЛИ*) к выходу двух ПМД (они не обязаны иметь одинаковый выход ПСП) побитно и извлечением с выхода сумматора modulo-2. Если две последовательности имеют длину $2^m - 1$, то последовательность "золотого кода" также будет иметь длину $2^m - 1$.

Генераторы "золотого кода" допускают генерирование длинных последовательностей, т. е. если мы позволим регистру 1 поддерживать его значение без каких-либо циклических сдвигов, а регистру 2 начать циклично сдвигаться, то мы получим последовательность "золотого кода", когда будет закончен полный цикл. Для одного циклического сдвига в регистре 1 и другого циклического сдвига в регистре 2 мы получим другую последовательность "золотого кода" длины $2^m - 1$ и т. д.

Многорегистровый генератор "золотого кода" может произвести n^r не максимальных последовательностей длины $2^n - 1$ и r максимальных последовательностей такой же длины, где r — это число регистров, а n — это длина регистра [56].

Принцип действия

В настоящей работе мы сконструировали генератор ПСП на основе односпиновой логики с помощью двумерной матрицы электронов с поляри-

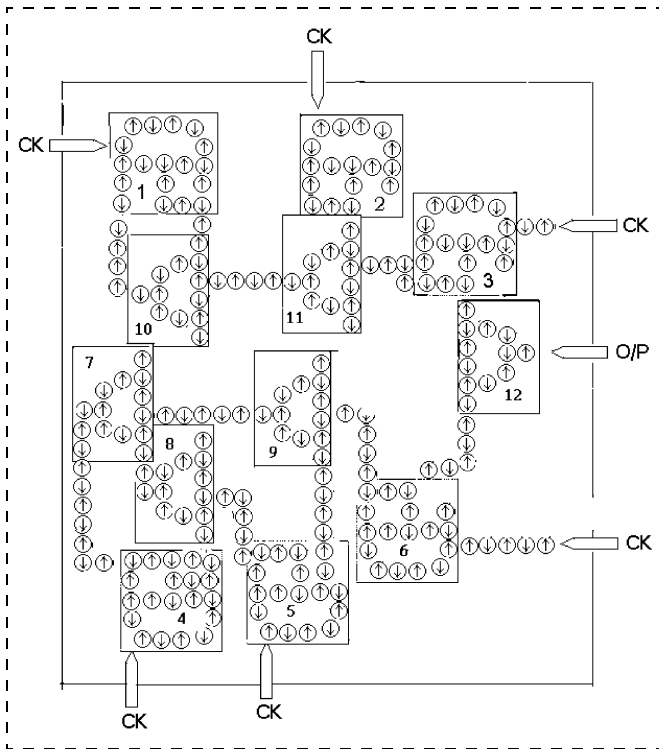


Рис. 5. Схема ПСП генератора с использованием одноэлектронной ячейки с правильной ориентацией спина в начальном состоянии (1, 1, 1) и (1, 1, 1)

зованным спином (ячеек). Будут использоваться считывающие GMR-головки для обеспечения ввода и получения вывода с ультрамалого чипа.

Принцип действия ячеек в предложенной нами системе представлен на рис. 5 и 6, где используется правильная ориентация спина в каждой ячейке для двух наборов ориентаций при различных входных комбинациях. Двоичная информация закодирована в ориентации спина квантовых точек с электроном. Можно обработать двоичную информацию со спиновой степенью свободы. Трехфазный счетчик применен для перемещения сигнала в направлении от входа к выходу. Для создания генератора трехбитной последовательности использовали линейку ячеек, в которой каждая ячейка имела ориентацию спина вниз (принято как логический "0"), если ее ближайшие соседи ориентированы вверх, в противном случае спин в ячейке направлен вверх (принято как логическая "1"). Это связано с тем, что ориентации управляются следующими правилами:

- любые соседние электронные ячейки имеют противоположные ориентации спинов;
- только соседние электроны взаимодействуют друг с другом [40].

Но каждая ячейка имеет предпочтительную ориентацию, подверженную воздействию слабого внешнего постоянного магнитного поля, приложенного ко всему чипу. В данной системе внешнее постоянное магнитное поле приложено таким образом, что направление вверх предпочтительно

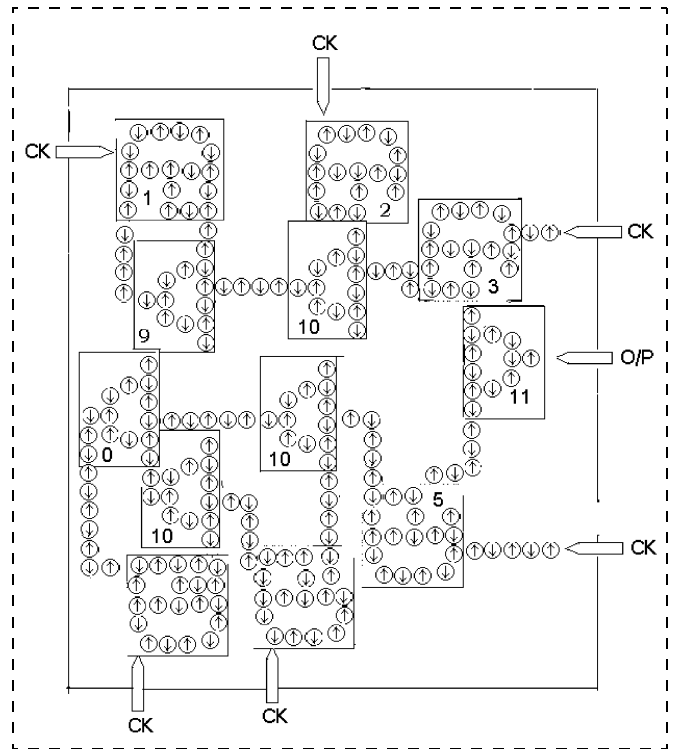


Рис. 6. Схема ПСП генератора с использованием одноэлектронной ячейки с правильной ориентацией спина в исходном состоянии (0, 1, 1) и (1, 0, 1)

и поэтому, если одна из соседних ячеек ориентирована вниз, то ячейка будет ориентирована вверх. В данном варианте линейки с нечетным числом ячеек также используются для разводки, т. е. соединения одной из функций с удаленной.

На блок-схеме (рис. 7), блоки от 1 до 6 представляют D-триггеры, а блоки 7–12 представляют

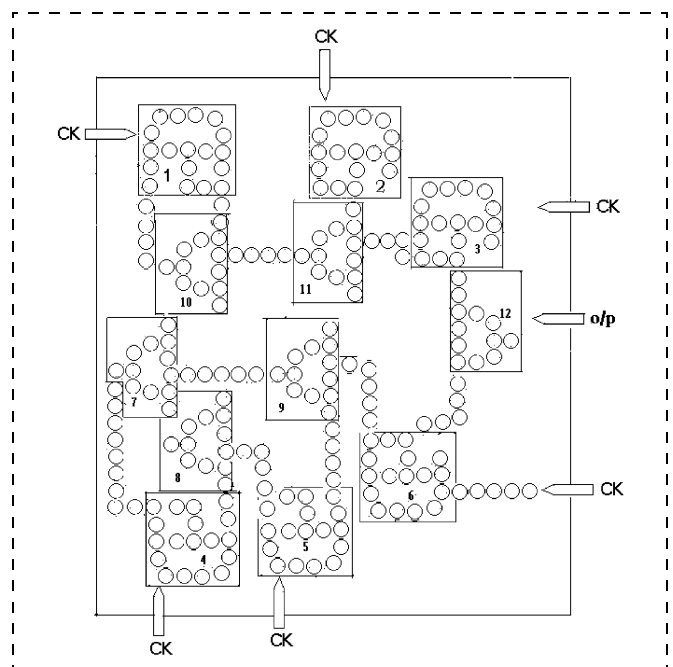


Рис. 7. Схема ПСП генератора с использованием одноэлектронной ячейки с правильной ориентацией спина

22. **Prinz G.** Magnetoelectronics // Science. 1998. Vol. 282. P. 1660—1663.
23. **Tsang C.** et al. Design, Fabrication and Testing of Spin-valve Read head for high density Recording // IEEE Trans. Magn. Nov. 1994. Vol. 30. P. 3801—3806.
24. **Daughton J., Brown J., Chen E., Beech R., Pohm A. and Kude K.** Magnetic field sensor using GMR multilayer // IEEE Trans. Magn. Nov. 1998. Vol. 30. P. 4608—4610.
25. **Freitas P. P., Silva F., Oliveira N. J., Melo L. V., Costa L. and Almeida N.** Sensors and Actuators A. 2000. Vol. 81 (1—3). P. 2—8.
26. **Wang J., Merg H. and Wang J. P.** // Journal of appl. Phys. 2005. Vol. 97 (10). P. 10D509—10D511.
27. **Freitas P. P., Costa L., Almeida N., Melo L. V., Silva F., Bernardo J. and Santos C.** // Appl. Phys. 1999. Vol. 85 (8). P. 5459—5461.
28. **Ku W. J., Freitas P. P., Compadinho P. and Barata J.** Precision X-Y robotic object handling using a dual GMR bridge sensor // IEEE transactions on magnetics. 2000. Vol. 36. P. 2782—2784.
29. **Pelegri J., Egea J. B., Ramirez D. and Freitas P. P.** Design, fabrication and analysis of a spin-valve based current sensor // Sensors and actuators. 2003. Vol. 105 (2) P. 132—136.
30. **Semiconductor** spintronics and quantum computation / Ed. by D. D. Awschalom, D. Loss, and N. Samrath. New York: Springer, 2002.
31. **Hiribehedin C. F., Lutz C. P., and Heinrich A. J.** Spin Coupling in Engineered Atomic Structures // Science. 2004. 312. P. 1021—1024.
32. **Holmstrom E., Nordstrom L.** et al. From the Cover: On the Sharpness of the interfaces in metallic Multilayers // PANS 101. 2004. P. 4742—4745.
33. **Spin Electronics** / Eds. M. Ziese and M. J. Thornton. New York: Springer, 2001.
34. **Spin dependent transport in Magnetic Nanostructures** / Eds. S. Maekawa and T. Shinjo. New York: Taylor and Francis, 2002.
35. **Magnetic Interaction and Spin Transport** / Eds. A. Chitchekanova, S. Wolf and Y. Idzerda. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 2003.
36. **Bandyopadhyay S. and Cahay M.** // App. Phys. Lett. 2005. Vol. 86 (13). P. 133502-1—133502-3.
37. **Ohno H., Matsukura F. and Ohno Y.** Semiconductor Spin Electronics // JSAP Int. 2002. Vol. 5. P. 4—13.
38. **Bandyopadhyay S.** Computing with spin: from classical to quantum computing, Super lat. Microstruct. 2005. 32. P. 171.
39. **Bandyopadhyay S., Das B. and Miller A. E.** Super computing with spin polarized single electrons in a quantum coupled architecture // Nanotechnology 1994. 5. P. 113.
40. **Sarkar S. K., Basu T. and Bandyopadhyay S.** Single Spin Logic Circuits // Phys. of low dim. Struc. 2005.
41. **Wang X. F., Vasilopoulos P. and Peeters F. M.** // Phys. Rev. 2002. B65. 165217.
42. **Koga T., Nitta J., Takayanagi H. and Dutta S.** // Phys. Rev. Lett. 2002. 88. 126601.
43. **Zutic I., Fabian J., and Das Sarma S.** // Appl. Phys. Lett. 2001. 791558.
44. **Molnar, Roukes M. L., Chitchekanova A. Y. and Treger D. M.** // Science. 2001. 294. P. 1488.
45. **Ziese M. and Thornton M., eds** // Spin Electronics. New York: Springer-Verlag. 2001.
46. **Mohanty P., Zolfagharkhani G., Kettemann S. and Fulde P.** // Physical Review. 2004. B. 70. 195301.
47. **Kortright J. B., Awschalom D. D., Stohr J., Badar S. D., Idzerda Y. U., Parking S. S. P., Schuller I. K. and Siegmann H. C.** // J. Magn. Mater. 1999. 207.7.
48. **Gijs M. A. M. and Baer G. E. W.** // Advances in Physics. 1997. Vol. 46. P. 285—445.
49. **Kane B. E.** A silicon based nuclear spin quantum computer // Nature. 1998. Vol. 393. P. 137—138.
50. **Prasad R., Mehr W. and Kohauser W.** eds. Third-generation Mobile Communication Systems. Artech House. 2000.
51. **Pursley M. B.** Performance Analysis for Phase coded Spread Spectrum Multiple Access Communication. Part I: System Analysis // IEEE Trans. Commun. 1997. Vol. COM-25.
52. **Sharawi M. and Marko D.** Introduction to Direct Sequence Spread Spectrum Communications // Oakland University. Michigan. November 2000.
53. **Dixon R.** Spread Spectrum Systems with Commercial Applications, Wiley, NY, 1994.
54. **Carlson A. B., Crilly P. B. and Rutledge J. C.** Communication Systems // An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication, McGraw-Hill. 2002.
55. **Dinan E. and Jabbari R.** Spreading codes for Direct Sequence CDMA and Wideband CDMA Cellular Networks // IEEE Communications Magazine, Sept. 1998.
56. **Gold R.** Maximal Recursive Sequences with 3-valued Recursive Cross-correlation Functions // IEEE Trans. Inform. Theory. 1968. Vol. IT-14. P. 154—156.

УДК 623:004.89

В. А. Телец, д-р техн. наук,
ФГУП "22 ЦНИИ Минобороны России"

"ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ" БОЕПРИПАСЫ И МИНЫ XXI ВЕКА

Представлен краткий авторизованный обзор по материалам зарубежных источников, в которых изложены наиболее яркие результаты создания и боевого применения "интеллектуальных" или "умных" боеприпасов различного назначения.

В боевых действиях в XXI веке ключевую роль будут играть информационные технологии, а битвы в обозримом будущем перейдут в область электронного "киберпространства" или "электронного поля боя". В войне нового типа преимущество получит армия, в наибольшей степени обладающая

и эффективно владеющая электронным "интеллектуальным" вооружением, боевой и специальной техникой.

И в настоящее время оружие становится все более автономным, точным, мобильным, легким, избирательным, многофункциональным, разрушительным.

Благодаря электронной компонентной базе нового поколения получили развитие информационно-измерительные и управляющие системы, способные принимать и идентифицировать электромагнитные излучения различной физической природы, а с использованием цифровых методов преобразовывать и обрабатывать полученную информацию в реальном масштабе времени.

"Умные" боеприпасы с такой электронной начинкой, например, самостоятельно отличат танк от автомобиля, вычислят траекторию полета ракеты и перехватят ее, обнаружат и уничтожат комплекс

противовоздушной обороны, боевой корабль, самолет, вертолет или космический аппарат и др.

Сеть или "паутина" сейсмических датчиков, установленных на глубине до 4 м, по колебаниям почвы обнаружит приближение противника, определит его численность и техническую оснащенность. Данные будут сверены со спутниковой информацией, уточняющей, например, расположение личного состава и техники противника. Вся информация от наземных, подземных, воздушных и космических средств разведки попадет в базу данных и после уточнения и сверки "умному" оружию будет выдана соответствующая команда на поражение.

Мины на полях заграждения смогут вступать в информационное взаимодействие друг с другом, чтобы "решить", в какой наиболее эффективной последовательности срабатывать. Если же противник попытается проделать проходы в "умных" минных полях, то его усилия не увенчаются успехом, поскольку расчищенное пространство немедленно перекроют мины резервные, кассетные, самодвигающиеся и прыгающие.

Там, где аппаратура выявляет наиболее плотную концентрацию неприятеля, начнется комбинированная атака или контратака "умного" оружия. Самодвижущиеся мины-ракеты, выявив цели, взлетят в воздух, и их удар будет неотвратим, причем они сами выберут наиболее уязвимую или важную цель.

Одновременно на сосредоточение неприятеля обрушатся целые рои беспилотных ударных самолетов, которые также самостоятельно подберут цели для своей атаки, а до нее — передадут информацию о положении на поле боя приемным терминалам командных пунктов.

Танкам и орудиям противника, которым удастся уцелеть, придется иметь дело с боевыми мини-роботами, способными засечь приближение целей и встретить их миниатюрными ударными элементами, обладающими, тем не менее, большой поражающей мощностью.

Это типовые сценарии развития боевых событий, разворачивающихся одновременно как на виртуальном электронном, так и на реальном полях боя. В эту параллельно существующую реальность легко поверить, рассмотрев лишь несколько примеров реализации боевых средств нового поколения, под которые и написаны представленные выше тактические сценарии.

"Умный" американский снаряд XM982 (*Excalibur*) для 155-миллиметровых (рис. 1) самоходных и буксируемых гаубиц можно называть снарядом только условно.

Это комбинация снаряда и ракеты. После выстрела, уже в полете, снаряд раскрывает оперение и у него начинает работать ракетный двигатель.

Управление снарядом осуществляется системой космического наведения NAVSTAR сигналами, поступающими на его приемник, защищенный от помех.

Если сигнал управления подавляется (или неустойчив, например, вследствие плохой погоды), то вступает в действие встроенная в снаряд и совместимая с GPS бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), которая выполнена на основе микроэлектромеханического (МЭМС) трехосевого гироскопа и бортового микропроцессорного вычислителя.

БИНС определяет ориентацию и координаты боеприпаса в пространстве, а после вычисления траектории управляет его аэродинамическими рулями. Исходные данные для стрельбы из современных гаубиц вводятся в бортовой вычислитель в процессе заряжания снаряда. Но стрельба этим снарядом возможна и из орудий, которые стоят на вооружении уже десятки лет. В этом случае его



Рис. 1. "Умные" МЭМС-оснащенные снаряды типа XM982 (*Excalibur*) для стрельбы из 155-миллиметровых гаубиц и самоходных орудий с автоматизированными системами управления стрельбой

программируют вручную перед заряданием в орудие.

Отклонение снарядов класса *Excalibur* от цели при ее поражении в условиях городского и сложного природного ландшафтов не превышает 10 м при дальности стрельбы 40 км. Эффективность стрельбы обеспечивается в любую погоду, угол атаки близок к вертикальному (~90°). Используемые в боеприпасах многофункциональные МЭМС-устройства подрыва ("электронные предохранители") обеспечивают заданные высоту и дальность подрыва заряда в зависимости от его мощности, назначения и целей (войска, легкая броня, грузовики, фузеляжи и т. п.).

Точность попадания обеспечивает не только экономию боеприпасов, что снижает бремя тылового обеспечения войск, но и минимизирует риски потерь войск от "дружественного огня", уменьшает сопутствующие разрушения, увеличивает потери войск противника.

"Умные" боеприпасы могут быть использованы для стрельбы в неуправляемом режиме или в режиме управления с командного пункта (для артиллерийских средств, оснащенных цифровыми системами управления).

Подобная БИНС может также использоваться в торпедах (рис. 2, см. третью сторону обложки), минах, авиационных бомбах, ракетах.

155-миллиметровый кассетный снаряд *BONUS* (рис. 3) фирмы "*Bofors Defence*" (Швеция) с самоприцеливающимся боевым элементом (СПБЭ), предназначен для поражения бронетанковой техники и наземных целей с военных кораблей.

Для перевода *BONUS* в режим авторотации и плавного снижения используются два малых вы-



Рис. 3. 155-миллиметровый кассетный боеприпас *BONUS* фирмы "*Bofors Defence*"

движных крыла. Аэродинамика этих крыльев обуславливает угловую стабилизацию с углом наклона 35...38° по отношению к вертикали снаряда. На заданной высоте (до 175 м) датчик-высотомер переводит бортовую электронную аппаратуру в поисковый режим.

В процессе снижения со скоростью до 45 м/с датчик СПБЭ сканирует зону площадью до 32 000 м², в которой находится цель. Когда бортовой датчик детектирует и идентифицирует цель, из суббоеприпаса выстреливается боеголовка — "ударное ядро", и наносит удар по выбранной цели сверху.

Исходно *BONUS* рассчитан на использование одной инфракрасной (ИК) головки прицеливания (многополосной, реагирующей на электромагнитное излучение в нескольких частотных диапазонах), что ограничивает возможности его применения в сложных метеоусловиях. Но в более поздней модификации ИК датчики образованы матрицей из шести ИК детекторов на основе твердого раствора теллуридов кадмия и ртути.

В снаряде используется донный газогенератор, обеспечивающий дальность стрельбы до 35 км при уменьшенной массе метательного заряда, что снижает перегрузки, действующие на электронный узел элемента.

Испытания *BONUS* показали его достаточно высокую эффективность: залпом из 36 таких снарядов в течение 15 с было поражено шесть из 18 танков, расположенных на площади 600 м².

СПБЭ снаряда *SMArt-155* фирмы *GIWS* (Германия), имеет три датчика индикации цели — миниатюрный радиолокатор на принципах пассивной и активной локации, инфракрасный детектор (рис. 4). Датчики функционируют одновременно, и на выходе измерительной системы формируется обобщенный образ цели. Для надежности сигналы, снимаемые с датчиков, обрабатываются процессором с помощью двух специальных алгоритмов сканирования, что позволяет СПБЭ не реагировать на ложные цели.

Сигналы ИК датчика синтезируют тепловое изображение цели, радиолокационные активный и пассивный датчики миллиметрового диапазона образуют альтернативный канал самоприцеливания, чувствительный к металлической обшивке целей и железобетонным перекрытиям инженерных сооружений.

Бортовые высокочувствительные датчики снаряда эффективны в поиске замаскированных целей и активном противодействии противнику на местности с различным рельефом и в любых климатических зонах.

Боеприпас *SMArt-155* поступил в артиллерийские подразделения, имеющие на вооружении самоходные гаубицы *PzH-2000*, которые позволяют вести стрельбу на дальность до 28 км. Бундесвер определил годовую потребность в этих снарядах сухопутных сил в 100 000 боевых и 20 000 учебных единиц.

СПБЭ боеприпаса *SADARM* (рис. 5) фирм "*Aer-ogjet*" и "*Alliant Techsystems*" (США) предназначен для



Рис. 4. 155-миллиметровый кассетный снаряд SMArt-155 (*Suchzunder-Munition fur die Artillerie-155*) консорциума GIWS (Германия):
 а — общий вид; б — электронные составляющие СПБЭ снаряда SMArt-155

применения в артсистемах M109A5 и M198, но может использоваться и в головных частях оперативно-тактических ракет ATACMS, в авиабомбе GBU-15, ракете AGM-130, кассетных снарядах MLRS.

SADARM предназначен для поражения групповых бронированных целей на дальностях до 22 км и содержит два СПБЭ, каждый из которых оснащен боевой частью типа "ударное ядро" и комбинированным датчиком цели, включающим пассивный ИК и активно-пассивный радиолокационный (миллиметрового диапазона) каналы. Последний используется еще и как высотомер.

Параютная система обеспечивает вертикальный спуск СПБЭ со скоростью до 15 м/с и наклоном 25...30° от вертикали. Снаряд выстреливается в район нахождения скопления бронетехники, а на высоте ~750 м происходит вскрытие корпуса и выброс кассетных элементов через донную часть. Тормозное устройство гасит угловую скорость вращения, после чего раскрывается ленточный парашют.

В процессе снижения SADARM по спирали датчик цели его СПБЭ включается на высоте 150...200 м и сканирует местность на площади до 2 км² при угле зависания относительно оси авторотирующего парашюта 38°.

При попадании цели в поле зрения датчика встроенный вычислитель на основе микропроцессора определяет ее положение и осуществляет подрыв боевой части (БЧ). Мощность БЧ SADARM достаточна для уничтожения самоходной артиллерии и бронетехники, ее теоретическая бронбойная способность достаточна и для пробивания верхней части орудийной башни большинства моделей танков.

В головной части крылатой ракеты MGM-137 (США) используется элемент *BAT* (*Brilliant Anti-Tank*). Он имеет цилиндрическую форму (рис. 6) с каплевидным утолщением в носовой части и по четыре складывающихся прямоугольных крыла и

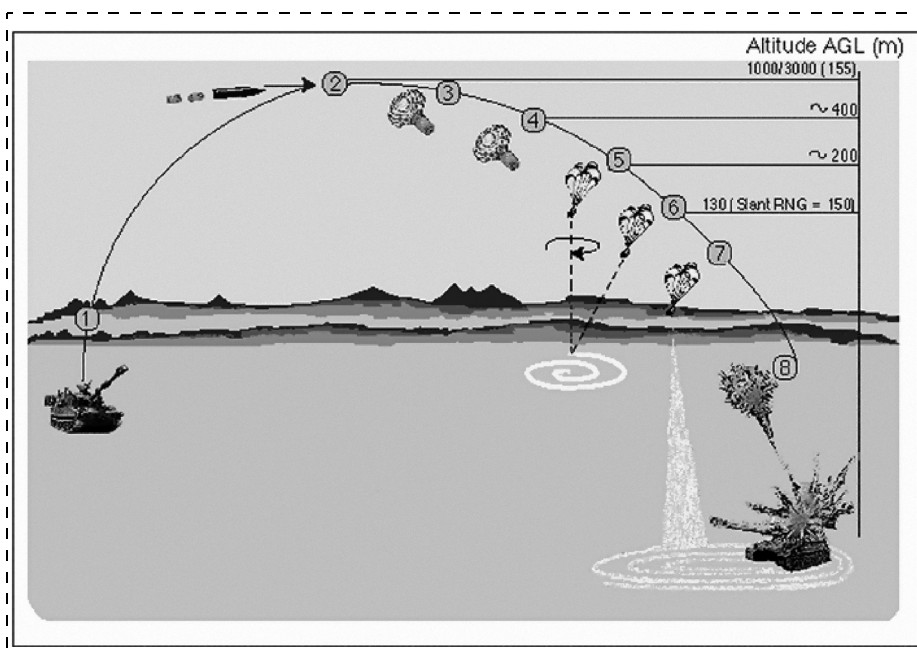


Рис. 5. "Умный" боеприпас SADARM фирм "Aerojet" и "Alliant Techsystems" (США) для артсистем M109A5 и M198

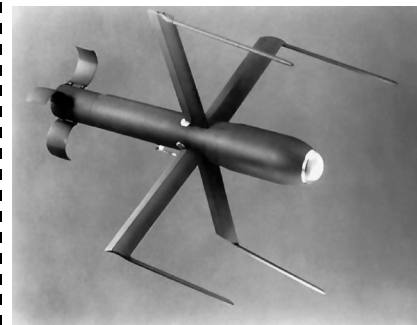


Рис. 6. Внешний вид СПБЭ "умной" крылатой ракеты MGM-137 (США)

стабилизатора в центральной и хвостовой частях корпуса. Крылья и стабилизаторы раскрываются после запуска и обеспечивают планирование и медленное проворачивание вокруг продольной оси. Для эффективного поражения перспективных танков в СПБЭ крылатой ракеты MGM-137 используетсякумулятивный заряд тандемного типа.

Поиск мобильных группировок противника и целеуказание проводится с помощью системы "Джистарс". После разведения над районом расположения цели *BAT* функционирует автономно, проводя поиск, распознавание цели, самонаведение и поражение. Для этого он оснащен комбинированной головкой самонаведения с ультразвуковым и ИК датчиками цели.

Двухдиапазонный ИК датчик цели располагается в носовой части летательного аппарата, а микрофоны акустического канала — в тонких штырях, установленных на концах крыльев и сильно выступающих вперед. В результате образуется акустическая антенная решетка, имеющая четыре приемника.

На цилиндрической части корпуса элемента (между крыльями) расположен датчик системы измерения параметров воздушного потока, знание которых позволяет решить проблему шумоподавления.

Ранее акустические системы наведения в противотанковых боеприпасах не применялись в связи с большим уровнем шумов, возникающих при обтекании набегающим потоком воздуха и необходимо обеспечения требуемой точности локации при наведении на цель.

Новые технологии позволяют реализовать многоканальную цифровую обработку акустических сигналов в бортовом вычислителе на базе микропроцессора. Каналы могут работать либо параллельно, когда распознавание цели осуществляется "суммированием" ее признаков, полученных по каждому из каналов, либо последовательно, когда каналы дополняют друг друга.

Масса *BAT* — 20 кг, длина — 914 мм, диаметр — 140 мм. СПБЭ поражает цели в сложных метеоусловиях (низкая облачность, сильный ветер, запыленность атмосферы) и выбран армией США для снаряжения ракет MGM-137, кассетных головных частей "Block-2" ракет ATACMS и TGW ракет MLRS (рис. 7, см. третью сторону обложки).

В США завершены испытания "умного" боеприпаса LOCAAS, способного определять облик цели с помощью лазерного локатора. Система управления сравнивает его с эталонным изображением из библиотеки целей и принимает решение об уничтожении или продолжении поиска. Планируется оснащение боеприпасами LOCAAS перспективных образцов оружия, в частности FRSWF (*Fast Reaction Standoff Weapon Future*), — космической системы поражения боевой техники заданного типа на удаленных театрах военных действий.

Компания *Alliant Techsystems* (США) готовится к поставке в армию к 2010 г. "умных" 120-миллиметровых минометных снарядов PGMM (*Precision-Guided Mortar Munition*) с лазерным наведением, которые дадут возможность командиру батальона вести огонь на точечное поражение, максимально эффективно используя ударную мощь боеприпаса.

Современные минометные системы имеют достаточно большой радиус поражения при увеличенной дальности стрельбы. В используемых сейчас минометных снарядах M934A1 дальность стрельбы составляет 7,2 км, новые снаряды PGMM смогут поражать цель на расстоянии 10...12 км при повышенной точности. Но их цена пока на порядок выше.

Агентством по перспективным оборонным разработкам США созданы "умные" мины, которые автономно определяют и уничтожают цели. Они обладают "коллективным разумом", способны оперативно обмениваться информацией, самостоятельно перемещаться, налаживать оптимальную схему охраны "вверенного" участка, "самозаживлять" поврежденное минное поле. По сути — это "интеллектуальные" мобильные мины-роботы (рис. 8, см. третью сторону обложки).

При нарушении зоны минирования "электронное минное поле" само решает, какие мины эффективнее задействовать и активизировать по мере изменения оперативной обстановки.

За минуты эти смертоносные мины-роботы с помощью встроенных приемников GPS вычисляют карту взаимного расположения до тысячи противотанковых и противопехотных мин. Причем вновь устанавливаемые мины тут же налаживают между собой связь в автоматическом режиме. Оставшиеся после взрывов мины вычисляют поврежденный участок, определяют новую схему закрытия зон и согласованно заполняют пустующие площади путем перемещения. Для этого у них имеются поршни-толкатели и миниатюрные встроенные ракетные двигатели.

По информации DARPA в ходе испытаний выборка из двенадцати мин-прототипов, доказала способность "разумно" изменять конфигурацию минного поля на основе использования набора прикладных программ поведения с учетом той или иной тактики противника (рис. 9).

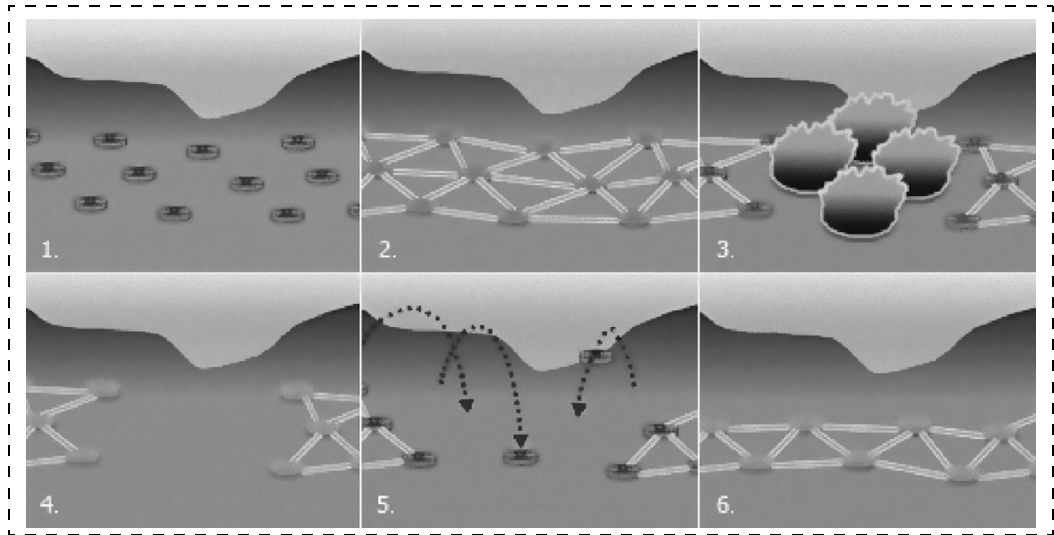
Технология "электронного минного поля" предусматривает дистанционный подрыв по команде оператора или самоуничтожение мин через заданный период после потери связи.

Мины — мини-роботы перемещаются за один раз на расстояние до 10 м и занимают новое место с погрешностью в 1 м. Цикл обнаружения повреждений минного поля и его "заживления" занимает от десятков секунд до единиц минут в зависимости от сложности поставленной задачи в зоне минирования.

По замыслу разработчиков "умные" мины смогут работать как на пересеченной местности, так и на городских улицах, с учетом заложенных в их па-

Рис. 9. Конфигурация минного поля:

1 — мины размещены на открытом пространстве; 2 — мины устанавливают между собой радиосвязь и составляют карту минного поля; 3 — нарушение зоны минирования и подрыв части мин; 4 — участок повреждения минного поля идентифицируется в "электронном минном поле"; 5 — в "электронном минном поле" вырабатываются решения по самоперемещению мин для эффективного восстановления зоны минирования; 6 — после серии прыжков — минное поле восстановлено



мать маршрутов передвижения. Последнее обстоятельство в сочетании с высокой подвижностью мин — мини-роботов в перспективе может привести к появлению способов ведения боевых действий даже в закрытых помещениях.

Индивидуальную боевую мощь американского солдата ближайшего будущего призвана обеспечить сверхсовременная винтовка-гранатомет XM29, буквально начиненная электроникой и при стрельбе использующая "умные пули" XM1018 (рис. 10, см. третью сторону обложки), хотя может стрелять и обычными пулями как автомат.

Боеприпас XM1018 диаметром ~20 мм может применяться в нескольких режимах. Основной режим — осколочный взрыв в воздухе (рис. 11). Для этого снаряд оснащен двойной, сзади и спереди, боеголовкой, что обеспечивает равномерное рассеивание осколков во всех направлениях. В его центре размещена микросхема процессора, сигналы управления которого приводят в движение исполнительные МЭМС-устройства, вынуждая заряд детонировать при заданных условиях.

Определяет эти условия сама винтовка XM29, оснащенная лазерным, телевизионным и ИК прицелами, компасом и дальномером. Но главный ее компонент — встроенный микроэлектронный цифровой процессор, который управляет всей электронной системой "винтовка—пуля".

XM29 состоит из двух независимых модулей, управляемых общим спусковым крючком. Каждый имеет отдельный ствол. Верхний модуль — это "интеллектуальный" 20-миллиметровый гранатомет, ствол которого изготовлен из титана для предотвращения магнитных помех при программировании заряда.

Программирование "умной пули" выполняется в стволе бесконтактным способом с использованием катушки индуктивности. При выстреле граната раскручивается в стволе, а вмонтированный микропроцессор считает обороты, сделанные боеприпасом, и взрывает его соответственно заданной программе.

Если солдату нужно уничтожить противника, который спрятался в окопе или за углом, достаточно нацелить XM29 на этот самый окоп или угол.



Рис. 11. Боевое применение "электронной" винтовки XM29 в режиме осколочного взрыва в воздухе "умных" боеприпасов XM1018



Рис. 12. Термобарическая граната к подствольнику американской "электронной" винтовки-гранатомета XM29: ударная волна поражает живую силу вне границ "пылающей тучи", а оседающий "огненный туман" перемещается по ветру, обволакивая препятствия и проникая в укрытия

Бортовой компьютер определит расстояние к цели и запрограммирует "умную пулю" так, чтобы она взорвалась именно в заданном месте.

"Умная пуля" может взрываться не только в воздухе над заданной целью, предусмотрено еще три ее режима.

Первый режим — это взрыв при столкновении с препятствием. В соединении с системой сверхточного наведения и дальностью полета пули он намного превышает по убийственной силе традиционные режимы. Расстояние, на котором комплекс XM29 может поразить цель, составляет 1 км при прицельном огне на расстоянии 500 м.

Второй режим — "оконный", когда пуля взрывается не сразу, а через долю секунды после столкновения. Она пробивает окно или тонкий лист металла и разрывается внутри помещения, осыпая людей шрапнелью.

Третий режим — взрыв пули через 8 с после выстрела. Теоретически он предназначен для очистки поля боя от не сработавших боеприпасов, но на практике в таком режиме пулю можно использовать как бомбу замедленного действия.

Прицеливание XM29 выполняется в два этапа. На экране телеприцела отображается красная точка — первичный прицел. Стрелок должен навести винтовку на предполагаемую цель. Встроенный микропроцессор вычисляет расстояние, делает поправку на плотность воздуха и программирует пулю соответственно полученным данным. На телеприцеле появляется еще одна красная точка — вто-

ричный прицел. Солдату остается соединить с ней первичный прицел и нажать на спусковой крючок.

Очевидно, что такое прицеливание возможно только при снайперской тактике, а для ближнего боя используется второй ствол XM29 — привычная автоматическая винтовка. Но солдат, вооруженный новым оружием, не станет брать вражеские укрепления штурмом, он будет отстреливать противника на расстоянии, вычисляя его окоп или месторасположение.

Винтовка XM29 оснащена магазином с шестью "умными" пулями, каждая из которых способна одновременно уничтожить отделение солдат противника. Бесплезно зарываться в землю — взрыв произойдет над головой. Бесплезно прятаться за угол — взрыв произойдет именно тогда, когда пуля залетит за него.

"Умные пули" XM1018 принадлежат к боеприпасам осколочно-разрывного действия, но могут использоваться и термобарические гранаты (рис. 12). При разрыве таких боеприпасов образуется аэрозольная туча, которая через долю секунды вспыхивает.

"Умная" винтовка XM29 планируется к массовому принятию на вооружение пехоты армии США к 2010 г. в соответствии с программой OFSA (*Objective Family of Small Arms*) по созданию семейства высокоточного личного стрелкового оружия OICW (*Objective Individual Combat Weapon* — целевое индивидуальное боевое оружие).

Из всего изложенного выше с очевидностью следует, что войны будущего не будут такими, какими они представимы сегодня. Не исключено, что это будут "кибервойны", охватывающие гиперпространства, в которых исход боя будут решать не люди, а "умное" оружие. Будущее трудно предугадать точно, но одно уже ясно — войны будущего без электроники непредставимы. На принципиально новом "электронном поле боя" определяющую роль станет играть "интеллектуальное" оружие, основанное на достижениях электронных технологий.

Список использованных источников

1. www.CNews.ru
2. www.popsci.com
3. www.uaunc.edu
4. www.jrtc-polk.army.mil
5. www.darpa.mil
6. www.nvo.ng.ru
7. www.mil.gov.ua
8. Токарев С. Пуле лучше знать, куда лететь... // Компьютерра. 2003. № 13. Май.

УДК 531.787.8

А. В. Ушков¹, Г. А. Исакова², В. Т. Рябов¹, канд. техн. наук,
¹МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

²ФГУП РНИИ КП

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПЕНСАЦИИ ВЫПУКЛЫХ УГЛОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЕМБРАНЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАВЛЕНИЯ С ЖЕСТКИМ ЦЕНТРОМ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ КОН

Предложены механизм подтравливания выпуклых углов в монокристаллическом кремнии ориентации (100) и методика выбора формы и назначения размеров компенсационных структур при производстве чувствительных элементов давления. Достоверность предложенной методики подтверждена экспериментально. Полученные результаты могут быть использованы для формирования необходимой угловой конфигурации не только при изготовлении чувствительных элементов давления, но и в производстве микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Введение

В настоящее время в датчиках давления в качестве первичного преобразователя давления в электрический сигнал широко используются чувствительные элементы (ЧЭ) тензорезистивного типа [1]. Такой чувствительный элемент представляет собой кремниевый монокристалл, в котором методами локального удаления материала сформирована мембранная область с тензорезисторами. Мембрана ЧЭ может быть плоской формы или иметь центральный выступ (жесткий центр). Использование мембраны с жестким центром позволяет получить линейное распределение напряжений в ней и организовать упор, выполняющий функцию защиты от разрушения при перегрузках. Для изготовления чувствительных элементов используются пластины монокристаллического кремния толщиной 380...480 мкм. Толщина мембраны ЧЭ в зависимости от номинального давления варьируется в диапазоне 250...15 мкм.

Для формирования мембраны чувствительного элемента наи-

большее распространение благодаря простоте и воспроизводимости технологии, относительно низкой токсичности и одновременно низкой цене получило анизотропное травление в водном растворе едкого кали [2]. В отличие от изотропных анизотропные травители неодинаково воздействуют на различные кристаллографические плоскости кремния. Скорость химической реакции минимальна в направлении $\langle 111 \rangle$ и максимальна в направлении $\langle 100 \rangle$. После травления пластины ориентации (100) получается канавка, боковые стенки которой ориентированы в плоскости (111), т. е. перпендикулярны направлению, соответствующему наименьшей скорости травления.

Известно, что при анизотропном травлении происходит растравливание внешних углов [3—5], причем форма получаемых мезоструктур зависит от состава травителя, режима травления и ориентации исходной пластины. В результате конфигурация жесткого центра отличается от прямоугольной. При изготовле-

нии кристаллов с тонкой мембраной (15...60 мкм) на малые давления возможно практически полное стравливание жесткого центра (рис. 1). В этом случае прибор оказывается работоспособным, но ухудшается линейность его преобразовательной характеристики и снижается перегрузочная способность. Для получения формы углов, близкой к прямоугольной, в рисунок фотошаблона необходимо вводить фигуры компенсации.

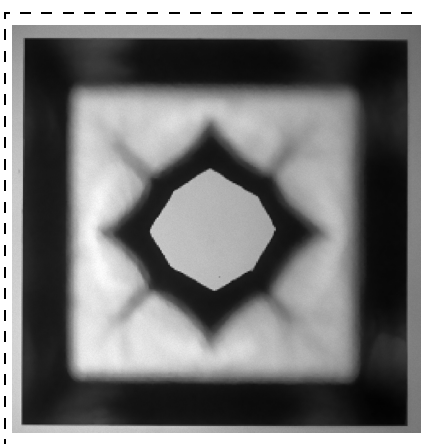


Рис. 1. Конфигурация мембраны чувствительного элемента давления с жестким центром, вытравленной по шаблону без фигур компенсации

Методика проведения эксперимента

В литературе рассматриваются различные формы компенсационных элементов [5—8] и модели, описывающие механизмы подтравливания внешних углов [9—11]. Основные варианты фигур компенсации представлены на рис. 2. Данная работа направлена на выработку единой концепции выбора формы и назначения размеров фигур компенсации.

Для исследований была разработана топология тестового фотошаблона с тремя типами компенсаторов (рис. 2) для пяти толщин мембран (всего 20 вариантов). Размеры фигур выбирались

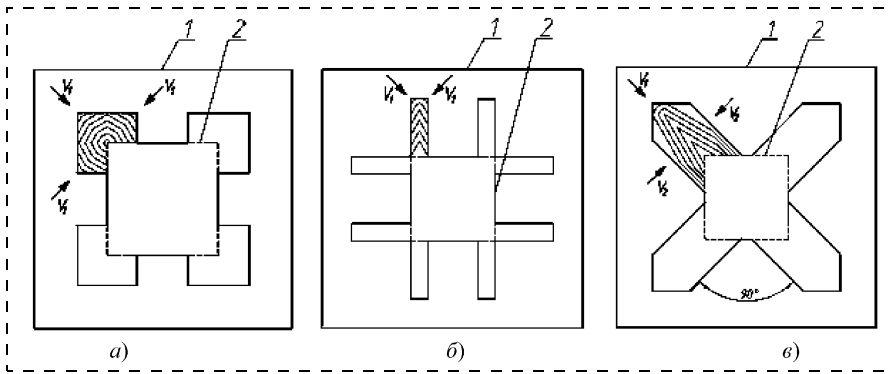


Рис. 2. Варианты исполнения компенсационных элементов и механизм их травления: *a* — компенсатор квадратной формы; *б* — компенсатор в форме полоски; *в* — компенсатор диагонального типа; 1 — внешний контур мембраны ЧЭ на фотошаблоне, 2 — контур жесткого центра

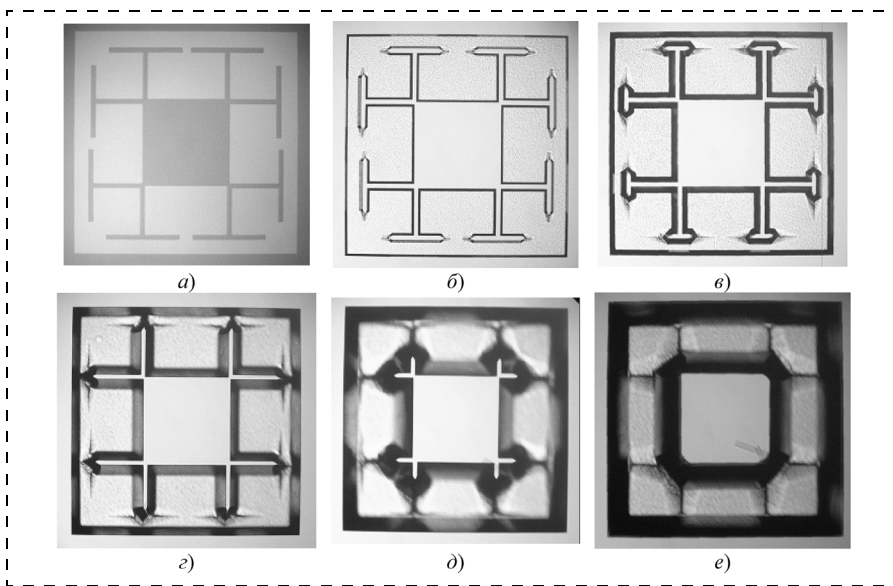


Рис. 4. Динамика травления жесткого центра с компенсаторами в форме полоски. Исходная пластина толщиной 480 мкм (*a*); пластина с мембраной толщиной 435 мкм (*б*); 380 мкм (*в*); 320 мкм (*г*); 200 мкм (*д*); 120 мкм (*е*)

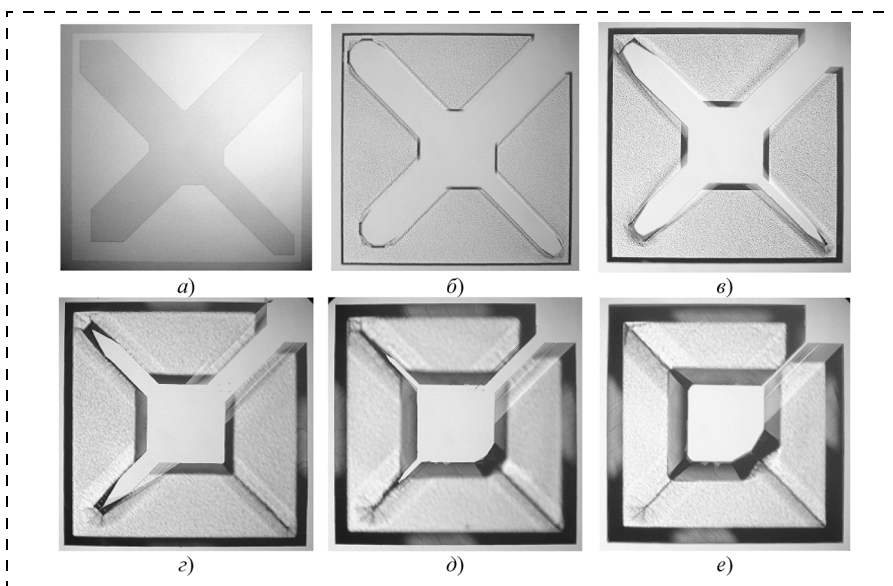


Рис. 5. Динамика травления жесткого центра с диагональными компенсаторами. Исходная пластина толщиной 480 мкм (*a*), пластина с мембраной толщиной 435 мкм (*б*), 380 мкм (*в*), 320 мкм (*г*), 250 мкм (*д*), 200 мкм (*е*)

исходя из результатов травления мембраны по шаблону без компенсаторов. В экспериментах использовались кремниевые пластины марки КЭФ *n*-типа проводимости ($r = 4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), ориентации (100), толщиной 480 мкм и диаметром 100 мм. Травление осуществлялось в 33 %-ном водном растворе КОН в диапазоне температур 70...90 °С с шагом 5 °С. Указанная концентрация травителя и температурный диапазон выбраны на основе исследований качества дна получаемой мембраны и скорости травления [3, 12]. Раствор травителя готовился на основе дистиллированной воды и гранулированного едкого кали и перед травлением выдерживался в течение суток. Концентрация раствора определялась на основе измерения его плотности. Температура травителя во время проведения процесса поддерживалась с точностью $\pm 2^\circ$. Защитной маской служил слой нитрида кремния Si_3N_4 .

Результаты экспериментов

При проведении экспериментов фиксировались скорость травления в направлении $\langle 100 \rangle$, скорости и направления подтравки компенсационных фигур. Фотографии фигур с квадратными компенсаторами приведены на рис. 3 (см. вторую сторону обложки), в форме полоски и диагональных элементов в процессе травления — на рис. 4, 5 соответственно. Схемы травления указанных компенсационных элементов представлены на рис. 2.

Зависимости скорости травления в направлении $\langle 100 \rangle$ и скорости травления компенсатора квадратной формы V_1 от температуры травителя показаны на рис. 6, зависимость скорости травления диагонального компенсатора V_2 от температуры — на рис. 7, зависимости относительных скоростей травления $V_1/V_{\langle 100 \rangle}$ и $V_2/V_{\langle 100 \rangle}$ — на рис. 8. Как видно из графиков, скорости травления возрастают с увеличением температуры раствора. Вместе с тем, соотношения скоростей $V_1/V_{\langle 100 \rangle}$ в диапазоне

температур 75...90 °С имеет достаточно малый разброс, а относительная скорость $V_2/V_{<100>}$ постоянна во всем исследуемом температурном диапазоне. В связи с этим фотошаблон, рассчитанный на конкретный режим травления, можно использовать и для других температур внутри указанного диапазона.

Размеры квадратного компенсатора (рис. 9) должны назначаться следующим образом:

$$b = c = \frac{1}{2}d = \frac{V_1}{V_{<100>}} h_{\text{тр}};$$

$$a = b\sqrt{2},$$

где $h_{\text{тр}}$ — глубина травления пластины, мкм; $V_{<100>}$ — скорость травления в направлении $<100>$, мкм/мин; V_1 — скорость травления компенсатора квадратной формы, мкм/мин.

Если размер $b > c$, то при достижении требуемой толщины мембраны компенсатор до конца не стравливается, а защищаемый угол растравливается. При $b < c$ компенсатор отделяется от жест-

кого центра, а на мембране остается часть неудаленного материала в месте размещения компенсатора.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что наиболее четкие грани углов получаются с компенсаторами диагонального типа. Однако такие компенсаторы не всегда применимы для глубин травления более 150...200 мкм, поскольку в зависимости от размеров мембраны и жесткого центра возможны ограничения на их размер, накладываемые внешними границами контура мембраны (см. рис. 2). Аналогичные ситуации могут возникать и для компенсаторов в форме полоски и квадратной формы, причем у последних происходит их взаимное перекрытие. Для выхода из сложившейся ситуации была применена комбинация двух типов компенсаторов (рис. 10, см. вторую сторону обложки). В этом случае сначала рассчитывается размер компенсаторов квадратной формы исходя из условия неперекрывания, а за-

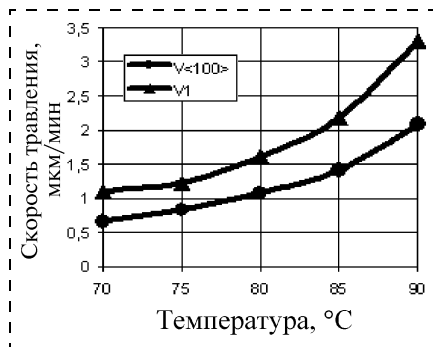


Рис. 6. Зависимости скоростей травления $V_{<100>}$ и V_1 от температуры

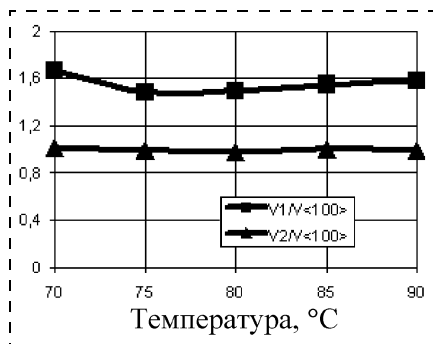


Рис. 8. Зависимости относительных скоростей травления $V_1/V_{<100>}$ и $V_2/V_{<100>}$ от температуры

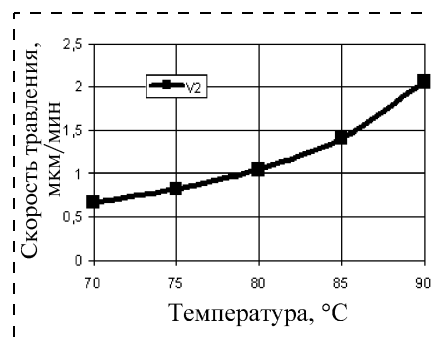


Рис. 7. Зависимость скорости травления V_2 от температуры

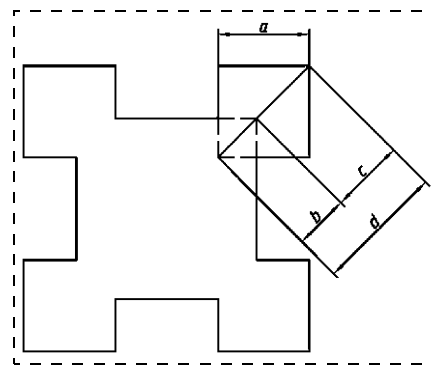


Рис. 9. Методология назначения размеров компенсационной фигуры

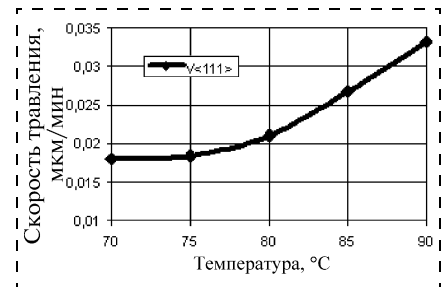


Рис. 11. Зависимость скорости травления $V_{<111>}$ от температуры

тем на недостающую глубину травления применяется компенсатор в форме полоски.

Ширина полоски должна быть не менее 80...100 мкм, поскольку вследствие наличия подтравы в направлении $<111>$ узкие полоски стравливаются задолго до окончания процесса травления и защищаемый ими угол "заваливается". Боковой подтрав следует учитывать и при назначении размеров окна мембраны на фотошаблоне, так как положение тензорезисторов привязано к контуру мембраны.

Выводы

1. Для получения прямоугольной конфигурации жесткого центра на мембране в топологию фотошаблона необходимо вводить компенсирующие фигуры.

2. Наиболее оптимальный результат получается при использовании компенсаторов диагональной формы, но в силу ограничения, накладываемого контуром мембраны, такие компенсаторы не всегда применимы для глубин травления более 200...250 мкм.

3. Для формирования мембран чувствительных элементов толщиной 250...150 мкм следует применять компенсаторы квадратной формы, а для меньших толщин их комбинацию с компенсаторами, имеющими форму полоски.

4. Для повышения производительности процесса изготовления упругих мембран травление следует вести при температуре 85...90 °С.

5. Результаты, полученные в данном исследовании, можно

использовать для получения необходимой угловой конфигурации не только при изготовлении чувствительных элементов давления, но и в производстве микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Список литературы

1. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Ваганов В. И., Гончарова Н. И., Плохова С. С. Исследование зависимости анизотропии скорости травления кремния в водных растворах едкого кали от режима травления // Электронная техника. 1980. Сер. 3. Вып. 2 (86).
3. Ваганов В. И., Поливанов П. П. Локальное анизотропное травление кремния для изготовления интегральных мембранных преобразователей

давления // Электронная техника. 1975. Сер. 11. Вып. 4.

4. Ваганов В. И., Плохова Т. С. Исследование динамики изменения формы фигур анизотропного травления кремния // Электронная техника. 1979. Сер. 3. Вып. 5 (83).

5. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991.

6. Schropfer G., de Labachellerie M., Colette R. Tellier Unconventional Bulk-micromachining using Underetching of {100} Silicon Planes, its Fabrication Tolerances and Application to some MEMS and MOEMS // Proc. Micro Systems Technologies 98, 6th International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical Systems and Components, Potsdam. December 1—3, 1998.

7. Enoksson P. Novel Resonant Micromachined Silicon Devices for Fluid Applications Instrumentation Laboratory Department of Signals // Sensors and Systems. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1997.

8. Long M. K., Burdick J. W., Antonsson E. K. Design of Compensation Structures for Anisotropic Etching, California Institute of Technology, U. S. A. 1998.

9. Schroder H., Obermeier E., Horn A. Convex Corner Undercutting of {100} Silicon in Anisotropic KOH Etching: The New Step-Flow Model of 3-D Structuring and First Simulation Results // Journal of Microelectromechanical systems. March 2001. Vol. 10. N 1.

10. Zhenjun Zhu, Chang Liu. Micromachining Process Simulation Using a Continuous Cellular Automata Method // Journal of Microelectromechanical Systems. June 2000. Vol. 9. N 2.

11. Gosalvez M. A., Nieminen R. M. et al. Anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon: atomistic Monte-Carlo simulations and experiments // Applied Surface Science. 178 (2001). P. 7—26.

12. Gosalvez M. A., Nieminen R. M. Surface morphology during anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon // New Journal of Physics. 2003. N 5. P. 100.

УДК 621.382.049.77 + 531.546.621-31

Е. С. Горнев, д-р техн. наук,
Н. А. Зайцев, д-р техн. наук,
Е. В. Пузикова, А. Я. Сафронов,
ОАО "Элпа", г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО РЕЛЕ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Разработано микроэлектромеханическое реле на основе пьезоэлектрических пленок. Представлены математическая модель и технологический маршрут изготовления устройства.

В последние годы чрезвычайно актуальным стало изучение микромеханических систем, в том числе микромеханических реле. Микроэлектромеханические реле — простые, но важные элементы всех автоматизированных систем. Они используются в интерфейсах между микросистемами и другими приборами, встраиваются в устройства автоматического управления в качестве устройств ввода-вывода, что увеличивает гибкость и расширяемость всей системы в целом [1].

Благодаря прогрессу в области технологий обработки кремния стало возможным изготовление микроэлектромеханических реле, которые обеспечивают ряд преимуществ по сравнению с традиционными реле.

- *Механические реле* плохи из-за короткого срока службы, разрушения электрических контактов и низкой износоустойчивости, что ведет к быстрому выходу их из строя.
- *Реле на кремниевых полевых транзисторах* обладают отличной коммутирующей мощностью на низких частотах, а при повышении частоты этот параметр резко ухудшается.
- *Реле на GaAs (арсенид галлия)-полевых транзисторах* с МОП-структурой затвора и регулируемых диодах работают достаточно хорошо на высоких частотах, но только при небольших амплитудах сигнала (малая мощность). Следовательно, при работе на частоте больше нескольких гигагерц твердотельные реле имеют большие вносимые потери (порядка 1...2 дБ) и низкий коэффициент развязки ($\approx 20...25$ дБ).
- *Электромеханические реле* обладают хорошими высокочастотными характеристиками — низкими вносимыми потерями и высоким коэффициентом развязки обычно вплоть до частоты нескольких сотен мегагерц, но они имеют очень низкое быстродействие.

Микроэлектромеханические же реле не только потребляют меньше электроэнергии, характеризуются более высоким быстродействием и меньшими размерами и массой, но они также имеют высокое отношение импеданса в выключенном и включенном состоянии [2]. По сравнению с полупроводниковыми устройствами, например транзисторами, реле имеют более высокое сопротивление в разомкнутом состоянии. Оно обусловлено гальванической изоляцией, которая обеспечивается

воздушным промежутком между электрическими контактами реле.

Для микроэлектромеханического реле самым критичным узлом является исполнительный элемент, что объясняется его повышенной механической сложностью и подверженностью к износу. Принцип действия исполнительного механизма может быть:

- электростатическим;
- электромагнитным;
- пьезоэлектрическим;
- термическим.

И каждый из этих механизмов имеет свои достоинства и недостатки [3]. Преимущество электростатических исполнительных механизмов заключается в практически полном отсутствии потребления тока, а недостаток — в высоком напряжении срабатывания (обычно 100 В). Достоинство электромагнитных исполнительных механизмов — более низкое напряжение срабатывания, но при высоком потреблении тока. Из-за низкого энергопотребления самым распространенным является электростатический исполнительный механизм.

Рассмотрим реле на основе пьезоэлектрических пленок.

Для многих практических применений важно, чтобы у переключателя были минимальные электрические потери и низкое рабочее напряжение. Чем выше вносимые потери, тем больше потребление энергии и тем хуже коэффициент шума системы. Микрореле на пьезоэлектрических пленках имеют небольшие вносимые потери, уровни напряжения переключения, совместимые с твердотельными переключателями, высокую скорость переключения и хорошую линейность.

Характеристики микрореле на основе пьезоэлектрических пленок

Управляющее напряжение ≥ 5 В;	Сопротивление реле ~ 50 МОм;
Сопротивление в контакте ≤ 1 Ом;	Время переключения < 1 мс;
Межконтактный зазор > 5 мкм;	Сила замыкания контакта > 100 мкН;
Долговечность > 100 млн циклов;	Вакуум < 1 Па.

Конструкция микрореле основывается на гибкой пластине (мембране) и двух опорах [4]. На рис. 1 показан вид электростатического мембранного переключателя.

Мембрана выполняется из слоя пьезокерамики ЦТС $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3$ с нанесенным на него слоем платины, а затем алюминия.

Без подачи напряжения микрореле обладает высоким импедансом благодаря воздушному зазору

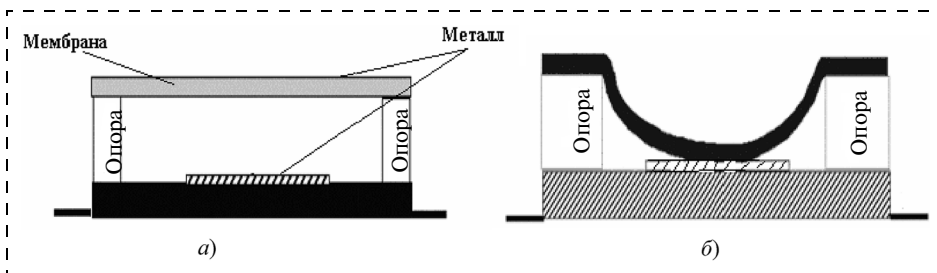


Рис. 1. Схематическое представление микрореле: а) разомкнутое состояние; б) замкнутое состояние

между нижней и верхней металлическими пластинами [5]. При подаче напряжения электростатические силы заставляют мембрану опускаться вниз, и когда разность потенциалов достигает порогового значения, мембрана занимает положение, показанное на рис. 1, б.

Примем обозначения:

P — полное давление на механическую конструкцию микрореле;

g — зазор между мембраной и нижним электродом;

g_0 — первоначальная высота мембраны при отсутствии электрического поля;

V — приложенное напряжение;

ε_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства;

K_s — константа упругости, определяется модулем Юнга и коэффициентом Пуассона мембраны;

E — модуль Юнга;

w, L, t — ширина, длина, толщина балки.

Перемещение мембраны можно найти из уравнения баланса давлений [6]

$$P(g) = K_s(g_0 - g) - \frac{\varepsilon_0 V^2}{2g^2}. \quad (1)$$

Когда подается напряжение, мембрана отклоняется вниз, при этом зазор уменьшается, а электростатическое давление на мембрану увеличивается. При критическом размере зазора g , равном $2/3g_0$, механическая система становится неустойчивой, и мембрана резко падает на нижнюю пластину. Напряжение, при котором происходит падение мембраны, определяется выражением

$$V_p = \left(\frac{8K_s g_0^3}{27\varepsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где

$$K_s = 16Ew(t/L)^3 \quad (3)$$

— константа упругости.

Одним из критичных параметров микроэлектромеханического реле является их скорость переключения. В электростатическом приводе срабатывание устройства происходит резко. Рассчитать время переключения довольно сложно, поскольку

оно зависит от времени падения мембраны из положения равновесия, определяемого пороговым напряжением, до нижнего контакта под действием электростатических сил. Поскольку электростатическая сила увеличивается по мере уменьшения зазора, реальное время движения вниз будет меньше расчетного. Обычно это время составляет 1 мкс.

На рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) показана структура микроэлектромеханического реле, которое использовалось при разработке микропереключателя методом конечных элементов с помощью программного пакета ANSYS [7]. При расчетах для общего описания пьезоэлектрической среды использовались конечные элементы (КЭ) PLANE 13 — четырехугольные элементы, которые применяются для моделирования плоских объектов. Для описания среды других материалов использовались КЭ PLANE 42. В данной работе проводился гармонический анализ (установившиеся колебания и построение АЧХ) [8].

Входной сигнал подавался через внутренний соединительный элемент на нижнюю часть пластины ЦТС. При подаче на управляющий электрод напряжения номиналом ≥ 5 В (в нашем случае $U = 10$ В) между верхним и нижним электродами происходит перераспределение зарядов, приводящее к появлению электростатических сил между поверхностями.

Опоры устройства закреплялись по осям X и Y в целях избежания их деформации при переходе микрореле во включенное состояние.

На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) и рис. 4 представлены конечно-элементное (КЭ) разбиение микрореле и его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ).

В результате расчетов определены тенденции в изменении размеров и формы микроэлектромеханического реле в зависимости от граничных условий (способов закрепления).

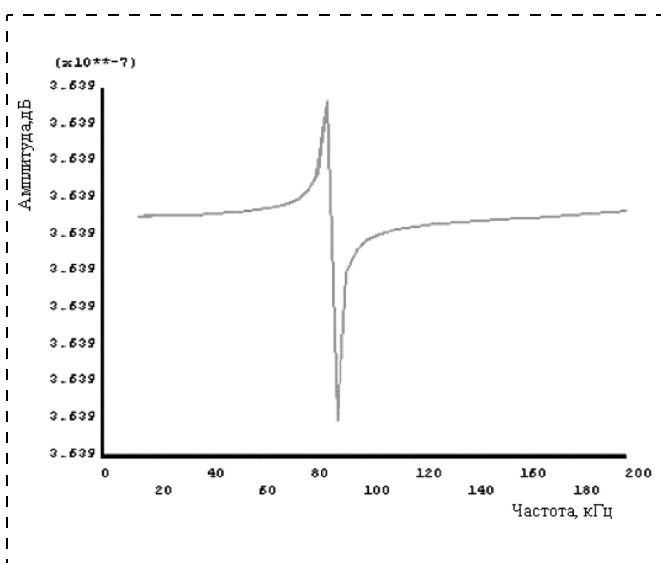


Рис. 4. АЧХ микрореле ($F_{рез} = 89,8$ кГц)

На следующем этапе проводился расчет деформации микрореле на резонансной частоте (рис. 5, см. четвертую сторону обложки) и определение площади контактов (рис. 6, 7, см. четвертую сторону обложки). Верхним электродом служил $AuNi_5$ (золото—никель), поскольку по сравнению с другими материалами он имеет ряд преимуществ.

На $F_{рез} = 89,8$ кГц пластина прогнулась до нижнего контакта, площадь соприкосновения контактов составила 10,5 мкм.

Проведенные расчеты подтверждают, что данная топология наиболее точно отражает принцип работы микроэлектромеханического реле и является основой для дальнейшего анализа и разработки микрореле в трехмерной постановке.

Основные этапы изготовления микрореле:

1. Окисление кремния.
2. Осаждение и формирование W.
3. Химическое осаждение слоя Si_3N_4 из газовой фазы.
4. Нанесение $AuNi_5$ в качестве нижнего электрода.
5. Химическое осаждение слоя Si_3N_4 из газовой фазы для формирования опор балки.
6. Нанесение фоторезистной маски и выполнение ионно-химического травления Si_3N_4 до $AuNi_5$.
7. Нанесение фоторезистной маски и выполнение ионно-химического травления $AuNi_5$ до диэлектрика.
8. Нанесение ФСС (фосфорно-силикатного стекла) в качестве жертвенного слоя.
9. Нанесение платины.
10. Нанесение пленки ЦТС.
11. Нанесение платины.
12. Нанесение слоя SiO_2 для изоляции контактов.
13. Напыление слоя алюминия.
14. Нанесение фоторезистной маски и селективное травление SiO_2 .
15. Нанесение фоторезистной маски и травление ортофосфорной кислотой (H_3PO_4) отверстий в слоях Al, ЦТС и $AuNi_5$.
16. Нанесение фоторезистной маски и травление жертвенного слоя ФСС до верхнего электрода $AuNi_5$.
17. Нанесение фоторезистной маски и травление слоев до нижнего электрода W.
18. Напыление Al.
19. Нанесение фоторезистной маски и травление Al.
20. Химическая обработка (чистка), сушка полученной структуры.
21. Измерение характеристик прибора.

Заключение

Микроэлектромеханические реле являются наиболее распространенными переключающими элементами в современных высокочастотных (ВЧ) интегральных схемах. Современный уровень мик-

ротехнологий позволил добиться следующих преимуществ в их разработке:

- низкие вносимые потери;
- незначительное энергопотребление;
- хороший коэффициент развязки;
- высокая линейность;
- компактность и миниатюрность.

Поэтому микроэлектромеханические реле на кремнии являются весьма перспективными устройствами для создания различных микросистем.

Список литературы

1. **Шурыгина В.** Долгожданные MEMS. Технология малых форм // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2002. № 4.

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

3. **Жуков С.** О пьезокерамике и перспективах ее применения. 2005.

4. **Сигов А. С.** Сегнетоэлектрические тонкие пленки в микроэлектронике // Соросовский Образовательный журнал. 1996. № 10.

5. **Randall J. N., Goldsmith C., Denniston D., Lin T.-H.** Fabrication of micromechanical switches for routing radio frequency signals", *Journal of Vacuum Science Technology*. 1996. B 14 (6). P. 3692—3696.

6. **Muldavin J. B., Rebeiz G.** High isolation CPW MEMS shunt switches, part I: modeling // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2000. 48 (6). P. 1045—1052.

7. **ANSYS.** Theory Reference. Rel. 7.0. / Ed. P. Kohnke. ANSYS, Inc. Houston. 2003.

8. **Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А.** ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

УДК 802.0(075.8)

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

АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

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

S

Sacrificial anode — жертвенный анод. Активный металл или сплав, который гальванически вытравливается и тем самым защищает другой металл или сплав. С последним жертвенный анод электрически связан.

Sacrificial layer — жертвенный (другое название — защитный) слой. Тонкая пленка, которая позже (в ходе технологического процесса) удаляется в целях получения требуемой механической структуры. Травители, используемые для удаления жертвенных (защитных) слоев, должны обладать высокой избирательностью, чтобы удалять только защитное покрытие, почти не оказывая никакого действия на структурный (основной) материал формируемых микроизделий. Примеры жертвенных слоев: SiO₂ в системе поликремний/диоксид кремния; поликремний в системе нитрид кремния/поли-

кремний; SiO₂ в системе вольфрам/диоксид кремния; Al в системе полиимид/алюминий (см. также *Sacrificial Layer Etching* (SLE)).

Sacrificial Layer Etching (SLE) — травление жертвенного слоя (другое название — травление защитного слоя). В этой технологии используется удаление скрытого, быстро протравливающегося слоя, например, для создания свободно перемещаемых структур. Это метод поверхностной микрообработки, при котором промежуточный слой, расположенный между двумя слоями других материалов, селективно протравливается (избирательно удаляется). Обычно селективность травления жертвенного слоя высока: скорость травления этого слоя намного выше скорости травления слоев, расположенных сверху и снизу этого слоя. Целью жертвенного травления является механическое освобождение одного или двух рабочих слоев и даже некоторых микроструктур. Наиболее часто в качестве жертвенного слоя используется диоксид кремния SiO₂.

Scale effect — масштабный эффект, критерий подобия. Философско-физическое понятие. Изменение (например, уменьшение, как бы масштабирование) воздействия разных эффектов на поведение объекта вследствие уменьшения размеров этого объекта. Пример: изменение свойств объекта (например, уменьшение некоторых характеристик этих свойств) вследствие изменения (например, уменьшения) размеров этого объекта. Требуется пояснение. Объем объекта пропорционален своему измерению (своему размеру), возведенному в третью степень. В то же время площадь поверхности объекта пропорциональна размеру объекта, возведенному во вторую степень. В результате эффект поверхностных сил (другими словами, поверхностные силы) становится больше, чем усилие тела, развиваемое на микроскопическом уровне.

Например, доминирующей силой в движении микроскопических объектов является не инерционная сила, а электростатическая сила или сила вязкости. Свойства вещества микроскопических объектов также подвержены влиянию внутренней структуры вещества и размеров поверхности этого вещества. В результате значения характеристик (свойств) микроскопических объектов иногда отличаются от свойств основной массы вещества в макроскопическом мире. Фрикционные свойства трения в микромире значительно отличаются от таких же свойств макромира (см. также *Microtribology*). Следовательно, масштабные эффекты (скорее, микромасштабные эффекты) должны быть тщательно рассмотрены при проектировании микроизделий; им следует уделять максимальное внимание при разработке МЭМС и НЭМС.

Scaling — масштабирование, пропорциональное уменьшение размеров; параметр масштабируемости микросистемы, который можно определить как $Sc = -(d\eta/dV)$, где η — выходной энергетический параметр микросистемы; V — объем ее активных элементов. Если энергетические показатели микросистемы улучшаются при ее микроминиатюризации, параметр Sc увеличивается с уменьшением объема активных элементов (микросистема считается хорошо масштабируемой). Если параметр Sc не возрастает при меньших объемах, то это говорит о том, что микросистема слабо поддается масштабированию. Другой вариант: метод уменьшения размеров имеющегося кристалла микроизделия посредством выборочного сжатия по координате X и/или Y . Уменьшение размеров биполярных и полевых МОП-приборов (масштабирование) для повышения плотности их компоновки может быть достигнуто различными путями. При этом основной задачей становится сохранение первоначальных характеристик приборов. Принципы масштабирования для биполярных приборов основаны на оптимизации произведения мощности на задержку сигнала для конкретной биполярной схемы. При уменьшении горизонтальных размеров биполярных схем с заданным коэффициентом вертикальные размеры приборов (т. е. толщина эпитаксиального слоя, ширина базовой области, глубина эмиттерной области) уменьшаются примерно с тем же коэффициентом, а плотность тока возрастает почти пропорционально квадрату этого коэффициента. При уменьшении размеров приборов эффекты, связанные с высоким уровнем легирования, такие как сужение ширины запрещенной зоны, становятся более существенными как для базовой, так и для эмиттерной области. Рабочее напряжение при уменьшении размеров биполярных приборов остается почти неизменным, поскольку напряжение включения p — n -переходов относительно не чувствительно к геометрии приборов и уровню легирования. Миниатюризация полевых МОП-транзисторов при уменьшении физических размеров этих приборов на масштабный коэффициент K имеет

следующие особенности. Для того чтобы при уменьшении размеров прибора сохранить внутренние электрические поля на том же уровне, необходимо понизить рабочие напряжения также на коэффициент K . Такие физические размеры, как толщина оксида, длина затвора, ширина транзистора и глубина перехода, уменьшаются пропорционально K . Напряжение питания при уменьшении размеров элементов приборов обычно остается прежним.

Scanning Electron Microscope (SEM) — растровый электронный микроскоп. Микроскоп, который сканирует исследуемый образец электронным лучом. Измеряет интенсивность квантов, испускаемых образцом. Это могут быть вторичные электроны, отраженные электроны и т. д. Преобразует измеренную интенсивность в электрический сигнал. Предназначен для определения геометрических характеристик анализируемых микроизделий — резкость границ топологических рисунков, расстояние между элементами микроизделий, степень рассовмещения и т. д. По сравнению с оптическими микроскопами характеризуется более высокими пространственным разрешением и глубиной резкости, а также возможностью проведения химического анализа на основе регистрации спектра рентгеновского излучения, генерируемого при облучении поверхности образца электронным пучком. Схема действия растрового электронного микроскопа: электроны, испускаемые электронной пушкой (нить накала обычно из вольфрама), ускоряются до энергии 2—40 кэВ; набор магнитных линз и отклоняющих катушек сканирования формирует электронный пучок малого диаметра, разворачиваемый в растр на поверхности образца. При облучении этой поверхности электронами возбуждаются три типа излучения, несущего полезную информацию: рентгеновские лучи, вторичные электроны и отраженные (обратнорассеянные) электроны.

Scanning Probe Microscope (SPM) — сканирующий зондовый микроскоп. Любой микроскоп, который использует зонд с наконечником атомных размеров. Проводится сканирование зондом в растре близ поверхности исследуемого образца. Для получения изображения осуществляется измерение физических величин между зондом и исследуемой поверхностью (см. также *Scanning Tunneling Microscope*).

Scanning Tunneling Microscope (STM) — сканирующий туннельный микроскоп. Микроскоп, который измеряет микроскопические размеры по принципу сохранения постоянным туннельный ток между зондом и исследуемым образцом (пока осуществляется сканирование растра зондом). По сути, это метод исследования электронных состояний поверхности и характеристик туннельного тока между образцом и наконечником сканирующего зонда. Разработан ряд методов измерения текущих характеристик туннельного тока сканирующего туннельного микроскопа. Типичным методом является метод биполярного туннелирования элект-

рона, который устанавливает напряжение смещения образца в положительную или отрицательную сторону; сканирует только единожды. Другой метод представляет собой туннельный электронный метод спектроскопии. Он останавливает перемещение зонда на каждом пикселе в течение сканирования, измеряет приложенное напряжение и измеряет текущие характеристики туннельного тока. Оба метода могут описывать электронные состояния на поверхности исследуемого образца с высоким разрешением. Микроскоп изобретен в 1982 г. Г. Биннигом (Германия) и Г. Рорером (Швейцария). Он представляет собой систему "исследуемый образец + острое (игла)", к которым приложена разность потенциалов. Электроны из образца туннелируют на иглу, создавая таким образом туннельный ток. Сила этого тока значительно зависит от расстояния образец—игла. Возможны два режима: 1) измерение туннельного тока и поддержание сверхмалого расстояния от острия до поверхности образца; в процессе сканирования игла движется вдоль образца, и сила тока меняется в зависимости от топографии поверхности; 2) измерение изменения в положении острия (т. е. расстояние до поверхности образца) при постоянном туннельном токе; изменения фиксируются, и на их основе строится карта высот. Второй режим используется чаще. Все сканирующие туннельные микроскопы можно разделить на две основные группы: работающие на воздухе (или в другой среде) и работающие в условиях сверхвысокого вакуума. Выделяют также низкотемпературные сканирующие туннельные микроскопы, предназначенные для работы в условиях криогенных температур. Ограничения на использование метода накладываются, во-первых, условием проводимости образца (поверхностное сопротивление должно быть не больше 20 МОм/см^2), во-вторых, условием, чтобы глубина канавки была меньше ее ширины, поскольку в противном случае может наблюдаться туннелирование с боковых поверхностей. Сканирующая туннельная спектроскопия (STS) оказывает значительное влияние в исследовании МЭМС, НЭМС, сверхпроводников и т. д.

Schottky contact — контакт Шоттки (другое название — выпрямляющий контакт). Контакт, который можно создать прямым соединением металла с полупроводником. Такой контакт не допускает двухстороннее свободное протекание тока или перенос через контакт силицидов металла (пример силицида — TiSi_2). Свойства контакта Шоттки определяются свойствами основных носителей тока в полупроводнике и используются при создании выпрямителей тока в форме диодов Шоттки.

Schottky defect — дефект Шоттки. Представляет собой потерянный атом в кристаллической решетке полупроводника. Понятие известно как "вакансия". Другими словами, недостающий в кристаллической решетке атом создает вакансию, назы-

ваемую дефектом Шоттки. Рассматривается как точечный дефект.

Schottky diode — диод Шоттки. Полупроводниковый диод. Обладает более низким падением напряжения при прямом включении, чем обычные диоды. В то время как обычные кремниевые диоды имеют прямое падение напряжения около $0,6\text{--}0,7 \text{ В}$, применение диодов Шоттки позволяет снизить это значение до $0,2 \text{ В}$. Но, к сожалению, данное прямое падение напряжения присуще только диодам Шоттки с максимальным обратным напряжением, примерно равным десяткам вольт. При более высоком падении напряжения диод Шоттки становится сравнимым с обычными кремниевыми диодами, что ограничивает его применение. Диоды Шоттки используют переход металл—полупроводник в качестве барьера Шоттки (вместо $p\text{--}n$ -перехода, как у обычных диодов). Барьер Шоттки также имеет меньшую электрическую емкость перехода, что позволяет заметно повысить рабочую частоту. Это свойство используется в современных интегральных микросхемах, где диодами Шоттки шунтируются переходы транзисторов логических элементов.

Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) — масс-спектроскопия вторичных ионов. Один из методов контроля и диагностики, применяемых в технологии МЭМС и НЭМС. Предназначен для определения химического состава вещества (для определения химических примесей). Химическими веществами, присутствие которых необходимо контролировать при таких исследованиях, являются легирующие примеси в кремнии (As, P, B), а также примеси O, C, следы резиста, различные компоненты металлизации и металлические примеси. Это целый спектр химических элементов — от легких до тяжелых (Pt, Au, W). Суть метода заключается в следующем. На поверхность исследуемого твердого тела падают быстрые ионы. При этом происходит выбивание атомов и молекул исследуемого материала как в нейтральном виде, так и в заряженном состоянии (в виде положительных и отрицательных ионов). Эти ионы называются вторичными. Далее проводят масс-спектроскопические исследования числа вторичных ионов определенного сорта. Другими словами, в методе масс-спектроскопии вторичных ионов материал с поверхности образца распыляется ионным пучком. Образующиеся при распылении ионные компоненты регистрируются и анализируются по массе. Изложим подробнее. Источник ионов формирует ионный пучок, который развертывается в растр на поверхности образца и распыляет материал с этой поверхности. Ионизированные компоненты распыленного вещества анализируются по массе. Результаты анализа отображаются в виде силы тока вторичного ионного пучка в зависимости от массы иона или двумерного изображения распределения вторичного пучка по массе ионов. Проведение анализа этим методом в сочетании с ионно-плаз-

менным травлением поверхности позволяет регистрировать профили распределения примесей по глубине образца. Применяются как положительно, так и отрицательно заряженные первичные ионы с энергией 5—15 кэВ. Обычно применяются первичные пучки положительных ионов цезия (он обеспечивает высокий выход отрицательных ионов электроотрицательных компонентов мишени), а также пучки ионов O_2^+ (они обеспечивают высокий выход положительных ионов электроположительных компонентов мишени). При исследованиях методом SIMS можно обеспечить разрешение в плоскости до 0,5 мкм. Это позволяет анализировать отдельные топологические элементы МЭМС. Определяемые методом SIMS минимальные содержания примесей в кремнии (cm^{-3}): $H = 5 \cdot 10^{18}$; $O = 15 \cdot 10^{17}$; $P = 5 \cdot 10^{15}$; $As = 5 \cdot 10^{14}$; $B = 1 \cdot 10^{13}$. Для количественных исследований используются эталоны.

Secondary structure of protein — вторичная структура белка. Укладка полипептидной цепи в альфа-спиральные участки и бета-структурные образования (слои). В образовании вторичной структуры белка участвуют водородные связи. Объект для исследований в нанобиоинформационных технологиях.

Selective etching — селективное травление. Травление одного материала без удаления другого. Селективность (избирательность) травления определяется как отношение скоростей травления различных материалов. При сухом (плазменном) травлении главными факторами, определяющими селективность и скорость травления, являются: энергия и угол падения ионов; состав рабочего газа; давление, плотность мощности и частота; скорость потока; температура; нагрузочный эффект. Процессы травления, применяемые для переноса рисунков в технологии МЭМС, должны быть в высокой степени селективными. Низкая селективность травления — 2:1, высокая селективность травления — это 30:1.

Selectivity — селективность. В МЭМС — это способность сенсора измерять только одну физическую величину. В случае с химическим сенсором — это способность определять только отдельный химический элемент.

Self-assembly — самосборка. Процессы сборки (монтажа) МЭМС можно разделить на два этапа: перенос микроструктур с донорской подложки и самосборка. В процессе самосборки могут использоваться силы различной природы. Наиболее широко применяются капиллярные силы. Технологию самосборки с использованием капиллярных сил можно проиллюстрировать следующим примером. Подложка и компоненты, которые необходимо смонтировать на ней, имеют гидрофобные связующие участки. Топология этих участков сформирована с помощью фотолитографии, причем

связующий участок может не покрывать всей поверхности отдельно взятого компонента. На связующий участок напыляют золото. На покрытые золотом участки осаждается самособирающаяся гидрофобная пленка (например, монослой алканэтинола). После осаждения монослоя подложка погружается в воду. Поверхность воды покрыта тонкой пленкой гидрофобного жидкого адгезива. При погружении подложки адгезив избирательно покрывает связующие участки этой подложки. При погружении в воду компонентов, подлежащих монтажу на подложке, их гидрофобные связующие участки приходят в контакт с покрытыми адгезивом участками подложки. При этом ориентация компонентов относительно подложки происходит спонтанно и обусловлена минимизацией свободной поверхностной энергии на границах раздела адгезив—вода и монослой—вода. Точность угловой ориентации составляет до $0,3^\circ$. Чтобы избежать склеивания компонентов между собой, адгезивом покрываются только связующие участки подложки. Для этого монтируемые на подложке компоненты вводятся под поверхность воды. Делается это, например, с помощью пипетки, чтобы миновать слой адгезива, покрывающий поверхность воды. Фиксирование (закрепление) компонентов на подложке осуществляется путем отверждения адгезива с помощью тепловой энергии или УФ излучения. После этого изделие может быть извлечено из воды. Адгезив должен иметь высокую поверхностную энергию раздела с водой. Другая технология самосборки основана на распознавании формы, что возможно при наличии у соединяемых между собой компонентов комплементарных (взаимосоответствующих) по форме поверхностей. Для соединения (крепления) компонентов используется припой. Поэтому данная технология получила название *shape-and-solder-directed self-assembly* — самосборка, основанная на распознавании формы и пайке. Процесс состоит из двух этапов: сборки микроизделия и кремниевого носителя; сборки кремниевого носителя (с закрепленным в нем микроизделием) и защитной крышки. На первом этапе микроизделие закрепляется с помощью припоя в пирамидальном углублении кремниевого носителя. Это углубление получают с помощью анизотропного травления. Наружная поверхность кремниевого носителя имеет пирамидальную форму, что обеспечивает в дальнейшем взаимное геометрическое распознавание носителя и крышки на втором этапе сборки, поскольку крышка тоже имеет комплементарную пирамидальную форму и специальное углубление. Сборка инициируется путем создания турбулентного течения в растворе этиленгликоля. В него погружены кремниевые носители и микроизделия. Для создания турбулентных потоков используется поршневой насос. Температура поддерживается на уровне температуры жидкого припоя. Используют припой с температурой плавления до $197^\circ C$ (соответствует температуре

кипения этиленгликоля). После завершения первого этапа сборки в раствор добавляются крышки. Каждая крышка имеет пять участков, покрытых пленкой припоя. Четыре участка служат для закрепления электрических выводов кремниевого носителя, пятый участок, расположенный в центре на дне углубления в крышке, — для закрепления опорного элемента микроизделия.

Self-heating — самонагревание. Явление, при котором вещество (радиоактивное) разогревает само себя за счет поглощения энергии, выделяемой внутри этого вещества.

Semiconductor — полупроводник. Неметаллический материал, например кремний. Материал, который имеет способность создавать проводящее электричество в зависимости от примесей. Полупроводники — материалы, которые используются для создания конструкций самых современных электронных приборов. Кремний — наиболее широко используемый полупроводник. Есть и другие: германий Ge, арсенид галлия GaAs, фосфид индия InP. Другими словами, полупроводник — материал, электрические свойства которого в сильной степени зависят от концентрации в нем химических примесей и внешних условий (температуры, излучения и пр.). Полупроводниками являются вещества, ширина запрещенной зоны которых составляет 0—6 эВ, например, алмаз можно отнести к широкозонным полупроводникам, а InAs — к узкозонным. В зависимости от того, отдает ли примесь электрон или захватывает его, примесь называют донорной или акцепторной. Свойство примеси может меняться в зависимости от того, какой атом в кристаллической решетке она замещает, в какую кристаллографическую плоскость встраивается. Наиболее дешевый способ промышленного получения монокристаллического технологического кремния — метод Чохральского. Для очистки технологического кремния используют также метод зонной плавки.

Sensitivity — чувствительность. Это минимальный входной сигнал, необходимый для генерации измеряемого выходного сигнала, имеющего определенное отношение сигнал—шум, или изменение выходного сигнала сенсора в ответ на изменение входного сигнала (по всему полному диапазону сенсора). Изменение параметров окружающей среды вокруг сенсора приводит к изменениям внутри него, и чувствительность показывает способность сенсора детектировать эти изменения. Для некоторых сенсоров чувствительность используется в качестве изменений параметров ввода для создания изменений параметров на выходе.

Separation by Implantation of Oxygen (SIMOX) — разделение имплантацией кислорода. Широко применяемая технология изготовления кремниевых микроструктур. Здесь используется диоксид кремния, сформированный путем имплантации кислорода при высоких температурах в кремниевую подложку. Цель технологии — создание в

кремнии диэлектрических микрообластей SiO₂, но не на поверхности Si, а внутри него. Атомы кислорода с помощью ионной имплантации словно "застреливаются" сразу непосредственно на нужную глубину в подложку кремния, оставляя над созданной таким образом областью SiO₂ "нетронутый" монокристаллический кремний. Разработанная IBM (США) эта уникальная технология обеспечивает высококачественное соединение областей Si—SiO₂. Внутри кремния формируется что-то вроде скрытых слоев из SiO₂.

Shape memory alloy — сплав памяти формы. Сплав может вернуть свою первоначальную форму после деформации, которая произошла вследствие изменения температуры. Обычно такие сплавы могут возвращаться в первоначальное состояние при деформации вплоть до 8 %. Микроизделия из сплавов находятся в деформированном состоянии, пока нагреты до температуры выше температуры трансформации; при снижении температуры микроизделия возвращаются к исходной форме тела. Известны следующие сплавы памяти формы: сплав Ti—Ni; Au—Cd; Ag—Cd; Cu—Au—Zn и др. Сплавы памяти формы используются в микроактюаторах как структурный материал благодаря своим уникальным металлическим свойствам, большой деформации и силе, генерируемой при восстановлении первоначальной формы. Применяются, например, для увеличения степени свободы перемещения медицинских эндоскопов в инвазивной микрохирургии. Перспективный пленочный материал для микромашин (см. также *Shape memory alloy actuator*).

Shape memory alloy actuator — актюатор сплава памяти формы. Актюатор, который использует в качестве исполнительного механизма сплав памяти формы. Имеет следующие достоинства: компактность, легкость, относительно высокое выходное усилие. Управление данным микроактюатором можно осуществлять в соответствии с циклом нагрева микроустройства либо простым переключением электрического тока через сам микроактюатор. Примеры актюаторов: микрозахваты для управления клетками; микроклапаны для регуляции очень маленьких потоков жидкости; активные эндоскопы для медицинского использования.

Shape memory effect — эффект памяти формы. Механизм, по которому объект, пластически деформированный при низкотемпературных мартенситных условиях, восстанавливает свою первоначальную форму при нагреве и снятии внешней нагрузки. Мартенситное превращение — полиморфное превращение, при котором изменение взаимного расположения составляющих кристалл атомов происходит путем их упорядоченного перемещения, причем относительные смещения соседних атомов малы по сравнению с межатомным расстоянием. Перестройка кристаллической решетки в микрообластях обычно сводится к деформации ее ячейки, и конечная фаза мартенситного превра-

щения — однородно деформированная исходная фаза. Деформация мала (~1—10 %) и соответственно мал, по сравнению с энергией связи в кристалле, энергетический барьер, препятствующий однородному переходу исходной фазы в конечную. Мартенсит — структура кристаллических твердых тел, возникающая в результате сдвигового бездиффузионного полиморфного превращения при охлаждении. Назван по имени немецкого металлведа Мартенса (1850—1914 гг.).

Shape memory polymer — полимер памяти формы. Полимер, который восстанавливает свою первоначальную форму после деформирования при нагреве либо иным воздействием. Для обладания эффектом памяти формы полимер должен иметь смешанные области: связанную или частично кристаллизованную фиксированную фазу и так называемую обратную фазу. Запоминание и восстановление формы проходит через следующие этапы. Полимер выдерживают при температуре выше определенной для смягчения как фиксированной, так и обратной фазы. Затем, удерживая полимер в одной форме (первичная форма), температуру понижают для замораживания фиксированной фазы, в то время как обратная фаза остается размягченной, сохраняя таким образом первичную форму. Затем полимер деформируется в другую (вторичную) форму внешней силой и охлаждается, приводя к замораживанию обратной фазы и сохраняя вторичную форму. В данном состоянии вторичная форма сохраняется, если даже внешнюю нагрузку убрать. Сохраненная первичная форма восстановится, если полимер нагреть до температуры, при которой только обратная фаза размягчена. Поскольку восстановление формы возможно размягчением с помощью нагрева, генерируемая сила ограничена. Некоторые полимеры восстанавливают форму не только вследствие нагрева, но и при изменении pH, электрическим или световым импульсом. Полимеры памяти формы изготавливают из полиэстера, полиуретана, сополимера бутадиена и стирола, трансполиизопрена.

Sheet resistance — поверхностное сопротивление. Характеристика вещества, сформированного таким образом, что его сопротивление изменяется как функция его поперечного сечения. Поверхностное сопротивление слоя равно сопротивлению, разделенному на толщину материала. Удельное поверхностное сопротивление R , выражаемое в омах, является, таким образом, сопротивлением квадратного участка слоя независимо от размеров квадрата. $R = \rho/d$, где ρ [Ом·см] — удельное объемное сопротивление материала области (слоя), d — толщина слоя [см].

Shim — шимм, прокладка, прослойка. Тонкая клиновидная часть вещества, применяемая для закупоривания микротрещин и получения плоской поверхности.

Shredinger Wave Equation (SWE) — волновое уравнение Шредингера. Важнейшее отношение в

квантовой механике. Характеризует энергетическое состояние электронов. Это уравнение предложено австрийским физиком Эрвином Шредингером в 1925 г. Описывает пространственно-временную зависимость в квантово-механических системах. Играет огромную роль в квантовой механике, по аналогии со вторым законом Ньютона в классической механике. По сути описывает вероятность нахождения частицы в заданной точке пространства и в общем случае имеет вид

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) + E_p(\mathbf{r}) \Delta \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \Psi(\mathbf{r}, t),$$

где i — мнимая единица; t — время; $\frac{\partial}{\partial t}$ — частная

производная по t ; $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h — постоянная Планка;

$\Delta \Psi(\mathbf{r}, t)$ — волновая функция в точке $\mathbf{r}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ в момент времени t ; m — масса частицы; $E_p(\mathbf{r})$ — потенциальная энергия частиц в точке $\mathbf{r}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$; Δ — оператор Лапласа, который в частном случае декартовых координат имеет вид

$$\Delta \equiv \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + \dots + \frac{\partial^2}{\partial x_n^2}.$$

Shrinkage — масштабирование; пропорциональное уменьшение размеров (см. также *Scaling*).

Signal-to-Noise Ratio (SNR) — коэффициент сигнал—шум. Отношение выходного сигнала к входным сигналом к выходному сигналу без входного сигнала. Отношение средней мощности компоненты информационного сигнала к средней мощности шумовой компоненты в сигнале, состоящем из суммы компоненты информационного сигнала и сокомпоненты, поврежденной шумом. Это безразмерная величина. Коэффициент бывает взвешенный (измеряемый в соответствии с кривой чувствительности человеческого слуха) и невзвешенный (как есть).

Silane (SiH₄) — силан. Химическая формула — SiH₄. Силан — это самовоспламеняющийся, токсичный газ с предельно допустимой концентрацией загрязнений в воздухе производственного помещения 5 ‰. Силан широко используется для осаждения пленок, содержащих кремний в различных процессах химического осаждения из газовой фазы. Другое название — моносилан.

Silicide — силицид. Соединение металла и кремния. Силицид можно сформировать термической реакцией различных металлов с кремнием. Широко используется в качестве контактов кремния с проводниками.

Silicon — кремний. Атомный символ Si. Кремний — 14-й элемент периодической таблицы Д. И. Менделеева. Атомный вес 28,0855 а. е. м. (г/моль). Кремний относится к IV группе элементов и является полупроводником при комнатной

температуре с шириной запрещенной (энергетической) зоны 1,1 эВ. Кремний — самый широко используемый материал в полупроводниковой промышленности. Получение высокочистого полупроводникового материала достигается методом Чохральского или методом зонной плавки. Кремний широко используется в таких формах: монокристаллический; поликристаллический; аморфный; нитрид кремния; оксид кремния. Кремний имеет плотность 2,33 г/см³, теплопроводность 149 Вт/(м · К), температура плавления 1688 К.

Silicon dioxide — диоксид кремния. Химическая формула SiO₂. Изолятор с диэлектрической постоянной 3,9 и электрическая прочность диэлектрика (5—15) · 10⁶ В/см. Термодинамически стабилен на кремнии до температуры плавления кремния. Аморфное соединение кремния и кислорода с показателем преломления 1,46, точкой плавления ~1700 °С, шириной запрещенной (энергетической) зоны 8,1 эВ.

Silicon fusion bonding — кремниевое соединение методом сплавления. Технология объединения гидрофилизированных подложек, сделанных из Si, окисленного кремния и т. д. первичной водородной связью между поверхностями и затем связи Si—O—Si после отжига при высокой температуре (см. также *Fusion bonding*). Кремниевое соединение методом сплавления используется для формирования примесных диффузионных слоев или слоев изоляции внутри подложки посредством соединения двух кремниевых пластин, одна или обе из которых окислены (оксидированы). Технология также используется для соединения подложек, которые содержат примеси разных типов или имеют разную концентрацию, как альтернативный процесс примесной диффузии с коррекцией по глубине или эпитаксиального роста, где требуются высокие температуры и процессы, продолжительные по времени. Главная проблема данного метода в том, что это высокотемпературный процесс, все низкотемпературные процессы могут быть только после сплавления. В настоящее время исследователи ищут способы понижения температуры процесса с помощью использования обработки плазмой перед соединением и применения технологии соединения не кремниевых материалов. Также может быть получено соединение оксидированных подложек, кремний-на-изоляторе, при котором слой изоляции как бы зажат между двумя кремниевыми подложками. Структуры кремний-на-изоляторе используются для отделения интегральных элементов оксидом или другими диэлектриками для улучшения функциональных характеристик, например, в производстве матриц фотодиодов и т. д. Другое применение технологии — это соединение подложек, которые были просверлены или в них были вырезаны канавки, для получения точных структур, выполненных внутри подложки. Таким образом изготавливают сенсоры давления, тепло-

обменники в лазерных диодах с внутренней охлаждающей структурой и т. д.

Silicon nitride — нитрид кремния. Химическая формула Si₃N₄. Изолятор с диэлектрической постоянной 7,5. Используется как барьерный материал в процессах полупроводникового производства. Соединение, сформированное из кремния и азота, осаждается и травится для получения маскирующего слоя, требуемого для последующей высокотемпературной обработки, такой как окисление.

Silicon on Insulator (SOI) — кремний-на-изоляторе (КНИ). КНИ — технология изготовления полупроводниковых приборов, основанная на использовании трехслойной подложки со структурой кремний—диэлектрик—кремний. Кроме собственно наименования технологии термин "кремний-на-изоляторе" также часто употребляется в качестве названия поверхностного слоя кремния в КНИ-структуре. Подложка, выполненная по технологии кремний-на-изоляторе, представляет собой трехслойный пакет, который состоит из монокристаллической кремниевой пластины, диэлектрика и размещенного на нем тонкого поверхностного слоя кремния. В качестве диэлектрика может выступать диоксид кремния SiO₂ или, гораздо реже, сапфир (в этом случае технология называется "кремний-на-сапфире", или КНС). Дальнейшее производство полупроводниковых приборов с использованием полученной подложки по своей сути практически ничем не отличается от классической технологии, где в качестве подложки используется монокристаллическая кремниевая пластина. В настоящее время наиболее распространены КНИ-подложки, где в качестве изолятора выступает диоксид кремния. Подложки могут быть получены следующими основными способами: ионным внедрением, сращиванием пластин, управляемым сколом и эпитаксией. Технология ионного внедрения также известна как ионная имплантация, имплантация кислорода, ионный синтез захороненных диэлектрических слоев и SIMOX (*Separation by Implantation of Oxygen*). При использовании данной технологии монокристаллическая кремниевая пластина подвергается интенсивному насыщению кислородом путем бомбардировки поверхности пластины его ионами с последующим отжигом при высокой температуре, в результате чего образуется тонкий поверхностный слой кремния на слое оксида. Глубина проникновения ионов примеси зависит от уровня их энергии, а поскольку технология КНИ подразумевает достаточно большую толщину изолирующего слоя, то при производстве подложек приходится использовать сложные высокоточные ускорители ионов кислорода. Это обуславливает высокую цену подложек, изготовленных по этой технологии, а большая плотность дефектов в рабочих слоях является серьезным препятствием при массовом производстве полупроводниковых приборов. При использовании технологии сращивания пластин (*wafer bonding*) поверхностный слой образуется путем прямого сра-

сшивания второй кремниевой пластины со слоем диоксида. Для этого гладкие, очищенные и активированные за счет химической или плазменной обработки пластины подвергаются сжатию и отжигу, в результате чего на границе пластин происходят химические реакции, обеспечивающие их соединение. Данная технология практически идеальна для изготовления КНИ-подложек с толстым поверхностным слоем, но с его уменьшением начинает нарастать плотность дефектов в рабочем слое, а кроме того, усложняется технологический процесс и, как следствие, растет стоимость готовых изделий. В результате подложки с толщиной поверхностного слоя менее 1 мкм, которые наиболее востребованы при производстве быстродействующих схем с высокой степенью интеграции, имеют тот же набор недостатков, что и подложки, изготовленные по технологии ионного внедрения. Технология управляемого скола, или Smart Cut™, разработанная французской компанией Soitec, объединяет в себе черты технологий ионного внедрения и сращения пластин. В данном технологическом процессе используются две монокристаллические кремниевые пластины. Первая пластина подвергается термическому окислению, в результате чего на ее поверхности образуется слой диоксида, затем верхняя лицевая поверхность подвергается насыщению ионами водорода с использованием технологии ионного внедрения. За счет этого в пластине создается область скола, по границе которой пройдет отделение оставшейся массы кремния. По завершении процедуры ионного внедрения пластина переворачивается и накладывается лицевой стороной на вторую пластину, после чего происходит их сращивание. На завершающей стадии происходит отделение первой пластины, в результате которого на поверхности второй остается слой диоксида и тонкий поверхностный слой кремния. Отделенная часть первой пластины используется в новом производственном цикле. Производство КНИ-подложек по технологии управляемого скола требует большого числа операций, но в его процессе используется только стандартное оборудование. Кроме того, важным достоинством пластин, полученных по этой технологии, является низкая плотность дефектов в рабочем слое. В случае использования эпитаксиальной технологии (*seed method*) поверхностный слой образуется за счет выращивания кремниевой пленки на поверхности диэлектрика. Активные элементы, полученные на таких подложках, демонстрируют отличные рабочие характеристики, но большое число технологических проблем, связанных с эпитаксиальным процессом, пока еще не дает возможностей для массового внедрения этой технологии.

Silicon on Sapphire (SOS) — кремний-на-сапфире. Быстрая МОП-технология, при которой кремний эпитаксиально выращивается на сапфировой подложке и затем вытравливается между транзисторами. Каждое устройство, таким образом, изо-

лируется либо воздухом, либо оксидом от других устройств.

Silicon tetrachloride — тетрахлорид кремния. Химическая формула SiCl_4 . Это коррозионное вещество с острым, удушающим запахом. Используется в процессе химического осаждения из газовой фазы нитрида кремния и эпитаксиальных пленок кремния.

Simulation — моделирование, симулирование. Использование САПР устройств для имитации поведения реальных микросхем и микроустройств с помощью наборов различных моделей. Позволяет проектировщикам микроустройств тестировать и находить недостатки перед изготовлением этих микроизделий.

Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis (SPICE) — программа моделирования для анализа интегральных схем. Предназначена для моделирования ИС на электрическом уровне и позволяет проверять правильность работы схемы на уровне виртуальной компьютерной модели. Разработана в университете Беркли (США).

Single crystal — монокристалл. Крупный (10^{-2} — 10^3 мм) и обычно достаточно хорошо ограненный отдельный кристалл с однородной и регулярной внутренней структурой. По степени совершенства реальные монокристаллы подразделяют на мозаичные (обладающие практически идеальной структурой) и кристаллы с мозаичной структурой. Монокристаллы чаще всего получают рекристаллизацией поликристаллов, осаждением из газовой фазы, а также спонтанной (мелкие) или направленной (крупные) кристаллизацией растворов или расплавов.

Single Crystal Reactive Ion Etching and Metallization (SCREAM) — травление монокристаллического кремния с металлизацией. Это метод сухого травления. Технология включает в себя реактивное травление монокристаллического кремния и процесс металлизации. Технология реактивно-ионного травления используется для формирования на кремниевой подложке подвижных микроструктур с поперечными размерами более 250 нм и произвольной их ориентацией. А для формирования управляющих электродов применяют процесс ступенчатой металлизации поверхности, основанный на методах напыления металла, и сухое травление металла. Технология может использоваться для формирования сложных геометрических структур: круглых, треугольных и др. С помощью нее можно реализовывать интегрированные емкостные микроактуаторы с высоким характеристическим соотношением, позволяющие возбуждать электростатические силы, которые приводят в движение механические микроэлементы.

Single Electron Device (SED) — одноэлектронные устройства. Наноразмерные устройства, которые могут управлять движением отдельных электронов. Такие устройства имеют одну или несколько сверхмалых областей проводимости с весьма низкой емкостью. Из-за большой результирующей

зарядной энергии этой области электрический заряд в ней становится квантованным, а значит, создав определенные условия, можно воспрепятствовать туннелированию электронов в область и из нее. Такой эффект, носящий название кулоновской блокады (*Coulomb blockade*), может быть использован для управления потоком электронов. Фундаментальным SED-устройством является одноэлектронный транзистор (SET). Он содержит только одну область проводимости, соединенную с истоковым и стоковым электродами туннельными барьерами и имеющую емкостную связь с электродом затвора. Периодически изменяя напряжение на затворе такого транзистора, за счет повторяющегося эффекта кулоновской блокады возможна модуляция тока, протекающего через область исток—сток. Более того, в одноэлектронных устройствах, имеющих несколько областей с взаимной емкостной связью, становится возможным перемещение через эти области отдельно взятых электронов. Таким образом, на основе SED возможна реализация принципиально новых логических схем, рассчитанных на управление отдельно взятыми электронами, например, одноэлектронных схем бинарных диаграмм решения (BDD). Из материалов, используемых для реализации SED, например, металлов, полупроводников семейства A_3B_5 и кремния, последний наиболее интересен с практической точки зрения. Он позволяет создавать чрезвычайно маленькие области проводимости с емкостью порядка аттофарад (10^{-18}) и эффектом кулоновской блокады, проявляющимся при комнатной температуре.

Sintering — синтерование, спекание. Процесс нагревания вещества до температуры ниже температуры плавления, но достаточно высокой для соединения или сплавления отдельных частей. Частицы сливаются из порошкового состояния с помощью диффузии, которая происходит в процессе горения при повышенной температуре.

Slip — сдвиг. Деформация упругого тела, характеризующаяся взаимным смещением параллельных слоев (или волокон) материала под действием приложенных сил при неизменном расстоянии между слоями.

Slurry — суспензия. Жидкость, содержащая суспендированные абразивные компоненты. Используется для доводки, полировки, шлифования твердых поверхностей. Это ключевой элемент процесса химико-механического полирования.

Smart actuator — умный актюатор. Микроактюатор, обладающий функциями сенсирования (детектирования) и обработки сигнала. Для получения микроустройств меньших размеров имеет смысл использовать интеграцию актюатора с сенсором и схемой обработки сигнала в одном объединенном компоненте. Некоторые полимерные актюаторы могут быть "умными", поскольку они обладают функциями детектирования и обработки сигнала.

Smart dust — умная пыль. Структура с полным отсутствием механических связей между элементами, обладающая возможностью активного (собственный микроактюатор, движитель) или пассивного (движение в потоке газа, жидкости) пространственного перераспределения элементов. В этих структурах возможны эпизодические непосредственные информационные связи, однако наиболее вероятно реализация общения и управления через центральное управляющее звено. При этом в основе деятельности системы лежит асинхронная деятельность элементов. Некоторые вероятные области применения таких систем: наблюдение за погодой и радиационной обстановкой; аэро- и гидродинамические измерения в потоках; диагностические и ремонтные работы внутри трубопроводов, работающих двигателей, горячих зон; "тараканы" для уборки и сортировки мусора; поиск потерянных предметов и т. п.

Smart pill — умная таблетка. Робот, который выполняет измерения и осуществляет доставку лекарственных средств внутри организма. В настоящее время наибольшее распространение получили умные таблетки, которые исследуют состояние желудочно-кишечного тракта человека. Эта умная таблетка состоит из микроприбора для отбора проб, необходимых для измерений, отсека для хранения лекарства, микросистемы впрыска, интеллектуального микросенсора и контроллера. Все изготовлено на кремниевой подложке. Все устройство должно потреблять ничтожно малое количество энергии.

Smart sensor — умный сенсор. Сенсор, в котором электроника, обрабатывающая выходной сигнал сенсора, частично или полностью находится с ним на одном чипе. Умный сенсор — это комбинация чувствительного элемента и схемы обработки сигнала (для таких целей, как преобразование импеданса и компенсация температуры), изготовленная на одном чипе. Главная цель интеграции — это минимизация шума и дрейфа, ухода сигнала в ходе передачи. Кроме того, возможна интеллектуальная обработка информации. В настоящее время встречаются интеллектуальные сенсоры среди акселерометров и сенсоров давления.

Smart surface — умная поверхность. Структура, обладающая жестким, фиксированным расположением элементов в узлах сетки (необязательно на одной поверхности), исключающая пространственное перераспределение элементов в системе координат поверхности. При этом движение элементов или деформация сетки возможны не только по инициативе элементов. Активные информационные связи между элементами и центральным звеном для обеспечения синхронной и согласованной деятельности позволяют решать локальные и глобальные задачи управления. Некоторые области применения умных поверхностей: создание структур, в которых согласованные движения элементов гасят турбулентность и уменьшают аэро-

или гидродинамическое сопротивление; создание активных акустических подавителей шума; создание активных адаптивных оптических систем и радиотехнических антенн; создание систем диагностики состояния и очистки корпуса корабля.

Soft bake — предэкспозиционная сушка. Первая стадия термообработки фоторезиста. Осуществляется после нанесения фоторезиста перед его экспонированием. Выполняется при температуре ~ 90 °С. Позволяет подсушить пленку фоторезиста и улучшить его адгезию к подложке.

Soft lithography — легкая литография. Наиболее часто используемое всеобъемлющее понятие для набора методов (наноконтактная литография, нанштамповка и т. д.), которые просты по идее и основаны на наноструктурированных формах или шаблонах. Легкая литография может использоваться для создания наноразмерных изображений посредством нанесения краски и прессованием ее на поверхность или нанесением углублений негативных частей формы (шаблона) на поверхность и т. д. Методы очень просты в принципе, и так как они подразумевают наличие печатной машины, есть возможность массового производства. Методы не требуют специального оборудования и сверхчистых комнат, как на заводах, изготавливающих кремниевые чипы.

Sol-gel conversion actuator — актюатор золь-гелевого преобразования. Актюатор, который использует переход между золевым состоянием (жидкость) и гелевым состоянием (твердое тело). Например, если электроды помещены на маленькую частицу геля натрия полиакрилата в электролитическом растворе и к ним приложено напряжение, частица многократно изменяет свою форму. Они могут быть соединены последовательно, загерметизированы в тонкую трубку и могут образовывать множественные ножки для получения микроробота, который перемещается в одном направлении подобно тому, как движется сороконожка. Другой вариант — это микроробот в виде червяка, который автоматически перемещается по тонкой трубке.

Solid state — твердое состояние, твердотельный. Понятие относится к электронным микроустройствам, таким как транзисторы, которые управляют движением электронов в твердых материалах (в противоположность — в вакууме).

Solid-state image sensor — твердотельный датчик изображения. Полупроводник, который преобразует оптическое изображение в электрический сигнал. Твердотельный датчик изображения классифицируется по способу выбора элементов картинки: датчик изображения МОП-типа использует адресацию, а ПЗС-типа — метод передачи сигнала. В датчике изображения ПЗС-типа свет фиксируется благодаря накоплению электрического заряда в МДП-конденсаторе под воздействием фотонной "бомбардировки". Этот заряд пропорционален интенсивности светового потока. Особенность устройств на базе ПЗС — поступление электрического

импульса от фотоэлемента не напрямую в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а в соседний элемент в том же столбце матрицы. Сигналы от отдельных столбцов одной строки попадают в регистр передачи зарядов, после чего передаются дальше — на АЦП. Таким образом, ввод изображения происходит построчно. Далее информация о световом импульсе преобразуется в цифровой вид. Фотосенсор, выполненный по технологии КМОП, представляет собой матрицу КМОП-элементов, отвечающих каждый за свой пиксель и самостоятельно обрабатывающих информацию о нем. Элемент матрицы содержит фотодиод, усилительный каскад и несколько вспомогательных транзисторов. Сигналы от отдельных фотоэлементов поступают на металлическую "сетку", откуда показания считываются по строкам фотоматрицы, по фрагментам строк или по отдельным фотоэлементам. Поставщиками ПЗС являются компании Kodak (США), Fuji (Япония), Matsushita (Япония), Philips (Нидерланды), Sony (Япония), Texas Instruments (США). Среди производителей КМОП-элементов — Agilent Technologies (США), Canon (Япония), Conexant Systems (США), Mitsubishi (Япония), Motorola (США), OmniVision Technologies (США), STMicroelectronics (США).

Solvent — растворитель. Индивидуальные химические соединения или смеси, способные растворять различные вещества.

Span — интервал. Динамический диапазон физических сигналов, которые можно преобразовать в электрические сигналы сенсором. Модуль разницы между двумя пределами номинального диапазона измерительного устройства. Например, номинальный диапазон -10 В и $+10$ В, интервал равен 20 В.

Specific heat — удельная теплоемкость. Физическая величина, равная отношению теплоемкости вещества к его массе. Физическая величина, показывающая количество теплоты, которое нужно передать 1 кг этого вещества для его нагревания на 1 °С. Единица измерения — 1 Дж/(кг°С).

Spider bonding — паучковое крепление. Метод соединения кристалла микроизделия к выводам корпуса. Отформованная рамка с выводами размещена поверх чипа, и все контакты формируются одновременно в ходе одной операции. Технология автоматизированной сборки микроизделий на ленточном носителе использует эту технологию паучкового крепления для получения межсоединений.

Spin coating — технология получения покрытий методом центрифугирования. Пример: нанесение фоторезиста.

Spontaneous emission — спонтанная эмиссия. В явлении спонтанной эмиссии атом в возбужденном состоянии переходит в основное состояние и спонтанно излучает фотон. Эта "спонтанная" эмиссия в некотором смысле является стимулированной эмиссией; здесь стимулирующим полем являются колебания вакуума.

Spontaneous polarization — спонтанная поляризация. В некоторых классах полярных ионных кристаллов и веществах, относящихся к группе жидкокристаллических, в определенном температурном интервале наблюдаются фазовые переходы без изменения агрегатного состояния, в процессе которых происходит существенная перестройка их структуры. Такая перестройка без нарушения физически и химически однородного состояния вещества приводит к существенному изменению электрических свойств диэлектриков (проводимости, диэлектрической проницаемости), оптической активности и др. Вблизи фазовых переходов, возникающих при изменении характеристик окружающей среды, данные параметры могут изменяться резко, иногда на несколько порядков. Такие фазовые переходы, при которых неполярные вещества самопроизвольно (спонтанно) переходят в полярное состояние, называют сегнетоэлектрическими, а сам процесс перехода в новое состояние — спонтанной поляризацией.

Sputtering — металлизация, напыление. Процесс испускания атомов или группы атомов с поверхности катода (отрицательного электрода) в вакуумной трубке как результат воздействия тяжелых ионов. Этот процесс используется для осаждения тонкого слоя металла на стекло, пластик, металл или другую поверхность в вакууме.

Stability — устойчивость, стабильность. Способность инструмента удерживать свои метрологические характеристики внутри определенных границ.

Standard atmosphere — стандартная атмосфера. Единица давления, равная 760 мм ртутного столба.

Standard Hydrogen Electrode (SHE) — стандартный водородный электрод. Его устройство таково. Платиновый электрод, покрытый мелкодисперсной платиной (платиновой чернью), погруженный в раствор серной кислоты с активностью ионов водорода $1 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$, обдувается струей газообразного водорода под давлением 100 кПа при $T = 298 \text{ К}$. При этих условиях он служит электродом сравнения, от которого отсчитывают потенциалы других электродов.

Static frictional force — сила трения покоя. Сухое трение, возникающее при относительном покое тел, называют трением покоя. Силами сухого трения называют силы, возникающие при соприкосновении двух твердых тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной прослойки. Они всегда направлены по касательной к соприкасающимся поверхностям. Сила трения покоя всегда равна внешней силе и направлена в противоположную сторону. Сила трения покоя не может превышать некоторого максимального значения $F_{\text{тр max}}$.

Stator — статор. Неподвижная часть электрической машины, выполняющая функции магнитопровода и несущей конструкции.

Steady state analysis — анализ устойчивого состояния МЭМС. Определяет ответ микросистемы, подвергнутой затуханию (демпфированию) и сину-

соидальным силам возбуждения. Алгоритм анализа равновесных состояний (*DC analysis*) — это обнаружение равновесного состояния микроизделия при приложении к нему постоянных механических сил или напряжения. Наконец, алгоритм анализа переходных процессов (*transient analysis*) раскрывает мгновенное состояние микросистемы как функцию времени.

Step coverage — переходное покрытие. Если слой материала осажден поверх тонкой полоски материала, это есть отношение толщины пленки вдоль стенок ступеньки к толщине пленки на дне ступеньки. Химическое осаждение из газовой фазы при пониженном давлении и плазмохимическое осаждение из газовой фазы имеют отличный показатель *step coverage*.

Step response — переходная характеристика, реакция на (единичный) скачок. Вследствии инерции и восстанавливающих сил упругости, а также сил, соответствующих активным областям актюаторов, выходное усилие микроактюаторов не изменяется резко в ответ на скачок входного сигнала. Ответная реакция микроактюатора может быть достаточно сложной и в основном представляет собой не экспоненциальную функцию.

Stepper — установка совмещения и последовательного шагового мультиплицирования. Устройство экспонирования резиста, основанное на проекционной литографии и процедурах последовательного шагового экспонирования (см. также *Photolithography*).

Stereochemistry — стереохимия. Наука, изучающая пространственное строение молекул и его влияние на химические и физические свойства веществ. Начала развиваться после открытия Ж. Б. Био (J. V. Biot, 1815) оптической активности органических соединений в растворах. Стереохимия включает три основных раздела. Статическая (конфигурационная) стереохимия, которая изучает пространственное строение молекул, их изомерию и влияние молекулярной структуры на физические свойства. Конформационный анализ, изучающий зависимость физических и химических свойств от конформаций молекул. Динамическая стереохимия, которая изучает стереохимически нежесткие молекулы и стерический ход химических реакций. Базовыми понятиями стереохимии являются хиральность, конфигурация, конформация. Теоретический аппарат стереохимии — теория групп, топология, теория графов, квантовая химия, молекулярная механика, термодинамика. Основные экспериментальные методы — спектрополяриметрия, колебательная и ЯМР-спектроскопия, дифракционные методы. Последние позволяют получить наиболее надежные данные о молекулярной структуре и определить абсолютную конфигурацию хиральных молекул. Для современной стереохимии характерно комплексное изучение оптически активных соединений, развитие методов асимметрического и стереонаправленного синтеза и катализа.

Stereolithography — стереолитография. Процесс получения трехмерных структур расслоением двухмерных форм вследствие термообработки некоторых жидких фотополимеризованных смол лазерным лучом. В общем стереолитография состоит из ультрафиолетового лазера, сканера лазерного луча, подъемного устройства, фотополимеризованной смолы, компьютера. Существует два основных метода стереолитографии: сканирующая и проекционная. Сканирующая микростереолитография формирует твердую микроструктуру по шаблону, воссоздавая ее способом точка-за-точкой, линия-за-линией. Проекционная стереолитография каждый слой изготавливает за одну фазу облучения. Принцип метода сканирования заключается в том, что хорошо сфокусированный лазерный луч с поперечными размерами порядка 1 мкм направляется на поверхность смолы, инициируя в ней процесс полимеризации. Для формирования трехмерной микроструктуры необходимо организовать либо перемещение лазерного луча, либо самого обрабатываемого элемента и осуществлять такое сканирование слой за слоем. В случае проекционной стереолитографии объект строится слой за слоем, при этом каждый слой формируется однократным экспонированием УФ излучением через маску. Здесь, как и в фотолитографии, изображение передается на жидкий фотополимер при освещении его УФ лучами через пластину с фотомаской шаблона. После этого на верхней части затвердевшего полимера подготавливается очередной слой жидкого фотополимера. Повторяя этот процесс, получают многослойную 3D структуру.

Stiction — стикция. Хорошо известная проблема, вытекающая из геометрического закона масштабирования, когда силы поверхностной адгезии больше, чем механические силы восстановления микромашинных структур. По-другому, паразитная адгезия перемещаемых твердых микроструктур, находящихся в очень тесном контакте с поверхностью, вследствие сил Ван-дер-Ваальса, капиллярных сил и водородной связи.

Stiffness — жесткость. Способность тела или конструкции сопротивляться образованию деформации. Жесткость измеряется коэффициентом пропорциональности между усилием и относительной линейной, угловой деформацией или кривизной.

Stimulated emission — вынужденное (индуцированное) излучение. Излучение (испускание) световых волн определенной частоты (в общем случае — электромагнитных волн любого диапазона) возбужденными атомами, молекулами и другими квантовыми системами под действием фотонов внешнего излучения такой же частоты. Вынужденное излучение является результатом вынужденного квантового перехода с более высокого уровня энергии на более низкий и представляет собой процесс, обратный процессу поглощения излучения. Вынужденное излучение совпадает с вынуж-

дающим не только по частоте, но и по направлению распространения, поляризации и фазе, ничем от него не отличаясь. В условиях термодинамического равновесия поглощение преобладает над вынужденным излучением и при распространении в веществе интенсивность света падает. При создании инверсной населенности в активном веществе для света резонансной частоты процесс вынужденного излучения преобладает над процессами поглощения и интенсивность излучения резонансной частоты (при малости нерезонансного затухания) будет возрастать. На этом принципе основано действие большинства лазеров и оптических усилителей.

Stoichiometry — стехиометрия. От греч. *stoiceion* — основа, элемент и *metred* — измеряю. Учение о соотношениях (массовых или объемных) реагирующих веществ. Позволяет теоретически вычислять необходимые объемы реагентов.

Strain — деформация. От лат. *deformatio* — искажение. Изменение формы и объема тела под действием внешних сил. Деформация связана с изменением относительного положения частиц тела и обычно сопровождается изменением межатомных сил, мерой которого является упругое напряжение. Различают четыре основных вида деформаций: растяжение/сжатие, сдвиг, кручение и изгиб.

Strain gauge — датчик деформаций, тензодатчик. Высокочувствительное устройство для измерения деформации или отклика на напряжение на структуре. Напряжение — это, по сути, нагрузка на структуру. Нагрузка может быть статической или динамической.

Stress — напряжение. Механическая характеристика материала. Мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле под влиянием внешних воздействий. В пределах упругости материала зависимость между напряжением и деформациями описывается соотношениями теории упругости; в упругопластическом состоянии — уравнениями теории пластичности. Опытное изучение напряжений проводится методом тензометрии, а также с помощью оптических методов.

Stress corrosion (cracking) — коррозия под напряжением, разламывание, ломка полупроводниковой пластины после скрайбирования. Форма поломки, образующаяся вследствие комбинированного действия растягивающего напряжения и коррозионной (агрессивной) среды. Возникает в случае, когда уровень механического напряжения ниже, чем требуется при отсутствии коррозионной среды.

Stripping — очистка; сдирание; обдирка; снятие верхнего слоя. Процесс полного удаления покрытия, например фоторезиста.

Structural material — структурное вещество. Используется для изготовления движущихся частей в МЭМС-устройстве. Противоположно понятию жертвенный материал, который вытравливается для высвобождения структурного материала.

Structure unit — структурная единица. Стабильный обособленный фрагмент структуры (обычно связанный наиболее прочными связями): атом, ион, молекула, полимерная цепь, слой, каркас и т. д.

SU-8 — специальный, основанный на эпоксидной смоле, оптический резист. Запатентован корпорацией IBM (США) в 1989 г., является обратным УФ фоторезистом, относящимся к типу эпоксидных смол. Разработан для систем с очень толстыми слоями, имеющих высокое характеристическое отношение. С помощью стандартного литографического оборудования уже были получены пленки толщиной до 2 мм и с характеристическим отношением выше 20. Поскольку структуры из SU-8, получаемые литографическим способом, являются достаточно стабильными после облучения УФ светом, они широко используются для изготовления механических частей микросистем, таких как шестеренки, катушки, консоли и бороздки. Это такие микросистемы, как полимерные микроиндукторы; гидрофоны, реализованные по МОП технологии и используемые для подводных работ; акселерометры; мембраны с регулируемой толщиной, на которые литографическим методом наносят печатные схемы. Используя SU-8 в микростереолитографии, можно реализовывать настоящие 3D полимерные структуры. Этот фоторезистивный материал обладает уникальными свойствами — превосходными адгезионными качествами, его применяют практически с любыми подложками; из него на традиционном оборудовании за один технологический проход можно формировать слои толщиной 2...1000 мкм; он обладает исключительной оптической прозрачностью, что делает возможным проведение четкой регулировки нанесения следующих слоев литографическим методом; конечная полимерная структура с большим числом поперечных связей обладает высокой химической устойчивостью и хорошими температурными характеристиками, позволяющими выдерживать технологические процессы с температурами, превышающими 250 °С; имеет отличные механические свойства. Материал SU-8 производится MicroChem Corp., Newton, Massachusetts (все — США).

Subset — подсеть.

Substrate — подложка, синоним слова *wafer*. Материал, на основе которого строится микроустройство. Такой материал может быть активным, как кремний, или пассивным, как алюминиевая керамика.

SUMMiT (Sandia Ultra Planar Multi-level MEMS Technology) — ультрапланарная многоуровневая МЭМС-технология, разработанная корпорацией Sandia. Это процесс четырехслойной поверхностной микрообработки поликристаллического кремния: один "заземленный" слой электрических межсоединений и три механических слоя. Существует также пятислойная версия под названием SUMMiT V.

Superconduction levitated actuator — левитационный актюатор на эффекте сверхпроводимости. Актюатор, который имеет двигательную часть, способную перемещаться в трехмерном пространстве вопреки силе гравитации, под воздействием эффекта Мейснера (Германия). Эффект Мейснера — это полное вытеснение магнитного поля из металлического проводника, когда последний становится сверхпроводящим (при напряженности приложенного магнитного поля ниже критического значения H_k). В данном типе микроактюатора нет трения. Например, перманентный магнит подвержен левитации на статоре. Статор состоит из матрицы суперпроводников, магнит перемещается электрическим током вдоль суперпроводников.

Superconductivity — сверхпроводимость. Явление сверхпроводимости состоит в том, что у некоторых металлов и сплавов происходит резкое падение удельного сопротивления вблизи определенной температуры T_c , называемой температурой перехода в сверхпроводящее состояние. Вещества, обладающие такими свойствами, называются сверхпроводниками. При температурах ниже T_c сопротивление у сверхпроводника полностью отсутствует (равно нулю). В настоящее время известно свыше 500 чистых элементов и сплавов, обнаруживающих свойство сверхпроводимости. Температурный интервал перехода в сверхпроводящее состояние для чистых образцов не превышает тысячных долей градуса, поэтому имеет смысл определенное значение T_c . Ширина интервала перехода зависит от неоднородности металла, в первую очередь, от наличия примесей и внутренних напряжений. Известные в настоящее время температуры T_c изменяются в пределах от 0,155 К (BiPt) до 23,2 К (Nb₃Ge) и 39 К у диборида магния (MgB₂). Явление сверхпроводимости открыл голландский физик Камерлинг Оннес в 1911 г.

Superconducting quantum interference device (SQUIDS) — сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик. Применяется для измерения сверхмалых магнитных полей живых организмов, составления магнитных карт и детектирования объектов, скрытых под поверхностью (см. также *Josephson junction*).

Superconductor — сверхпроводник. Вещества, переходящие в сверхпроводящее состояние при температурах ниже критической (T_K). По магнитным свойствам различают сверхпроводники 1-го и 2-го рода. К сверхпроводникам относятся около половины металлов (например, Al, $T_K = 1,2$ К; Pb, $T_K = 7,2$ К), несколько сотен сплавов (например, Ni—Ti, $T_K = 9,8$ К), в том числе интерметаллические соединения (например, Nb₃Ge, $T_K = 23$ К), многие полупроводники (например, GeTe, $T_K = 0,17$ К).

Superlattice — сверхрешетка. Сверхрешеткой называется периодическая структура, состоящая из тонких чередующихся в одном направлении слоев полупроводников. Период сверхрешетки намного превышает постоянную кристаллической

решетки, но меньше длины свободного пробега электронов. Такая структура обладает, помимо периодического потенциала кристаллической решетки, дополнительным потенциалом, обусловленным чередующимися слоями полупроводников, который называют потенциалом сверхрешетки. Наличие потенциала сверхрешетки существенно меняет зонную энергетическую структуру исходных полупроводников. Полупроводниковые сверхрешетки обладают особыми физическими свойствами, главные из которых следующие: существенное изменение в сравнении с исходными полупроводниками энергетического спектра; наличие большого числа энергетических зон; очень сильная анизотропия (двумерность); подавление электронно-дырочной рекомбинации; концентрация электронов и дырок в сверхрешетке является перестраиваемой величиной, а не определяется легированием; широкие возможности перестройки зонной структуры. Все эти особенности полупроводниковых сверхрешеток позволяют считать эти искусственные структуры новым типом полупроводников. По способу создания периодического потенциала сверхрешетки делятся на несколько типов. Наиболее распространенными являются композиционные и легированные сверхрешетки. Композиционные сверхрешетки представляют собой эпитаксиально выращенные чередующиеся слои различных по составу полупроводников с близкими постоянными решетки, например, система полупроводников GaAs — $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. В легированных сверхрешетках периодический потенциал образован чередованием слоев *n*- и *p*-типов одного и того же полупроводника. Эти слои могут быть отделены друг от друга нелегированными слоями. Такие полупроводниковые сверхрешетки называют часто *nipi*-кристаллами. Для создания легированных сверхрешеток чаще всего используют GaAs. Кроме композиционных и легированных сверхрешеток возможны и другие типы этих материалов, различающиеся способом создания модулирующего потенциала. В спиновых сверхрешетках легирование исходного полупроводникового материала осуществляется магнитными примесями. Периодический потенциал в таких сверхрешетках возникает при наложении внешнего магнитного поля. Потенциал сверхрешетки может создаваться также периодической деформацией образца в поле мощной ультразвуковой волны или стоячей световой волны. Сверхрешетки применяют в различных полупроводниковых приборах. Наиболее ярким примером является использование сверхрешеток в каскадных полупроводниковых лазерах.

Surface Acoustic Wave (SAW) actuator — актюатор на поверхностных акустических волнах. Принцип работы данных микроактюаторов основан на возбуждении в пьезоэлектрической подложке поверхностных акустических волн с частотой до 100 МГц. Под действием этих волн совершает движение находящийся в контакте с подложкой пере-

мещаемый объект. Указанные волны в подложке объединяют в себе продольную и нормальную составляющие, результирующая которых, действующая на перемещаемый объект, заставляет его совершать движение в направлении, противоположном вектору скорости распространения волны. Достоинствами микроактюаторов на ПАВ являются: высокая скорость перемещения объекта, точность и легкость позиционирования перемещаемого объекта, достаточно большое развиваемое усилие, небольшие габаритные размеры. Используются как микроприводы головок в накопительных устройствах информации (винчестерах), а также в качестве устройств микропозиционирования в оптических микросистемах.

Surface Acoustic Wave (SAW) sensors — сенсор на поверхностных акустических волнах. ПАВ-микросенсор представляет собой тонкую пластинку из отполированного пьезоэлектрического материала (например, кварца, ниобата лития, танталата лития), на которую нанесены две системы встречно-штырьевых преобразователей (ВШП), одна из которых работает в качестве передающего преобразователя, а вторая является принимающим преобразователем. Края на обоих концах пластинки искажаются или нагружаются абсорбционной резиной для подавления отражения в направлении распространения первичной волны. Если на одну из систем ВШП подается высокочастотное напряжение, то на поверхности пластинки за счет обратного пьезоэффекта генерируется поверхностно акустическая волна. Эта волна затем распространяется вдоль поверхности пластинки до тех пор, пока не попадет на другую систему ВШП, где она преобразуется обратно в высокочастотное напряжение. Область распространения ПАВ между системами ВШП используется в сенсорных устройствах в качестве чувствительной области. Любое изменение физических параметров среды (температуры, давления) оказывает влияние на рабочую частоту ПАВ-прибора. Это явление используется в данном типе датчиков в качестве сенсорного эффекта. Используется в качестве химических газовых сенсоров.

Surface micromachining — поверхностная микрообработка. Заключается в построении микроструктур на поверхности кремния путем осаждения тонких пленок защитных (жертвенных) и структурных слоев и удаления в конце процесса защитных слоев для получения требуемой механической структуры. Существует несколько основных подходов к изготовлению микросистем по поверхностным технологиям: технология защитного слоя; совместное применение традиционных методов изготовления микросхем и жидкостного анизотропного травления; использование плазменного травления для производства микроструктур на поверхности кремниевой подложки. Технология защитного слоя состоит из следующих основных этапов: осаждение и формирование защитного слоя из диоксида кремния на подложке; осаждение и формиро-

вание слоя из поликремния; удаление защитного оксида травлением в плавиковой кислоте. При совместном применении традиционных методов изготовления микросхем и жидкостного анизотропного травления на первой стадии по ИС технологии формируется многослойная структура, обычно состоящая из стандартных изоляционных и пассивирующих диэлектрических пленок, а также слоев поликремния и металла. После этого в соответствии с определенным шаблоном вокруг построенной многослойной структуры путем удаления всех диэлектрических слоев прорезаются специальные "окна", через которые облучается кремниевая поверхность. На заключительной фазе процесса подложки погружаются в анизотропный травильный раствор, удаляющий весь облученный кремний вокруг многослойной структуры. Далее, применяя операцию подтравливания, освобождают готовую микроструктуру.

Surface Mount Technology (SMT) — технология поверхностного монтажа. Технология установки микросхемы на печатную плату, по которой компоненты размещают на поверхности платы без использования для установки переходных отверстий. Для данного монтажа используются корпуса с двумя основными типами выводов: "gull wing" и "J". Корпусы с выводами типа "gull wing" позволяют выполнять ручную пайку и обеспечивают более простой контроль паяных соединений. Применение корпусов с выводами типа "J" уменьшает площадь печатной платы.

Surface passivation — пассивация поверхности. Технология пассивации поверхности полупроводника предназначена для решения следующих задач: предотвращение реакции полупроводника с атмосферой в течение всего времени жизни полупроводникового изделия (химическая пассивация); устранение интерфейсных состояний запрещенной зоны, а также препятствие их образованию (электрическая пассивация); обеспечение достаточного барьера, чтобы электроны полупро-

водника не терялись в пассивирующем слое. Термин "пассивация" означает, что поверхность полупроводника становится менее химически активной и при этом на ней становится меньше активных центров рекомбинации и (или) сами эти центры становятся менее активными. Имеет критически важное значение в надежности МЭМС.

Surface roughness — шероховатость поверхности. Совокупность микронеровностей обработанной поверхности. Шероховатость поверхности описывается набором параметров, характеризующих среднюю и максимальную высоты неровностей и их ширины, средние расстояния между ними и т. д.

Surface smoothness — чистота поверхности.

Surface tension — поверхностное натяжение. Термодинамическая характеристика поверхности раздела фаз (тел), определяемая как работа образования единицы площади этой поверхности. Сила поверхностного натяжения направлена по касательной к поверхности жидкости, перпендикулярно к участку контура, на который она действует. Сила поверхностного натяжения пропорциональна длине того участка контура, на который она действует. Коэффициент пропорциональности α — сила, приходящаяся на единицу длины контура — называется коэффициентом поверхностного натяжения. Он измеряется в ньютонах на метр. Поверхностное натяжение может быть на границе газообразных, жидких и твердых тел. Обычно имеется в виду поверхностное натяжение жидких тел на границе "жидкость—газ". В случае жидкой поверхности раздела поверхностное натяжение правомерно также рассматривать как силу, действующую на единицу длины контура поверхности и стремящуюся сократить поверхность до минимума при заданных объемах фаз.

Swell — зазор. Зазор между областью металлизации и не подсоединенной к нему контактной площадкой.

System-level model — модель на системном уровне.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Нанозонд исследует живую клетку

Исследователями из Университета Иллинойса (University of Illinois) создан наноразмерный зонд, который можно использовать для исследования отдельных органелл живых клеток.

Как сообщает EurekAlert, отдельные нанотрубки-зонды могут проводить мониторинг электрохимических и биохимических процессов, происходящих в живых клетках (рис. 1). При этом по-

ложением нанoeлектродов можно управлять очень точно.

Для того чтобы изготовить подобные электроды, ученые взяли нанотрубку из нитрида бора, а затем присоединили ее к исследовательскому зонду большего размера, проводящему электричество. В итоге нанотрубка сыграла роль изолятора в нанoeлектроде.

После этого исследователи покрыли нанотрубку слоем золота толщиной от 10 до 50 нм. На зо-

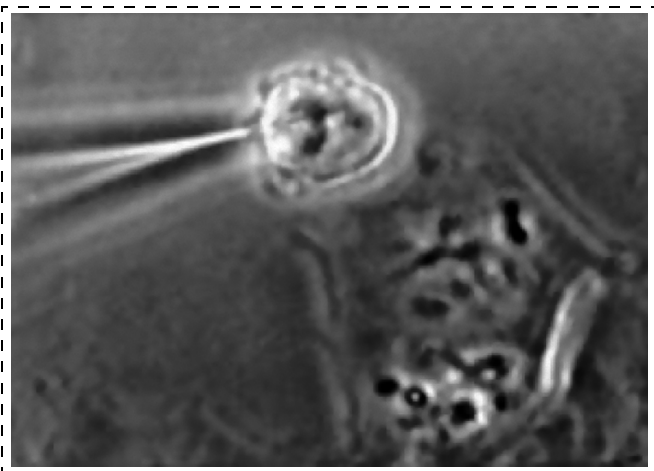


Рис. 1. Наностройство сможет безболезненно проникать в живую клетку

лотое нанопокрывание сверху было нанесено еще одно — полимерное, толщиной 10 нм. Полученный электрод был 100 нм в диаметре и длиной около 30 мкм.

Благодаря тому, что нанотрубка была присоединена к более "массивному" окончанию, можно было легко манипулировать положением "рабочего зонда"-нанотрубки относительно биологических объектов.

Наноманипулятор-зонд настолько миниатюрен, что его можно приложить даже к ядру клетки или отдельной митохондрии.

В проведенном эксперименте ученые использовали наноэлектроды для того, чтобы изучить химическую среду капли диаметром 10 мкм. Следующим шагом будет изучение среды живой клетки без ее повреждения.

Источник: EurekAlert: Super small nanoelectrodes can probe microscale environments (http://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-03/uoi-a-ssn030507.php)

Фемтолазер генерирует нанокубы

Как установили ученые, импульсы фемтосекундного лазера могут генерировать нанокристаллы различных форм и размеров — в виде кубов и других геометрических фигур.

Как сообщает Optics.org, одно из достоинств нового метода — его простота. Наночастицы различной морфологии сегодня востребованы в различных отраслях человеческой деятельности. Это и капсулы для доставки лекарств, и наполнители для различных композитов, и контрастные агенты в медицинской диагностике. Однако производство наночастиц определенной формы, нужных в том или ином продукте, зачастую дорого, и ученые сталкиваются с различными трудностями при их получении.

Исследователи из IMRA America во главе с Янгом Че (Yong Che) попытались с помощью нового ме-

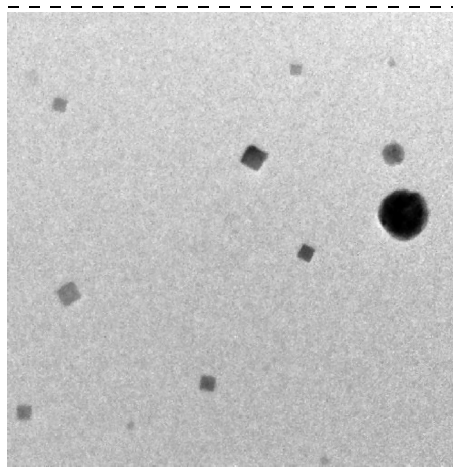


Рис. 2. Наночастицы NiO в форме кубов, полученные учеными

тогда произвести наночастицы никеля, востребованные в области магнитного хранения данных.

Основа разработанной Янгом и его коллегами технологии — иттербиевый оптоволоконный фемтосекундный лазер (ФСРА-μJewel) с частотой импульсов 500 фс^{-1} . Наночастицы формируются под воздействием лазера практически на любой подложке (органические полимеры, стекло, пластиковые пленки) и не агрегируются в комки, как это происходит при традиционных методах их производства.

Синтез наночастиц происходил в газовой фазе (ученые использовали аргон и кислород). В результате Че и его коллеги получили кубические наночастицы оксида никеля размерами до 20 нм (рис. 2).

Сперва ученые искали наночастицы структуры ядро—оболочка Ni—NiO и были удивлены, обнаружив кристаллические кубики NiO.

Как объясняет Че, появление кубических структур обязано кратковременному воздействию лазера на наночастицы. При этом структуры типа ядро—оболочка не успевают образоваться.

Теперь ученые пытаются найти применение кубам из оксида никеля. Одно из их потенциальных применений — в микроэлектронике, в качестве носителя в магнитных устройствах хранения данных.

Источник: Optics.org: Ultrafast laser pulses generate nanoparticles (<http://optics.org/cws/Articles/ViewArticle.do;jsessionid=1CCDC936C5395A5188D3D0B5C8C0C85C?channel=technology&articleId=27077>)

Наномагниты улучшат MRI-диагностику

Наномагниты могут значительно улучшить современную MRI-диагностику, увеличив контраст между здоровыми и больными тканями.

Ученые из Национального института стандартов и технологий США (NIST) сумели создать молекулярные наномагниты, каждый размером всего 2 нм.

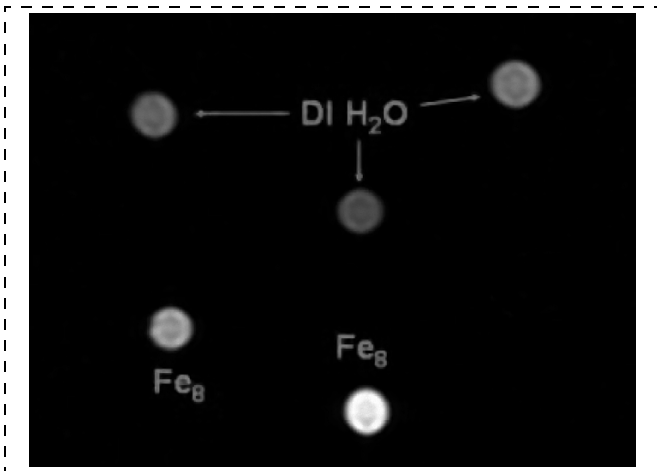


Рис. 3. Наномангниты

Контрастные агенты для MRI-техники бывают двух типов. Магнитные ионы и "наночастицы-компасы" с локальными магнитными полями обрабатываются специальным образом для того, чтобы агенты могли прикрепиться к определенным типам клеток.

Новые магниты (рис. 3) благодаря малым размерам могут использоваться в больших концентрациях не принося вреда пациенту. Поэтому контрастность изображений значительно повышается.

Прежде чем перенести метод в широкую клиническую практику, ученые проверяют его в Детском госпитале в Денвере (The Children's Hospital).

Источник: EurekAlert: Using nano-magnets to enhance medical imaging (http://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-02/nios-unt020107.php)

Оптический "нанотюль" выходит в видимый диапазон

Учеными из США создан новый метаматериал с уникальными оптическими свойствами. Он характеризуется отрицательной магнитной и электрической проницаемостью для инфракрасного света с длиной волны 813 нм.

Владимир Шалаев из Университета Пэрдью (Purdue University) говорит, что метаматериалы подобрались уже довольно близко к длинам волн видимого света (380—780 нм). Новый материал ученые назвали DN-NIM (рис. 4).

Обычно традиционные материалы имеют положительный показатель преломления. Метаматериалы, у которых коэффициент преломления отрицательный, являются суперлинзой. К примеру, с помощью суперлинз пучок света можно сфокусировать в точку, меньшую по размерам, чем его длина волны. Это позволит современным микроскопам заглянуть за увеличительный предел, обусловленный длиной волны видимого света, и стать более точными.

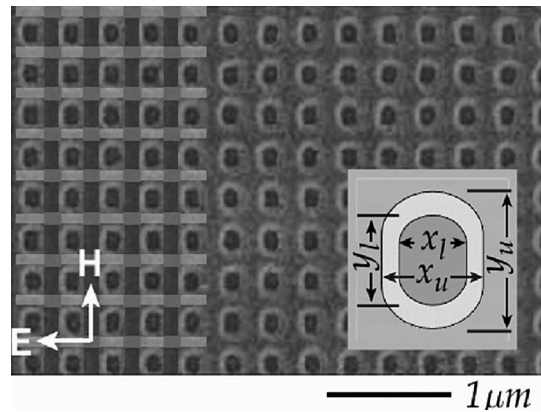


Рис. 4. Микроэлектронная фотография материала DN-NIM

Метаматериал состоит из двух слоев серебра, разделенных алюминием. На поверхности DN-NIM ученые создали специальный шаблон: массив прямоугольных отверстий диаметром 120 нм, расстояние между которыми 300 нм.

С помощью электронной микроскопии можно видеть, что метаматериал похож на "тюль" благодаря крупным ячейкам на его поверхности. Шалаев не отрицает, что в будущем метаматериалы могут работать и с видимыми длинами волн света, что может послужить основой для появления оптических микроскопов высокого разрешения.

Источник: Physicsweb: Double-negative metamaterial edges towards the visible (<http://physicsweb.org/articles/news/11/3/13/1>)

Микролинзы увеличивают эффективность оптоволоконна

Как установили ученые из Тайваня, микроскопические асимметричные линзы увеличивают оптическое сопряжение между оптоволоконном и 980-нм лазерным диодом высокой мощности. При этом степень сопряжения составляет около 85 %, что достаточно хорошо для этой оптической системы.

Как говорит глава исследовательской группы Лу (Lu) из Национального университета Тайваня Сан Ят-Сен (National Sun Yat-Sen University), это исследование может значительно улучшить работу современных оптических волноводов.

В первую очередь ученые создали асимметричную эллипсо-коническую линзу (elliptic-cone-shaped fiber endface — AECSFE). Лу и его коллеги использовали термообработку отдельного волокна фибры для придания ей нужной кривизны (рис. 5).

Кривизна линзы играет значительную роль для увеличения оптического сопряжения с мощными полупроводниковыми лазерами, поэтому Лу и его коллеги пробовали различные вариации геометрии линзы.

Как показали исследования, для обычного оптоволоконна (SMF) в зависимости от геометрии линз

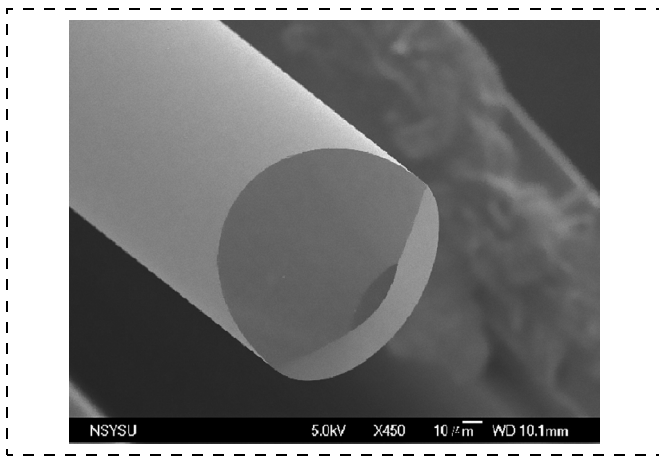


Рис. 5. Микролинза, сформированная на торце оптоволокна

сопряжения варьируется от 71 до 85 %. Эти практические результаты были получены с помощью математического моделирования, благодаря которому ученые смогли определить необходимую геометрию кривизны линз.

Источник: Optics.org: Microlenses improve fiber coupling efficiencies (<http://optics.org/cws/article/technology/27336>)

Магнитные вихри будут запоминать данные

Как установили ученые из Японии, эффект магнитного вихря внутри ферромагнитного диска можно использовать для создания ячеек памяти.

Как сообщает Nanotechweb, команда исследователей из Киотского университета (Kyoto University) и их коллеги из Парижа показали, что направлением магнитного вихря, индуцированного сердечником ферромагнитного диска (рис. 6), можно управлять, тем самым изменяя его логическое состояние с 0 на 1.

Магнитный вихрь — это изогнутая магнитная структура, которую исследователи обнаружили на

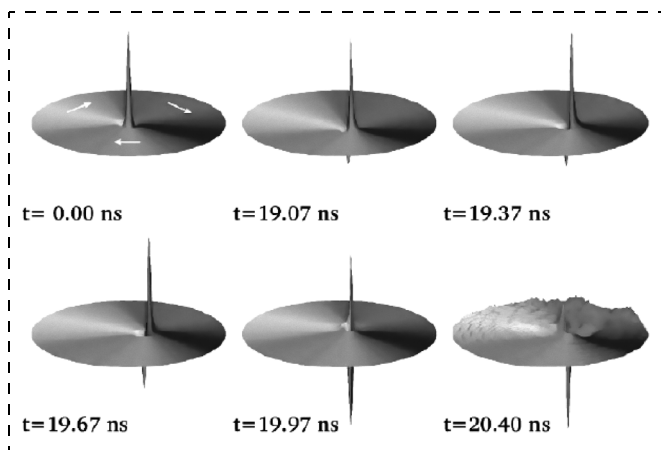


Рис. 6. Магнитоскопия различных состояний ферромагнитных дисков (Kyoto University)

поверхности ферромагнитных дисков диаметром менее нескольких микрон. Вихри существуют в только в одном из двух "закрученных состояний", когда вихрь вращается влево или вправо. Кроме направления вращения вихрь изменяет свое положение относительно диска — он находится либо "сверху", либо "снизу". "Поляризация вихря сердечника" менялась учеными с помощью внешнего магнитного поля.

Естественно, что дуальность расположения магнитного вихря была использована для того, чтобы создать элементарную ячейку памяти, хранящую логическую 1 либо 0.

Смену логических состояний ученые смогли зафиксировать с помощью магнитоскопической микроскопии.

Как говорят ученые, их открытие будет особенно востребовано в спинтронике.

Магнитные диски могут быть использованы как элементарные ячейки массивов памяти спинтронных устройств.

Однако для этого необходимо добиться "переключения" вихря с помощью электрического тока. Над этим японские ученые планируют заниматься в дальнейшем.

Источник: Nanotechweb: Vortex core flipping goes electrical (<http://nanotechweb.org/articles/news/6/3/14/1>)

Батарейки, которые собираются сами по себе

Ученые из Массачусетского Технологического института (MIT) создали литиево-ионную батарею (Li-ion), которая собирается сама из материалов микроскопического размера.

Профессор материаловедения Йет-Мин Чианг (Yet-Ming Chiang) из MIT и его коллеги смогли сконструировать набор для "быстрого приготовления" Li-ion батарей.

Наноматериал-электролит и материал, являющийся электродом, комбинировались вместе, после чего происходила самоорганизация микро- и наночастиц материалов, приводящая к появлению структуры, полностью функционирующей как обычная батарея.

Самосборка наноматериалов — достаточно отработанная технология для получения нанокомпозитов с новыми свойствами, биodeградирующих наноматериалов и других структур. Однако до настоящего времени не было речи о том, что в результате самосборки появится работоспособное микроскопическое устройство.

Как сообщает Technology Review, основной трудностью в создании этого удивительного устройства, которую смогли преодолеть Чианг и его коллеги, была сборка электрода для батареи. Материал, необходимый сначала для упорядочивания наночастиц в составе электродов, а затем и для нормальной работы батареи, синтезировать было

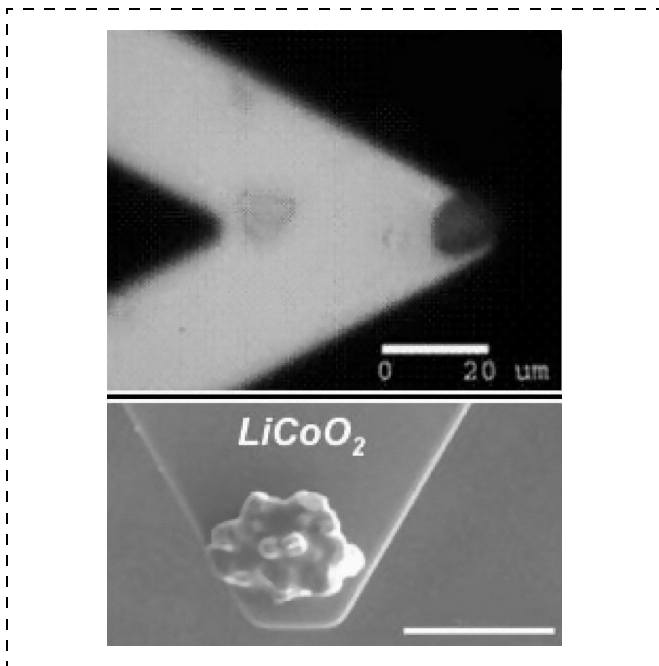


Рис. 7. Микрофотография собранной батареи (MIT)

непросто. Более того, два электрода, собранные наночастицами, должны быть разделены друг от друга в электролите, иначе батарея просто не будет работать (рис. 7).

Для этого ученые подобрали различно заряженные наноматериалы, которые будут всегда на расстоянии друг от друга. Это микрочастицы графита и наночастицы оксида кобальта. Электролит служил в роли изолятора, благодаря нему ионы могут переноситься между электродами.

Как установили исследователи, цикл перезарядки может быть выполнен на этом устройстве много раз.

Одно из потенциальных применений микробатареи — в мобильных автономных микроустройствах и МЭМС.

Источник: Technology Review: Self-Assembling Batteries (<http://www.technologyreview.com/Energy/18194/>)

Ученые установили, почему наноструны нарушают законы физики

Ученые установили, как изменяются электропроводные свойства металлических нанострун в зависимости от их длины.

Физики из Технического института Джорджии (Georgia Tech) определили, что металлические наноструны различной длины проводят электричество по-разному из-за специфических пар атомов, называемых димерами.

Оказалось, что димеры сильно влияют на электропроводность из-за структурных особенностей нанострун. Так, если в ниобиевых нанострунах димеры расположены по центру, то их электропроводность больше, чем у нанострун, в которых димеры находятся сбоку.

Экспериментальные данные подтвердились квантовомеханической моделью, которую ученые составили специально для металлических нанострун.

Расположение же димеров в значительной степени зависит от длины наноструны и других морфологических особенностей. Поэтому то, что проводимость у коротких и длинных наноструктур отличается (хотя теоретически не должна), уже не удивляет исследователей.

Пока не видны области практического применения этого открытия, однако оно сыграло важную роль в понимании фундаментальной физики наноструктур. Говоря иначе, теперь ученые больше знают о том, почему законы физики в наном мире "отличаются" от привычных нам.

Источник: Scientists Find Why Conductance of Nanowires Vary (<http://www.gatech.edu/news-room/release.php?id=1262>)

Составил **Ю. Г. Свидиненко**, главный аналитик компании Nanotechnology News Network

CONTENTS

Yashin K. D., Osipovich V. S., Pitsuk S. E. <i>Receiving of Nanoparticle</i>	2
Bobkov S. G., Kireev V. Yu. <i>Transition Problems of Microelectronics into SUB-100 NM region feature size. Part 2. The Possibilities Nanoimprint Lithography and Projective Optical Lithography</i>	8
Aleksandrova I. P., Ivanov Yu. N., Sukhovskiy A. A., Vakhrushev S. B. <i>²³Na NMR Study of the Relaxor-Ferroelectric Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO₃ Local Structure</i>	19
Koleshko V. M., Sergeichenko A. V. <i>Sol-Cel Methods of Nanostructured Materials Formation for Sensor Microsystems</i>	24
Sherstnev P. V., Baturin A. S., Sheshin E. P., Knyazev A. I. <i>Magnetic Orientation of Carbon Particles as the Method of Increasing Field Emission Cathode Efficiency.</i>	29
Makarov V. M., Ivanov P. G., Zaya V. G. <i>SAW Ring Filters Modelling</i>	33
Mustafaev A. G. <i>Constructive and Technological Ways of SOI Mosfet Parameters Improvement.</i>	37
Subir Kumar Sarkar, Ankush Ghosh, Samya Deb Bhattacharya, K. Senthil Kumar, Souvik Sarkar. <i>Single Spin Logic Implementation of a PN Sequence Generator for Direct Sequence Spread Spectrum Systems</i>	43
Telets V. A. <i>"Intellectual" Ammunitions and Mines of the XXI Century</i>	48
Ushkov A. V., Isakova G. A., Ryabov V. T. <i>Designing of Methods for Compensation of Convex Angles by Forming the Diaphragm of the Silicone Sensitive Pressure Element with Rigid Center in the KOH Solution.</i>	55
Gornev E. S., Zaitcev N. A., Puzikova E. V., Safronov A. Ya. <i>Investigation and Development of Microelectromechanical Switch Based on Piezoelectric Skins</i>	58

For foreign subscribers:

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

The journal bought since november 1999.

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

ISSN 1813-8586.

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

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский 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 19.04.2007. Подписано в печать 23.05.2007. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,69. Заказ 778. Цена договорная

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